

Д. Ю. ПИМЕНОВ, В. И. ГУЗЕЕВ, д-р техн. наук, В. А. ПАШНЕВ, канд. техн. наук (Южно-Уральский ГУ (национальный исследовательский университет), г. Челябинск), e-mail: danil_u@rambler.ru

Определение допустимого износа торцевых фрез для обеспечения требуемой точности

Исследовано влияние глубины и скорости резания, свойств обрабатываемых материалов и податливости технологической системы на допустимую величину износа задней поверхности зубьев торцевой фрезы, обусловленной требуемой точностью обработки. Рассчитаны предельные износы для нормативных режимов резания.

Ключевые слова: торцевое фрезерование, износ, точность.

The influence of cutting intensity and tool-cutting speed, work material properties and technological system compliance on bearable wear value of end mill teeth clearance face, due to precision working requirement, was analyzed. Limit runouts of the tool for standard conditions were computed.

Keywords: face milling, runout, precision.

Установлено, что сила $P_{i\Sigma}$ резания зависит не только от режимов резания, геометрии фрезы, механических свойств обрабатываемого материала, но и от износа фрезы [1], а именно от длины l_3 площадки износа задней поверхности режущей части зуба:

$$P_{i\Sigma} = P_{i\text{сд}}(S_z) + P_{i\text{из}}(l_3),$$

где S_z — подача на зуб; $P_{i\text{сд}}(S_z)$ — составляющая силы резания в направлении оси i , зависящая от

процессов в зоне сдвига; $P_{i\text{из}}(l_3)$ — составляющая силы резания, зависящая от износа задней поверхности зуба фрезы [2–7].

В работе [8] на базе модели силы резания [1] получена модель погрешности динамической настройки, анализ которой показал, что с увеличением площадки износа зуба фрезы задней поверхности (длина l_3) данная погрешность изменяется по формуле

$$\Delta_{i\Sigma} = C_{i\Sigma} P_{i\text{сд}}(S_z) + C_{i\Sigma} P_{i\text{из}}(l_3),$$

где $C_{i\Sigma}$ — податливость технологической системы в направлении оси i .

При превышении некоторого износа фрезы не удастся обеспечить при тех же режимах резания заданную точность обработки, для этого необходимо знать допустимый износ торцевой фрезы.

Погрешность $\Delta_{z\Sigma}$ обработки зависит от геометрии режущей части зубьев фрезы и режимов резания, а именно от длины l_3 износа, подачи S_z и скорости v резания. Условия обеспечения требуемой точности:

$$\Delta_{z\Sigma} = (C_{z\Sigma} + r_{\text{ф}}^2 \xi_{xz_1}) [P_{x_{i\Sigma\text{сд}}}(S_z) + P_{x_{i\Sigma\text{из}}}(l_3)] - r_{\text{ф}} l_3 \xi_{xz_1} [P_{x_{i\Sigma\text{сд}}}(S_z) + P_{x_{i\Sigma\text{из}}}(l_3)] \leq \Delta_{z\text{пр}}, \quad (1)$$

где $C_{z\Sigma}$ — податливость технологической системы в направлении оси z [9, 10]; $r_{\text{ф}}$ — радиус фрезы; ξ_{xz_1} — угловая податливость торцевой фрезы в плоскости x_1z_1 ; l_3 — вылет фрезы; $\Delta_{z\text{пр}}$ — заданная предельная погрешность.

Суммарная сила резания включает в себя все составляющие силы резания, действующие на зубьях фрезы, которые участвуют в работе [11, 12].

Определение допустимой погрешности динамической настройки

При назначении подачи важным является ограничение по точности [13–17]. Для разработки модели процесса резания по критерию точности рассмотрим диапазон погрешностей при торцевом фрезеровании.

