

УДК 621.914.1:621.01–229.3

EDN: WONUKP

Пикалова М. В., Желтобрюхова О. Е., Онопченко В. Н.Донбасский государственный технический университет***E-mail: pikalovamarina@yandex.ru*

АЛГОРИТМ КОРРЕКТИРОВКИ РЕЖИМОВ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПЛОСКОСТЕЙ С УЧЕТОМ ТОЧНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В статье представлена последовательность этапов корректировки режимов цилиндрического и торцевого фрезерования. Алгоритм корректировки режимов резания рассмотрен для случая изготовления образцов-изделий, рекомендуемых стандартами для оценки точности и жесткости фрезерных станков.

Ключевые слова: фрезерование плоскостей, станочное приспособление, режимы фрезерования, корректировка режимов резания.

Постановка цели исследования. Применение фрезерных станочных приспособлений с параметрами силового замыкания, обеспечивающими минимизацию погрешности продольного профиля обработанной поверхности, позволяет рассматривать задачу корректировки режимов резания с целью повышения производительности обработки. На начальном этапе технологического проектирования определение режимов резания выполняется на основе справочной и нормативной литературы [1–4]. Для дальнейшего учета свойств силового замыкания фрезерного станочного приспособления выполняется математическое и физическое моделирование системы, на основе которого определяются параметры, обеспечивающие минимизацию погрешности обработки [5]. Основным положением для корректировки режимов резания является возможность снижения погрешности формы обработанной поверхности до 60 % от исходной.

В рамках научно-исследовательской работы «Разработка системы опорных и зажимных элементов фрезерных приспособлений на основе моделирования силового замыкания» ведется разработка методики корректировки режимов резания с учетом рациональных параметров станочного приспособления.

Целью данной работы является формирование последовательности этапов определе-

ния режимов фрезерования на примере обработки плоскостей образцов-изделий, параметры которых оговорены в ГОСТ 17734-88, 9726-89, 18101-85, 26016-83, 8-82, определяющих порядок оценки точности и жесткости фрезерных металлорежущих станков.

Алгоритм корректировки режимов фрезерования представлен в виде следующей последовательности этапов.

На первом этапе задаются параметры обработанной поверхности, учитываемые при расчете сил резания: ширина поверхности B , обрабатываемый материал (временное сопротивление). Дополнительно также задается допуск на выполняемый технологический размер. Для образца-изделия по данным стандартов принимаем ширину обрабатываемой поверхности кортежем значений {400, 200, 100, 50}, мм. Материал, задаваемый стандартами — чугун с временным сопротивлением 250 МПа (например, марок СЧ25, ЧЮ7Х2) и сталь с временным сопротивлением 450 МПа (например, марок 25, 10Г2, А12).

Допуск на обработку образца-изделия определяем относительно требований к прямолинейности обработанной поверхности, которые представлены в таблице 1. При этом рассматриваем этот допуск как часть общего допуска на обработку в зависимости от характера обработки. При чистой высокоточной обработке допуск прямолинейности принимаем равным 60 %

МАШИНОСТРОЕНИЕ

от допуска на обработку, при полустачковой обработке — 30 %, при черновой обработке — 15 %. Результаты расчета допуска на обработку представлены в таблице 2 для чистовой высокоточной обработки.

Следует отметить, что уровень полученных в таблицах 1 и 2 допусков соответствует по ГОСТ 8-82 и 25346-89 квалитетам точности IT4÷IT5, что значительно превышает уровень средней экономической точности методов фрезерования, который находится в диапазоне IT9÷IT12.

Таблица 1

Допуски прямолинейности размеров образцов-изделий

Степень точности станка	Ширина обрабатываемой поверхности	Допуск прямолинейности*, мкм
Н	50	6 / 4 / 1,875
	100	16 / 8 / 3,75
	200	20 / 12 / 8
	400	25 / 16 / 12
П	50	4 / 2,5 / 1,25
	100	10 / 5 / 2,5
	200	12 / 8 / 5
	400	16 / 10 / 8

*Через знак «/» в пересчете от значений, заданных по ГОСТ 17734-88 / 9726-89 / 18101-85.

Таблица 2

Технологические допуски размеров образцов-изделий

Степень точности станка	Ширина обрабатываемой поверхности	Технологический допуск*, мкм
Н	50	10 / 6,5 / 3,175
	100	26 / 13 / 6,25
	200	33 / 20 / 13
	400	41 / 26 / 12
П	50	6 / 4 / 2
	100	16 / 8 / 4
	200	20 / 13 / 6
	400	26 / 16 / 13

*Через знак «/» расчет в пересчете от значений таблицы 6, заданных по ГОСТ 17734-88 / 9726-89 / 18101-85.