Суммарная погрешность при фрезеровании имеет вид [18]:

$$\Delta_{\Sigma} = \frac{1}{K} \sqrt{(K_1 \varepsilon)^2 + (K_2 \Delta_{z\Sigma})^2 + (K_3 \Delta_{\text{н}})^2 + (K_4 \Delta_{\text{н}})^2 + (K_5 \Delta_{\text{ст}})^2 + (K_6 \Delta_{\text{пр}})^2}, \quad (2)$$

где $\Delta_{z\Sigma}$ — погрешность от упругих деформаций технологической системы в результате изменения си-

Таблица 1

Значения коэффициента K_d		
Обработка	КТ	K_d
Черновая, полусточная	14+12	0,45
Чистовая, отделочная	7+11	0,35

Таблица 2

Размеры, мм	Значения допустимой погрешности $\Delta_{z\text{пр}}$ динамической настройки, мкм									
	Стадия обработки									
	отделочная		чистовая		полусточная		черновая			
КТ										
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
До 80	12	18	30	48	76	120	184	296	480	
До 250	18	29	46	74	116	184	288	460	740	
До 500	25	39	62	100	160	252	388	620	1000	

Таблица 3
Значение износа $\Delta_{\text{н}}$ задней поверхности зубьев торцевых фрез при разной длине l_3 площадки износа, мкм

α°	l_3 , мм									
	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6
5	4	9	17	35	52	70	87	105	122	140
7	6	12	25	49	74	98	123	147	172	196
9	8	16	32	63	95	127	158	190	222	253

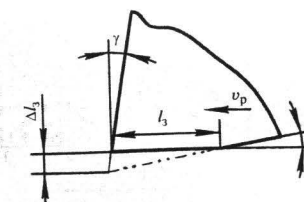


Рис. 1. Изменение геометрии режущего клина при изнашивании фрезы по задней поверхности

лы резания; ε — погрешность установки заготовок в приспособлении; $\Delta_{\text{н}}$ — погрешность наладки технологической системы на заданный размер; $\Delta_{\text{н}}$ — износ режущего инструмента; $\Delta_{\text{ст}}$ — геометрические погрешности станка; $\Delta_{\text{пр}}$ — прочие погрешности, а именно: $\Delta_{\text{у}}$ — погрешность системы управления (воспроизведения программы), в том числе погрешность позиционирования исполнительного органа станка; $\Delta_{\text{т}}$ — погрешности в результате объемных, контактных деформаций элементов технологической системы вследствие их нагревания при резании, трения подвижных элементов, изменения температуры в цехе.

Если расположить показатели погрешности по значимости их влияния на точность при торцевом фрезеровании на станках с ЧПУ, получим [15]: 1) $\Delta_{z\Sigma}$; 2) $\Delta_{\text{н}}$; 3) $\Delta_{\text{н}}$; 4) $\Delta_{\text{ст}}$; 5) $\Delta_{\text{н}}$; 6) $\Delta_{\text{у}}$. При этом суммарная погрешность не должна превышать допустимую погрешность: $\Delta_{\Sigma} \leq \Delta_{\text{доп}}$.

Оценим количественно влияние погрешности от износа $\Delta_{\text{н}}$ фрезы и упругих деформаций $\Delta_{z\Sigma}$ технологической системы в общем объеме погрешностей. Для этого введем коэффициент K_d , определяющий долю суммы данных погрешностей в общем объеме погрешностей:

$$\Delta_{z\text{пр}} = \Delta_{z\Sigma} + \Delta_{\text{н}} = K_d \Delta_{z\text{доп}}. \quad (3)$$

На разных этапах обработки коэффициент K_d имеет разные значения (табл. 1) [13–17]. В табл. 2 представлены значения допустимых погрешностей $\Delta_{z\text{пр}}$ динамической настройки.

Увеличение площадки износа по задней поверхности сопровождается изменением размеров фрезы (рис. 1).

В соответствии с рис. 1

$$\Delta_{\text{н}} = \frac{l_3 \text{tg} \alpha}{\sin(90 - \alpha + \gamma)} \sin(90 + \alpha) \cos \gamma, \quad (4)$$

где γ , α — соответственно передний и задний углы режущей части инструмента.

В табл. 3 сведены значения $\Delta_{\text{н}}$ при разных длине l_3 площадки износа и угла α , рассчитанные по фор-

“Библиотека Машиностроителя”
www.lib-bkm.ru

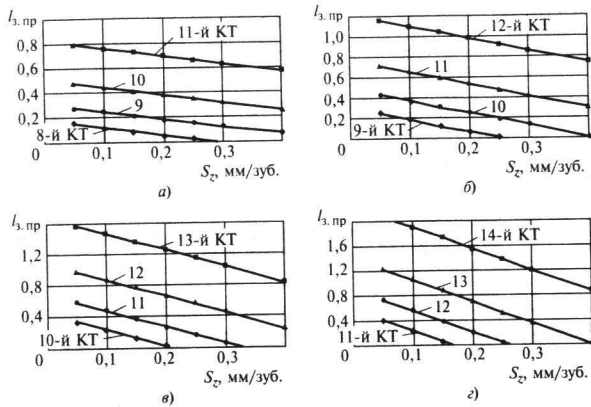


Рис. 2. Зависимость изменения предельного износа $l_{3,пр}$ инструмента от подачи S_z и глубины t резания при фрезеровании стали 45 для разных КТ: $D_{фр} = 200$ мм; $z = 20$; $B = 120$ мм; $v = 150$ м/мин; $t = 1$ (а), 2 (б), 4 (в) и 8 мм (г)

муле (4). Из выражений (1) и (2) с учетом формул (3) и (4) получим:

$$\Delta_{z\Sigma} + \Delta_n = (C_{z\Sigma} + r_{\phi}^2 \xi_{xz1}) [P_{z_{и\Sigma_{сд}}}(S_z) + P_{z_{и\Sigma_{из}}}(l_3)] - r_{\phi} \xi_{xz1} [P_{x_{и\Sigma_{сд}}}(S_z) + P_{x_{и\Sigma_{из}}}(l_3)] + \frac{l_3 \operatorname{tg} \alpha}{\sin(90 - \alpha + \gamma)} \sin(90 + \alpha) \cos \gamma \leq K_4 \Delta_{zдоп} \quad (5)$$

Из выражения (5) можно определить допустимый износ (длину l_3 площадки износа) инструмента при определенных значениях подачи S_z и скорости v резания и заданной точности обработки (см. табл. 2).

Расчет допустимого износа торцевой фрезы

С увеличением l_3 увеличиваются сила $P_{z\Sigma}$ резания, погрешность $\Delta_{z\Sigma}$ динамической настройки и износ Δ_n . Для выполнения условия (5) необходимо определить предельную длину $l_{3,пр}$ площадки износа при определенных значениях подачи S_z и скорости v резания, т. е. значение l_3 , при превышении которого не обеспечивается заданная точность обработки.

Заданная точность обработки — качество точности (КТ), обеспечивается инструментом с площадью износа, длина которой не превышает предельное значение ($l_{3,пр}$), зависящее от сочетания таких параметров обработки, как подача S_z и глубина t резания (рис. 2), т. е. $l_{3,пр} = f(S_z, \Delta_{zпр}, t)$.

Анализ полученных зависимостей показал, что $l_{3,пр}$ уменьшается с увеличением подачи S_z и глубины резания t . Это же наблюдается при назначении более высокого КТ. Так, при постоянной скорости

резания и $t = 2$ мм допустимая (с учетом точности обработки) величина $l_{3,пр}$ относительно аналогичной обработки при $t = 1$ мм снижается на 10 %, при $t = 4$ мм — на 25 %, при $t = 8$ мм — на 48 %. Изменение подачи от 0,1 до 0,2 мм/зуб приводит к уменьшению $l_{3,пр}$ при глубине резания $t = 1$ мм для 8-го КТ на 60 %; для 9-го КТ на 35 %; для 10-го КТ на 20 %; при $t = 2$ мм для 11-го КТ на 25 %; для 12-го КТ на 14 %; при $t = 4$ мм для 13-го КТ на 15 %, при $t = 8$ мм для 14-го КТ на 23 %. Следовательно, подача S_z оказывает большее влияние на износ инструмента, чем глубина t резания.