Это означает, что окончательная обработка образца-изделия изначально предполагается в особых условиях, обеспечивающих повышенную точность. В частности, существенным из таких условий является ограничение по жесткости технологической системы механической обработки, заключающееся в том, что возникающая сила резания не должна вызывать упругую деформацию системы, большую чем допуск формы поверхности. Это ограничение оцениваем на следующем этапе.

На втором этапе определяем величину предельно допустимой силы резания на основе формулы для определения жесткости упругой системы:

$$J_{ТСМО} = \frac{P_{REZp}}{\Delta\phi}, \quad (1)$$

где P_{REZp} — составляющая силы резания, приложенная в направлении выдерживаемого размера, Н;

$\Delta\phi$ — погрешность формы выдерживаемого размера, сформированная под действием составляющей P_{REZp} , мм.

На основе формулы (1) получаем выражение для допустимой по точности обработки силы резания P_{REZp} (в первом приложении считая, что она действует в направлении выдерживаемого размера):

$$[P_{REZp}] = J_{ТСМО} \cdot [\Delta\phi], \quad (2)$$

где $J_{ТСМО}$ — жесткость технологической системы (в первом приближении принимаем как жесткость станка), определяемая по формуле (1) по данным стандарта по допустимой деформации, Н/мм;

$[\Delta\phi]$ — допустимая погрешность формы, в первом приближении отклонение от прямолинейности (табл. 1), мм.

Результаты расчета допустимой силы резания представлены в таблице 3 для наименьшего допустимого значения, получаемого при наименьшем допуске прямолинейности (табл. 1) и наименьшей жесткости техноло-

гической системы 15625 Н/мм, определенной по данным стандартов.

Результаты таблицы 3 показывают, что для достижения точности обработки в соответствии с требованиями стандарта (табл. 1) допустимая сила резания имеет малую величину.

Поэтому в таблице 3 даны результаты дополнительного расчета допустимой силы для средней экономической точности (9-й квалитет для чистового фрезерования и 12-й — для чернового).

На третьем этапе определяем режимы резания, характеризующие площадь поперечного сечения снимаемого припуска. Укрупненно при цилиндрическом фрезеровании за такую площадь можно принять произведение подачи на зуб s_z на ширину фрезерования B , а при торцевом фрезеровании — произведение подачи на зуб на глубину фрезерования t :

$$F_u \approx s_z \cdot B, \text{ мм}^2; \quad (3)$$

$$F_m \approx s_z \cdot t, \text{ мм}^2, \quad (4)$$

где F_u — площадь поперечного сечения срезаемого припуска при цилиндрическом фрезеровании;

F_m — площадь поперечного сечения срезаемого припуска при торцевом фрезеровании.

Для определения величины поперечного сечения срезаемого припуска используем значение допускаемой силы резания $[P_{REZp}]$ и временного сопротивления материала заготовки s_B . Для расчета исходим из формулы определения предела прочности на разрыв, получаемого при испытании образцов:

$$s_B = P_{\max} / F_o, \text{ МПа}, \quad (5)$$

где P_{\max} — максимальная нагрузка, при которой происходит разрыв образца, Н, принимаем равной $[P_{REZp}]$;

F_o — начальное поперечное сечение образца, мм², принимаем равным F_u или F_m .

Преобразуя (5), получаем:

$$F_u = [P_{REZp}] / s_B, \text{ мм}^2; \quad (6)$$

$$F_m = [P_{REZp}] / s_B, \text{ мм}^2. \quad (7)$$

Таблица 3

Значения допустимой силы резания

Степень точности станка	Ширина обрабатываемой поверхности	Допустимая сила резания $[P_{REZp}]$, Н
Н	50	29 / 968 / 3906*
	100	58 / 1359 / 5468
	200	125 / 1796 / 7187
	400	187 / 2187 / 8906
П	50 // 100**	19,5 // 39**
	200 // 400	78 // 125

*Через знак «/» указаны силы, полученные для допусков по 9-му квалитету в порядке возрастания размера (0,062; 0,087; 0,115; 0,14 мм) и 12-му квалитету (0,25; 0,35; 0,46; 0,57 мм); **соответствие через «//» по колонкам.

По формулам (6) и (7) выполним расчет величины сечения срезаемого припуска при обработке чугуна ($s_B = 250$ МПа) и стали ($s_B = 450$ МПа), применяемых для изготовления образцов-изделий (табл. 4).

Ширина обработки B является одной из исходных данных (см. первый этап), глубину резания t можно оценить по данным [6] (лежит в интервале от 1 до 10 мм). Тогда из формул (3) и (4) можно определить подачу на зуб фрезы. Результаты расчета представлены в таблице 5.

Сравнение значений, полученных расчетом (табл. 5) и выбираемых по рекомендациям справочника, показывает, что между ними имеются следующие существенные отличия, требующие разъяснения в дальнейших исследованиях:

- величины подачи на зуб, лежащие в области значения 0,001÷0,01 мм/зуб (а это большинство значений в таблице 5), не могут быть рекомендованы по причине того, что при величине глубины меньше 0,01 мм произойдет пластическое деформирование обработанной поверхности без стружкообразования;
- величины подачи на зуб более 1 мм, которые в основном получены для торцевого фрезерования, также выходят за пределы рекомендованных, и требуется анализ на предмет их уменьшения, например, путем увеличения глубины резания.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Для дальнейших расчетов из полученных в таблице 5 значений подачи на зуб вытираем те, которые лежат в области рекомендованных справочником для черного ци-

линдрического фрезерования (по 12-му качеству) и чистового торцового фрезерования (по 9-му качеству) (табл. 6).

Таблица 4

Значения площади сечения припуска при обработке чугуна и стали

Степень точности станка	Ширина обрабатываемой поверхности	Допустимая сила резания [P_{REZp}], Н	Сечение припуска (F_u или F_T), мм ²
Н	50	29 / 968 / 3906*	0,116 / 3,872 / 15,624**
	100	58 / 1359 / 5468	0,232 / 5,436 / 21,872
	200	125 / 1796 / 7187	0,5 / 7,184 / 28,748
	400	187 / 2187 / 8906	0,748 / 8,748 / 35,624
П	50 // 100 // 200 // 400***	19,5 // 39 // 78 // 125	0,078 // 0,156 // 0,312 // 0,5

*Через знак «/» указаны силы, полученные для допусков по 9-му качеству в порядке возрастания размера (0,062; 0,087; 0,115; 0,14 мм) и 12-му качеству (0,25; 0,35; 0,46; 0,57 мм); **для обработки чугуна значения сечения припуска через знак «/» соответствуют колонке с допустимой силой резания, для стали их следует умножить на 0,55; ***через знак «//» — соответствие значений по колонкам.

Таблица 5

Значения подачи на зуб фрезы для цилиндрического и торцового фрезерования

Степень точности станка	Ширина обрабатываемой поверхности, B , мм	Глубина резания*, t , мм	Подача на зуб***, мм ²	
			$s_z = F_u / B$ (цилиндрическое фрезерование)	$s_z = F_m / t$ (торцовое фрезерование)
Н	50	1,7	0,002 / 0,077 / 0,312**	0,068 / 2,27 / 9,19**
	100	2,5	0,002 / 0,054 / 0,218	0,092 / 2,18 / 8,74
	200	5	0,002 / 0,035 / 0,143	0,1 / 1,43 / 5,74
	400	10	0,001 / 0,021 / 0,089	0,074 / 0,87 / 3,56
П	50 // 100****	1,7 // 2,5	0,001 // 0,001	0,045 // 0,062
	200 // 400	5 // 10	0,001 // 0,001	0,062 // 0,05

*Глубины резания задавались по данным [6] с наибольшей величиной 10 мм для наибольшей ширины обработки, затем с уменьшением ширины обработки в 2 раза, соответственно, в 2 раза уменьшалась и глубина резания; **через знак «/» указаны значения, полученные для сечения припуска соответственно таблице 4; ***значения приведены для обработки чугуна, для стали их следует умножить на 0,55; ****через знак «//» — соответствие значений по колонкам.

Таблица 6

Рациональные параметры для цилиндрического и торцового фрезерования

Степень точности станка	Ширина обрабатываемой поверхности, B , мм	Глубина резания*, t , мм	Подача на зуб***, мм ²	
			$s_z = F_u / B$ (черновое цилиндрическое фрезерование)	$s_z = F_m / t$ (чистовое торцовое фрезерование)
Н	50	1,7 / 9,68**	0,312	2,27 / 0,4**
	100	2,5 / 9,88	0,218	2,18 / 0,55
	200	5 / 13,06	0,143	1,43 / 0,55
	400	10 / 14,58	0,089	0,87 / 0,6

*Скорректированная глубина резания, соответствующая уточненному значению подачи на зуб; **через знак «/» указаны исходное (табл. 5) и скорректированное значения глубины резания по скорректированной подаче на зуб; ***значения приведены для обработки чугуна, для стали их следует умножить на 0,55.