Кроме того, износ инструмента, определяющий точность обработки, зависит от обрабатываемого материала, т. е. от его механических свойств — предела прочности σ_B и твердости HB . Торцевыми фрезами, как правило, обрабатывают: углеродистые стали марок 20, 45, 55; хромистые стали — 20Х, 40Х; хромокремнемарганцевые стали — 20ХГСА и 30ХГС; хромоникельвольфрамовую сталь 18ХНВА; хромоникелевую сталь 40ХНМ. Механические свойства этих материалов приведены в табл. 4 [19]. На рис. 3 приведены зависимости изменения $l_{3,пр}$ от подачи S_z и обрабатываемого материала для 10-го КТ, т. е. $l_{3,пр} = f(S_z, \Delta_{zпр}, \sigma_B, HB)$, анализ которых показал, что $l_{3,пр}$ уменьшается с увеличением S_z . Кроме того, повышение механических свойств обрабатываемого материала, т. е. предел прочности σ_B и твердость HB , приводит к уменьшению $l_{3,пр}$. Так, при постоянной скорости резания $v = 150$ м/мин допустимые износы для разных сталей по сравнению с обработкой стали 45 выше для стали 20 на 9 %, для стали 20Х на 13 % и уменьшается для сталей: 40Х — на 8 %, 55 — на 13 %, 40ХНМ — на 15 %, 20ХГСА — на 50 %, 30ХГС — на 60 %, 18ХНВА — на 12 % (см. рис. 3).

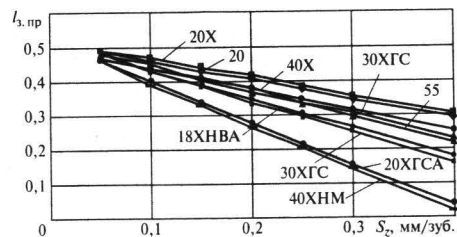


Рис. 3. Зависимость изменения $l_{3,пр}$ от подачи S_z и обрабатываемого материала при фрезеровании стали 45 для 10-го КТ ($D_{фр} = 200$ мм; $z = 20$; $B = 120$ мм; $v = 150$ м/мин)

Из условия (5) очевидно, что на погрешность $\Delta_{z\Sigma}$ динамической настройки кроме подачи S_z и глубины резания t влияет скорость v резания. На рис. 4 представлены зависимости изменения $l_{3,пр}$ от подачи S_z и скорости резания $v = 100$; 150; 300 и 450 м/мин при торцевом фрезеровании Стали 45, обеспечивающем 10-й КТ: $l_{3,пр} = f(S_z, \Delta_{zпр}, v)$, анализ которых показал, что $l_{3,пр}$ уменьшается с увеличением S_z и увеличением скорости v резания. Так, при подаче $S_z = 0,1$ мм/зуб по сравнению с обработкой со скоростью $v = 100$ м/мин при $v = 150$ м/мин величина $l_{3,пр}$ уменьшается на 4 %; при $v = 300$ м/мин — на 14 %; при $v = 450$ м/мин — на 18 %.

Из выражения (5) видно, что на погрешность $\Delta_{z\Sigma}$ кроме S_z, t, v и свойств обрабатываемого материала влияет податливость C_z технологической системы. На рис. 5 представлены зависимости изменения $l_{3,пр}$ от подачи S_z и податливости C_z технологической системы.

Таблица 4

Значения механических показателей сталей разных марок			
Стали	Марка	HB, Па	σ_B , МПа
Углеродистые качественные	20	1630	412
	45	1970	598
	55	2100	640
Хромистые	20Х	2260	786
	40Х	2820	980
Хромокремнемарганцевые	20ХГСА	2260	786
	30ХГС	3110	1080
Хромоникельвольфрамовые	18ХНВА	2820	980
Хромоникелевые	40ХНМ	3110	1080

Таблица 5

Значения предельных и допустимых длин площадки износа задней поверхности зубьев торцевых фрез в зависимости от стали, режимов и точности обработки стали 45 ($D_{фр} = 20$ мм; $z = 20$; $B = 120$ мм)

Стадия обработки	t , мм	S_z , мм/зуб	v , м/мин	КТ	$l_{3,пр}$, мм	$l_{3,доп}$, мм
Отделочная	1	0,07	406	8	0,13	0,6
	2	0,04	504	9	0,23	
	1	0,07	406	9	0,26	
Чистовая	2	0,09	348	10	0,34	1,4
	1	0,13	306	10	0,42	
	4	0,08	353	11	0,47	
	2	0,15	276	11	0,57	
Получистовая	8	0,10	307	12	0,61	1,4
	4	0,13	283	12	0,87	
	8	0,10	307	13	0,97	
	2	0,16	268	13	1,07	
	4	0,13	283	13	1,23	
	8	0,13	273	13	1,00	
Черновая	4	0,16	258	13	1,37	1,4
	8	0,13	273	14	1,55	

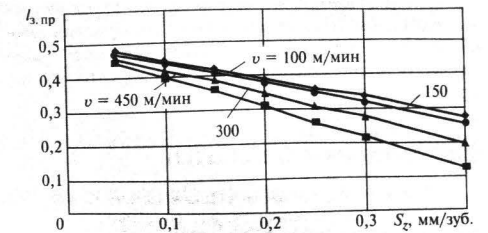


Рис. 4. Зависимость изменения $l_{3,пр}$ от подачи S_z и скоростей v резания при фрезеровании стали 45 для 10-го КТ ($D_{фр} = 200$ мм; $z = 20$; $B = 120$ мм; $t = 1$ мм)

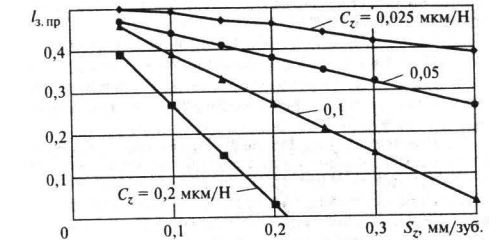


Рис. 5. Зависимость изменения $l_{3,пр}$ от подачи S_z и податливостей C_z технологической системы при фрезеровании стали 45 для 10-го КТ ($D_{фр} = 200$ мм; $z = 20$; $B = 120$ мм; $v = 150$ м/мин; $t = 1$ мм)

ской системы при обработке стали 45, обеспечивающей 10-й КТ: $l_{3,пр} = f(S_z, \Delta_{zпр}, v, C_z)$, анализ которых показал, что $l_{3,пр}$ уменьшается с увеличением S_z и C_z . Так, при $S_z = 0,1$ мм/зуб по сравнению с обработкой с податливостью технологической системы $C_z = 0,025$ мкН/Н допустимый износ снижается при $C_z = 0,2$ мкН/Н — на 200 %; при $C_z = 0,1$ мкН/Н — на 50 %; при $C_z = 0,05$ мкН/Н — на 18 %.

Для примера в табл. 5 приведены результаты расчета $l_{3,пр}$ для разных видов обработки и режимов резания [19] стали 45, обеспечивающих соответствующую точность обработки при ширине фрезерования $B = 120$ мм. Нормативные значения допустимых износов, обуславливающих работоспособность инструмента в зависимости от вида обработки, обрабатываемого материала и материала режущего инструмента приведены в работе [19] (табл. 5).

Таким образом, установлено влияние таких параметров фрезерования, как t и v , а также механических свойств обрабатываемого материала и податливости технологической системы на износ фрезы, который определяет точность обработки. Определено, что большее влияние оказывает подача. Кроме того, предельный износ инструмента,

превышение которого снижает точность обработки, наступает раньше допустимого нормативного износа, что необходимо учитывать при проектировании технологических переходов при торцевом фрезеровании.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Гузев В. И., Пименов Д. Ю.** Математическое моделирование силы резания при торцевом фрезеровании // Вестник машиностроения. 2011. № 9. С. 70–74.
2. **Гузев В. И., Пименов Д. Ю.** Нестационарность напряженного состояния на задней поверхности зуба фрезы, обусловленная деформациями в зоне сдвига // Технология машиностроения. 2010. № 7. С. 20–24.
3. **Пименов Д. Ю.** Разработка модели эпюры напряжений на задней поверхности зуба фрезы // Технология машиностроения. 2010. № 1. С. 48–52.
4. **Пименов Д. Ю., Гузев В. И., Кошин А. А.** Анализ напряжений на задней поверхности зуба торцовой фрезы в зависимости от режимов резания // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 1(285). С. 51–58.
5. **Пименов Д. Ю., Гузев В. И., Кошин А. А.** Влияние режимов резания на напряжения на задней поверхности инструмента // СТИН. 2011. № 8. С. 26–33.
6. **Пименов Д. Ю., Гузев В. И., Кошин А. А.** Исследование напряжений на задней поверхности зуба торцовой фрезы // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2011. № 4. С. 136–146.
7. **Пименов Д. Ю., Гузев В. И., Кошин А. А.** Определение сил, действующих на задней поверхности режущей части инструмента // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 2/2(286). С. 80–90.
8. **Пименов Д. Ю., Гузев В. И., Кошин А. А.** Математическое моделирование упругих перемещений технологической системы при торцевом фрезеровании с уче-

том износа инструмента // Вестник машиностроения. 2011. № 11. С. 69–73.