Уменьшение подачи на зуб для торцевого фрезерования приводим к рекомендуемым значениям путем увеличения глубины резания, при этом стремимся сохранить величину поперечного сечения среза F_u и F_m .

На четвертом этапе переходим к определению скорости резания для выбранных случаев обработки (табл. 6). Рассмотрим составляющие формулы для определения скорости резания при фрезеровании, рекомендованной справочником [1, 2] (табл. 7):

$$v = \frac{C_v \cdot D^{q_v}}{T^{m_v} \cdot t^{x_v} \cdot s_z^{y_v} \cdot B^{u_v} \cdot z^{p_v}} \cdot K_v, \quad (8)$$

где K_v — поправочный коэффициент на скорость резания, учитывающий фактические условия резания, определяемый по формуле

$$K_v = K_{M_v} \cdot K_{n_v} \cdot K_{u_v}, \quad (9)$$

где K_{M_v} — коэффициент, учитывающий качество обрабатываемого материала, который, в свою очередь, определяется по формулам:

$$\text{для стали } K_{M_v} = K_T \cdot \left(\frac{750}{\sigma_B} \right)^{n_v}, \quad (10)$$

$$\text{для серого чугуна } K_{M_v} = \left(\frac{190}{HB} \right)^{n_v}, \quad (11)$$

где K_T — коэффициент, учитывающий сочетание материалов заготовки и инструмента (для обработки углеродистых сталей $K_T=1$);

n_v — показатель степени, учитывающий сочетание вида обработки и материала инструмента (для фрезерования твердым сплавом $n_v=1$);

HB — твердость чугуна (характерно, ГОСТ на образцы-изделия задает не твердость, а предел прочности чугуна);

K_{n_v} — коэффициент, учитывающий влияние состояния поверхности заготовки, а именно наличие или отсутствие корки (при отсутствии корки $K_{n_v} = 1$);

K_{u_v} — коэффициент, уточняющий дополнительно к K_T влияние конкретного

инструментального материала в сочетании с материалом заготовки (изменяется в широких пределах от 0,35 до 1,25, равный 1 при работе инструментальными материалами марок Т15К6, ВК8 по стали и ВК6 по чугуну, а также в обоих случаях Р6М5);

C_v — эмпирический коэффициент, меняющийся на порядок между инструментом из твердого сплава и быстрорежущей стали (табл. 7);

$m_v, x_v, y_v, u_v, p_v, q_v$ — степенные коэффициенты (табл. 7) соответственно при T, t, s_z, B, z, D , где T — стойкость режущего инструмента в минутах (среднее значение — 180 минут), z — число зубьев фрезы (среднее значение 11 зубьев).

В таблице 8 приведены результаты расчета скорости резания по формуле (8) и данным таблицы 7.

Результаты расчета скорости резания соответствуют рекомендациям нормативов режимов резания для серийного производства [4].

На пятом этапе выполняем проверку назначенных режимов резания. Так как поперечное сечение припуска определялось исходя из силы резания, допустимой по технологической жесткости (табл. 3), для проверки выполним расчет силы резания и сравним его со значением допустимой силы (табл. 9). Учитываем при этом, что в направлении формируемой плоскости при торцевом фрезеровании действует составляющая P_x , а при цилиндрическом — P_v [1, 2].

В процессе проверки по допустимой силе резания добиваемся того, чтобы полученное значение не превышало допустимое по точности обработки [P_{REZp}]. При этом возможна дополнительная корректировка режимов. Так, для чернового цилиндрического фрезерования полученные значения силы резания кратно меньше допустимых, что позволяет оценить допустимое количество зубьев, одновременно находящихся в работе. Для чистового торцевого фрезерования возникает необходимость скорректировать глубину резания в сторону уменьшения (табл. 9).

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Таблица 7

Значения расчетных коэффициентов формулы скорости резания для вариантов фрезерования плоскостей образца-изделия (твердым сплавом / быстрорежущей сталью)

Шифр варианта расчета*	Режим резания			Коэффициенты формулы (8)								
	<i>B</i>	<i>t</i>	<i>s_z</i>	<i>C_v</i>	<i>m_v</i>	<i>x_v</i>	<i>y_v</i>	<i>u_v</i>	<i>p_v</i>	<i>q_v</i>	<i>K_{Mv}**</i>	
Цилиндрическое фрезерование конструкционной стали (<i>S_B</i> = 450 МПа)												
ЦФКСТС1*	50	1,7	0,312	616 / 35,4	0,33	0,19 / 0,3	0,28 / 0,4	0,08 / 0,1	0,1	0,17 / 0,45	1,66 (1,26) / 1,66 (1,26)	
ЦФКСТС2	100	2,5	0,218	700 / 35,4								
ЦФКСТС3	200	5	0,143									
ЦФКСТС4	400	10	0,089									
Цилиндрическое фрезерование серого чугуна (<i>S_B</i> = 250 МПа, НВ150)												
ЦФСЧТС1	50	1,7	0,312	588 / 27	0,42 / 0,25	0,13 / 0,5	0,47 / 0,6	0,23 / 0,3	0,14 / 0,3	0,37 / 0,7		
ЦФСЧТС2	100	2,5	0,218	750 / 27		0,5	0,4 / 0,5					0,19 / 0,2
ЦФСЧТС3	200	5	0,143	1120 /								
ЦФСЧТС4	400	10	0,089	57,6								
Торцовое фрезерование конструкционной стали (<i>S_B</i> = 450 МПа)												
ТФКСТС1	50	9,68	0,4	332 / 41	0,2	0,1	0,4	0,2 / 0,15	0	0,2 / 0,25		
ТФКСТС2	100	9,88	0,55									
ТФКСТС3	200	13,06	0,55									
ТФКСТС4	400	14,58	0,6									
Торцовое фрезерование серого чугуна (<i>S_B</i> = 250 МПа, НВ150)												
ТФСЧТС1	50	9,68	0,4	445 / 42	0,32 / 0,15	0,15 / 0,1	0,35 / 0,4	0,2 / 0,1	0 / 0,1	0,2		
ТФСЧТС2	100	9,88	0,55									
ТФСЧТС2	200	13,06	0,55									
ТФСЧТС2	400	14,58	0,6									

*Расшифровка шифра слева направо по порядку: Т — торцовое, Ц — цилиндрическое, Ф — фрезерование, СЧ — серый чугун, СТ — сталь, ТС — твердый сплав, 1 — порядковая цифра; **значения в скобках указаны для обработки чугуна.

Таблица 8

Результаты расчета скорости резания для фрезерования плоскостей образца-изделия

Шифр варианта расчета*	Режим резания			Скорость резания <i>v</i> , м/мин**	Шифр варианта расчета	Режим резания			Скорость резания <i>v</i> , м/мин
	<i>B</i>	<i>t</i>	<i>s_z</i>			<i>B</i>	<i>t</i>	<i>s_z</i>	
ЦФКСТС1	50	1,7	0,312	285 / 60*	ТФКСТС1	50	9,68	0,4	255 / 35
ЦФКСТС2	100	2,5	0,218	265 / 50	ТФКСТС2	100	9,88	0,55	195 / 30
ЦФКСТС3	200	5	0,143	215 / 50	ТФКСТС3	200	13,06	0,55	165 / 25
ЦФКСТС4	400	10	0,089	180 / 45	ТФКСТС4	400	14,58	0,6	135 / 20
ЦФСЧТС1	50	1,7	0,312	210 / 65	ТФСЧТС1	50	9,68	0,4	120 / 35
ЦФСЧТС2	100	2,5	0,218	200 / 55	ТФСЧТС2	100	9,88	0,55	90 / 30
ЦФСЧТС3	200	5	0,143	135 / 40	ТФСЧТС2	200	13,06	0,55	75 / 25
ЦФСЧТС4	400	10	0,089	100 / 25	ТФСЧТС2	400	14,58	0,6	65 / 24

*Шифр в соответствии с таблицей 7; **через знак «/» указана скорость резания для твердого сплава и быстрорежущей стали.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Таблица 9

Результаты расчета силы резания для фрезерования плоскостей образца-изделия твердым сплавом