9. **Пименов Д. Ю.** Экспериментальное определение податливостей элементов технологической системы фрезерного станка ГФ2171С5 // Металлообработка. 2009. № 6(54). С. 54–57.

10. **Пименов Д. Ю., Гузев В. И.** Расчет податливости узла фреза—оправка при обработке торцевым фрезерованием // Технология машиностроения. 2011. № 12. С. 10–13.

11. **Пименов Д. Ю., Гузев В. И., Кошин А. А.** Расчет величины смещения фрезы относительно заготовки, при которой обеспечивается постоянное число зубьев фрезы, участвующих в работе // Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 4. С. 6–10.

12. **Пименов Д. Ю., Гузев В. И., Кошин А. А.** Влияние величины смещения фрезы относительно заготовки на силу резания при торцевом фрезеровании // Технология машиностроения. 2011. № 9. С. 15–18.

13. **Корсаков В. С.** Основы технологии машиностроения. М.: Высшая школа, 1974. 336 с.

14. **Косилова А. Г., Мещерский Р. К., Калинин М. А.** Точность обработки, заготовки и припуски в машиностроении. М.: Машиностроение, 1976. 288 с.

15. **Медведев Д. Д.** Автоматизированное управление процессами обработки резанием. М.: Машиностроение, 1980. 140 с.

16. **Орлова Н. Ю.** Повышение производительности торцевого фрезерования на стадии проектирования управляющих программ обработки деталей на станках с ЧПУ: Дис. ... канд. техн. наук. Челябинск. 1999. 205 с.

17. **Соколовский А. Т.** Жесткость в технологии машиностроения. М.: Машгиз, 1956. 396 с.

18. **Косилова А. Г.** Справочник технолога-машиностроителя. Т. 1 / Под редакцией А. Г. Косиловой, Р. К. Верещака. М.: Машиностроение, 1985. 656 с.

19. **Гузев В. И.** Режимы резания для токарных и фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением: Справочник / Под ред. В. И. Гузеева. М.: Машиностроение, 2005. 368 с.

Вниманию авторов

Не допускается предлагать к публикации уже опубликованные или намеченные к публикации в других журналах материалы.

Статьи в редакцию можно присылать на e-mail: vestmash@mashin.ru. В случае пересылки статьи почтой кроме текста, напечатанного на белой бумаге формата А4 на одной стороне листа через 1,5–2 интервала 14-м кеглем, необходимо прикладывать электронную версию (шрифт Times New Roman в Microsoft Word, 14 кегль, расстояние между строк 1,5).

К статье прилагаются:

1) акт экспертной комиссии, подтверждающий, что статья не содержит материалов, входящих в перечень сведений, отнесенных к государственной тайне Указом Президента РФ № 1203 от 30.11.1995 г., и может быть опубликована в открытой печати;

2) аннотация (1–3 предложения) и ключевые слова;

3) сведения об авторах (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученая степень, адрес, e-mail, телефон). Объем статьи не должен превышать 20 страниц (с рисунками и таблицами). Все страницы должны быть пронумерованы. Рисунки и таблицы давать после текста.

Представляя статью в редакцию для публикации, авторы выражают согласие с тем, что:

1) статья может быть переведена и опубликована на английском языке;

2) после публикации в журнале материал может быть размещен в Интернете;

3) авторский гонорар за публикацию статьи не выплачивается.

Редакция оставляет за собой право сообщать автору о результатах рецензирования без предоставления рецензии.

Представленные в редакцию материалы обратно не высылаются.

Минимальный срок публикации — 4 месяца со дня предоставления рукописи в редакцию при соблюдении всех изложенных выше требований (обусловлен технологическим процессом).