Шифр варианта расчета*	Режим резания				Силы резания*, Н			
	B , мм	t , мм	s_z , мм/зуб	v , м/мин	$[P_{REZp}]$	P_z	P_x	P_v
Цилиндрическое фрезерование (черновое) конструкционной стали ($s_B=450$ МПа)								
ЦФКСТС1	50	1,7	0,312	285	3906	525***	75	470
ЦФКСТС2	100	2,5	0,218	265	5468	1130	170	1000
ЦФКСТС3	200	5	0,143	215	7187	1515	225	1360
ЦФКСТС4	400	10	0,089	180	8906	1955	290	1755
Цилиндрическое фрезерование (черновое) серого чугуна ($s_B=250$ МПа, HB150)								
ЦФСЧТС1	50	1,7	0,312	210	3906	235	35	210
ЦФСЧТС2	100	2,5	0,218	200	5468	495	75	445
ЦФСЧТС3	200	5	0,143	135	7187	660	95	595
ЦФСЧТС4	400	10	0,089	100	8906	840	125	760
Торцовое фрезерование (чистовое) конструкционной стали ($s_B=450$ МПа)								
ТФКСТС1	50	9,68	0,4	255	968	865 (5)**	475	820
ТФКСТС2	100	9,88	0,55	195	1359	1245 (2,5)	685	1180
ТФКСТС3	200	13,06	0,55	165	1796	1545 (3)	850	1465
ТФКСТС4	400	14,58	0,6	135	2187	2000 (3,5)	1100	1900
Торцовое фрезерование (чистовое) серого чугуна ($s_B=250$ МПа, HB150)								
ТФСЧТС1	50	9,68	0,4	120	968	855	465	810
ТФСЧТС2	100	9,88	0,55	90	1359	1295 (5,5)	714	1235
ТФСЧТС2	200	13,06	0,55	75	1796	1715 (7,5)	945	1631
ТФСЧТС2	400	14,58	0,6	65	2187	2158 (9)	1185	2050

*Расчет силы резания выполнен по рекомендациям справочника, полученные значения округлены для удобочитаемости и по максимальным значениям; **в скобках указана скорректированная глубина резания для получения значения силы резания меньше допустимого $[P_{REZp}]$ (для исходного значения глубины резания силы резания кратно превышает допустимую), скорость резания не изменяем; ***значения получены для условия работы одного зуба по полному деформируемому сечению F_u или F_m на длине L_{chip} и могут быть скорректированы при учете количества одновременно работающих зубьев и фактической площади сечения на каждом зубе.

На шестом этапе для полученных режимов резания (табл. 10) оцениваем достижимую точность обработки, исходя из минимизации погрешности формы на 30 и 60 % за счет подбора рациональных параметров станочного приспособления [5].

Данные по технологическим допускам, приведенные в таблице 10, показывают, что уменьшение технологического допуска при фрезеровании на 60 % соответствует повышению точности обработки на 2 качества.

На седьмом этапе требуется определить уровень повышения жесткости технологической системы. Для этого используем

формулу (1). Результаты представлены в таблице 11.

Результаты пересчета исходной жесткости в таблице 11 являются дополнительной проверкой выполненных расчетов, так как они показывают отклонение от принятой ранее минимальной жесткости технологической системы, равной 15625 Н/мм, для расчетов по формуле (2), и это отклонение незначительно. Также можно заметить, что расчет показывает повышение жесткости технологической системы на 40 % (при повышении точности обработки на 30 %) и на 250 % (при повышении точности обработки на 60 %).

МАШИНОСТРОЕНИЕ

При выборе справочных данных подача на зуб фрезы при работе на станках повышенной жесткости может быть увеличена на 25÷50 %. При этом другие режимы резания практически не подлежат изменению: ширина фрезерования определяется обрабатываемой поверхностью и определяет выбор диаметра фрезы, глубина фрезерования существенно зависит от операционной структуры технологического процесса (т. е. изменение глубины резания приводит к

изменению всего технологического процесса).

Дальнейший алгоритм расчета для увеличенной подачи на зуб выполняется, начиная со *второго этапа по четвертый этап*.

После определения скорректированной подачи на зуб необходимо выполнить оценку производительности обработки. Снижение технологического времени и повышение производительности обработки требует отдельного анализа.

Таблица 10

Принятые режимы резания

Шифр варианта расчета*	Режим резания*					Допуск на обработку, мм		
	B , мм	t , мм	s_z , мм/зуб	v , м/мин	n , об/мин	исходный (табл. 3)	меньше на 30 %	меньше на 60 %
Цилиндрическое фрезерование (черновое) конструкционной стали ($s_B = 450$ МПа)								
ЦФКСТС1	50	1,7	0,312	285	900**	0,25	0,175 (IT11)***	0,1 (IT10)
ЦФКСТС2	100	2,5	0,218	265	850	0,35	0,245	0,14 (IT10)
ЦФКСТС3	200	5	0,143	215	680	0,46	0,322	0,184 (IT10)
ЦФКСТС4	400	10	0,089	180	570	0,57	0,399	0,228
Цилиндрическое фрезерование (черновое) серого чугуна ($s_B = 250$ МПа, HB150)								
ЦФСЧТС1	50	1,7	0,312	210	670	0,25	0,175	0,1
ЦФСЧТС2	100	2,5	0,218	200	630	0,35	0,245	0,14
ЦФСЧТС3	200	5	0,143	135	430	0,46	0,322	0,184
ЦФСЧТС4	400	10	0,089	100	315	0,57	0,399	0,228
Торцовое фрезерование (чистовое) конструкционной стали ($s_B = 450$ МПа)								
ТФКСТС1	50	5	0,4	255	810	0,062	0,043	0,024 (IT7)
ТФКСТС2	100	2,5	0,55	195	620	0,087	0,06	0,034 (IT7)
ТФКСТС3	200	3	0,55	165	525	0,115	0,08 (IT8)	0,046 (IT7)
ТФКСТС4	400	3,5	0,6	135	430	0,14	0,098	0,056 (IT7)
Торцовое фрезерование (чистовое) серого чугуна ($s_B = 250$ МПа, HB150)								
ТФСЧТС1	50	9,68	0,4	120	380	0,062	0,043	0,024
ТФСЧТС2	100	9,88	0,55	90	285	0,087	0,06	0,034
ТФСЧТС2	200	13,06	0,55	75	235	0,115	0,08	0,046
ТФСЧТС2	400	14,58	0,6	65	200	0,14	0,098	0,056

*Для всех режимов резания и видов обработки диаметр фрезы равен 100 мм, число зубьев принято равным 10 шт.; **частоты округлены до величины, кратной пяти; ***в скобках указан соответствующий достижимый квалитет точности.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Таблица 11

Оценка уровня повышения жесткости технологической системы при уменьшении технологического допуска

Шифр варианта расчета	Допуск на обработку, мм			Допустимая сила резания, Н	Жесткость технологической системы, Н/мм		
	исходный (табл. 8)	меньше на 30 %	меньше на 60 %		исходная	«30 %»	«60 %»
Цилиндрическое фрезерование (черновое) конструкционной стали ($S_B = 450$ МПа)							
ЦФКСТС1	0,25	0,175 (IT11)***	0,1 (IT10)	3906	15624	22320	39060
ЦФКСТС2	0,35	0,245	0,14 (IT10)	5468	15623	22318	39057
ЦФКСТС3	0,46	0,322	0,184 (IT10)	7187	15623	22319	39061
ЦФКСТС4	0,57	0,399	0,228	8906			
Цилиндрическое фрезерование (черновое) серого чугуна ($S_B = 250$ МПа, HB150)							
ЦФСЧТС1	0,25	0,175	0,1	3906	15624	22320	39060
ЦФСЧТС2	0,35	0,245	0,14	5468	15622	22318	39057
ЦФСЧТС3	0,46	0,322	0,184	7187	15623	22319	39059
ЦФСЧТС4	0,57	0,399	0,228	8906	15624	22320	39061
Торцовое фрезерование (чистовое) конструкционной стали ($S_B = 450$ МПа)							
ТФКСТС1	0,062	0,043	0,024 (IT7)	968	15612	22511	40333
ТФКСТС2	0,087	0,06	0,034 (IT7)	1359	15620	22650	39970
ТФКСТС3	0,115	0,08 (IT8)	0,046 (IT7)	1796	15617	22450	39043
ТФКСТС4	0,14	0,098	0,056 (IT7)	2187	15621	22316	39053
Торцовое фрезерование (чистовое) серого чугуна ($S_B = 250$ МПа, HB150)							
ТФСЧТС1	0,062	0,043	0,024	968	15612	22511	40333
ТФСЧТС2	0,087	0,06	0,034	1359	15620	22650	39970
ТФСЧТС2	0,115	0,08	0,046	1796	15617	22450	39043
ТФСЧТС2	0,14	0,098	0,056	2187	15621	22316	39053

Выводы:

1. Представленный алгоритм определения режимов резания при цилиндрическом и торцовом фрезеровании плоских поверхностей имеет несколько ступеней их корректировки на основе положения о минимизации погрешности формы обработанной плоской поверхности, которая достигается подбором соответствующих коэффициентов силового замыкания фрезерного станочного приспособления.

2. Использование для анализа положений стандартов по оценке жесткости и точности фрезерных станков, в особенности данных об образцах-изделиях, направлено в перспективе на формирование нормативной базы по корректировке режимов резания.

3. Установлено, что наиболее предпочтительной для корректировки является задача на зуб фрезы.

Список источников

1. *Справочник технолога-машиностроителя : в 2-х т. / А. М. Дальский [и др.]. 5-е изд., испр. М. : Машиностроение, 2003. Т. 2. 944 с. EDN QNAPBT*

2. Справочник технолога-машиностроителя : в 2-х т. / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мащеракова. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1986. Т. 2. 496 с.

3. Общемашиностроительные нормативы режимов резания / А. Д. Локтев [и др.]. М. : Машиностроение, 1991. Т. 1. 640 с. EDN RRRKPOB

4. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках. М. : Машиностроение, 1967. 205 с.

5. Пипкин Ю. В. Обоснование параметров фрезерных приспособлений моделированием силового замыкания : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2020. 21 с.

6. Пипкин Ю. В., Лавренчук К. П. Определение глубины резания предельной по точности фрезерования // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства : сборник тезисов докладов VI международной научно-технической конференции. Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2021. С. 84–87. EDN IQEWEX

© Пикалова М. В., Желтобрюхова О. Е., Онопченко В. Н.

Рекомендована к печати к.э.н., доц., зав. каф. ТОМП ДонГТУ Зинченко А. М., д.т.н., проф. каф. ТМИК ЛГУ им. В. Даля Витренко В. А.

Статья поступила в редакцию 04.12.2024.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Пикалова Марина Васильевна, младший научный сотрудник управления перспективных научных исследований

Донбасский государственный технический университет,

г. Алчевск, Россия,

e-mail: pikalovamarina@yandex.ru

Желтобрюхова Ольга Евгеньевна, старший научный сотрудник управления перспективных научных исследований

Донбасский государственный технический университет,

г. Алчевск, Россия

Онопченко Виктория Николаевна, младший научный сотрудник управления перспективных научных исследований

Донбасский государственный технический университет,

г. Алчевск, Россия

*Pikalova M. V., Zheltobryukhova O. E., Onopchenko V. N. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: pikalovamarina@yandex.ru)

ALGORITHM FOR CORRECTING PLANE MILLING MODES CONSIDERING ACCURACY AND RIGIDITY OF THE TECHNOLOGICAL SYSTEM

The article presents a sequence of stages for correcting the cylindrical and end milling modes. The algorithm for correcting cutting modes is considered for the case of manufacturing sample products recommended by standards for assessing the accuracy and rigidity of milling machines.

Key words: plane milling, workholding fixture, milling modes, cutting mode correcting.

References

1. Handbook of a mechanical engineer : in 2 volumes. [Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya : v 2-h tomah]. Eds. Dal'skij A. M. [et al.]. 5th edition, revised. M. : Mashinostroenie, 2003. Vol. 2. 944 p. EDN QNAPBT (rus)

2. *Handbook of a mechanical engineer : in 2 volumes. [Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya : v 2-h tomah].* Eds. Kosilovoj A. G. i Mashcheryakova R. K. 4th ed., repr. and add. M. : Mashinostroenie, 1986. Vol. 2. 496 p. (rus).

3. Loktev A. D. [et al.] *General machine-building standards of cutting modes [Obshchemashinostroitel'nye normativy rezhimov rezaniya].* M. : Mashinostroenie, 1991. Vol. 1. 640 p. EDN RRRPOB (rus)

4. *General machine-building standards of cutting modes for technical standardization of works on metal-cutting machine tools [Obshchemashinostroitel'nye normativy rezhimov rezaniya dlya tekhnicheskogo normirovaniya rabot na metallovezhushchih stankah].* M. : Mashinostroenie, 1967. 205 p.

5. Pipkin Yu. V. *Justification of parameters of milling fixtures by modeling of force closure : autoref. diss. ... cand. of techn. sciences. [Obosnovanie parametrov frezernyh prispособlenij modelirovaniem silovogo zamykaniya : avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk].* Alchevsk : DonSTU, 2020. 21 p.

6. Pipkin Yu. V., Lavrenchuk K. P. *Determination of the cutting depth limit for milling accuracy [Opredelenie glubiny rezaniya predel'noj po tochnosti frezerovaniya]. Puti sovershenstvovaniya tehnologicheskikh processov i oborudovaniya promyshlennogo proizvodstva : sbornik tezisov dokladov VI mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii.* Alchevsk : DonSTU, 2021. Pp. 84–87. EDN IQEWEX (rus)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pikalova Marina Vasilievna, Junior Researcher of the Advanced Scientific Research Department
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia,
e-mail: pikalovamarina@yandex.ru

Zheltobryukhova Olga Evgenievna, Senior Researcher of the Advanced Scientific Research Department
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Onopchenko Victoriya Nikolaevna, Junior Researcher of the Advanced Scientific Research Department
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia