

ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.914

Ю.Н. ВНУКОВ, д-р техн. наук, **С.И. ДЯДЯ**, канд. техн. наук,
Е.Б. КОЗЛОВА, Запорожжє, Україна

ЭВОЛЮЦИЯ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СИЛ ПРИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ОТ СТАТИЧЕСКИХ К ДИНАМИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ ОБРАБОТКИ (часть 1)

У статті розглянуто еволюцію розвитку досліджень по вивченню статичних сил при циліндричному фрезеруванні. Показано, що формули «статичного вигляду» для розрахунку сил не відображають фізичної сутності процесу різання, тому сучасні розрахунки сил ведуть по «структурним формулам».

Ключові слова: циліндричне фрезерування, статичні сили, процес різання

В статье рассмотрена эволюция развития исследований по изучению статических сил при цилиндрическом фрезеровании. Показано, что формулы «степенного вида» для расчета сил не отражают физической сущности процесса резания, поэтому современные расчеты сил ведут по «структурным формулам».

Ключевые слова: цилиндрическое фрезерование, статические силы, процесс резания

The article describes the evolution of development studies of static forces in a cylindrical milling. It is shown that the formula of "the power of the form" for the calculation of forces does not reflect the physical nature of the cutting process, so modern calculations of forces are on "structural formulas".

Keywords: cylindrical milling, static forces, cutting process

Исследование статических сил при цилиндрическом фрезеровании

В работе инженера Solomona [1] (1928 г.) впервые было представлено аналитическое выражение для затраты энергии при работе цилиндрической фрезы с прямым зубом. По его выводам работа за один оборот фрезы равна:

$$A_n = \frac{2^{k+1}}{k+2} \cdot \lambda_1 \cdot b \cdot t^{\frac{k+2}{2}} \cdot S_n^{k+1} \cdot z^{-k} \cdot D^{\frac{k}{2}}, \quad (1)$$

где D – диаметр фрезы, мм;

λ_1 – постоянная величина, зависящая от обрабатываемого материала и профиля зуба фрезы (переднего угла – γ);

b – ширина фрезерования, мм;

t – глубина фрезерования, мм;

S_n – подача в мм за один оборот фрезы;

z – число зубьев фрезы;

k – показатель степени, постоянный для данного обрабатываемого материала.

В основу вывода было положено переменное удельное давление резания, как функция толщины стружки в данный момент:

$$K_s = \lambda_1 S_e^k = \lambda_1 S_z^k \sin^k \psi, \quad (2)$$

где K_s – удельное давление резания, кг/мм²;
 S_e – толщина стружки в данный момент, мм;
 k – показатель степени, зависящий от сорта обрабатываемого материала (у Solomona $k = -0,28$);

λ_1 – постоянная величина, зависящая от обрабатываемого материала и профиля зуба фрезы (переднего угла – γ);

S_z – подача на зуб, мм/зуб;

ψ – угол, определяющий положение зуба в данный момент.

Переходя к затрате мощности и обозначая через n число оборотов фрезы в минуту, а через $S_{мин}$ минутную подачу Solomona получил:

$$N = \frac{A_n n}{1000 \cdot 60 \cdot 75}, \quad (3)$$

$$N = \frac{2^{k+1}}{k+2} \cdot \frac{n^{-k}}{1000 \cdot 60 \cdot 75} \lambda_1 b t^{\frac{k+2}{2}} S_{мин}^{k+1} z^{-k} D^{-\frac{k}{2}}, \quad (4)$$

При подстановке ($k = -0,28$) выражение для мощности фрезерования будет иметь формулу степенного вида:

$$N = \frac{2^{0,72}}{1,72} \cdot \frac{n^{0,28}}{1000 \cdot 60 \cdot 75} 170 b t^{0,86} S_{мин}^{0,72} z^{-0,28} D^{-0,14}, \quad (5)$$

Удельное давление резания при фрезеровании стали средней твердости было принято:

$$K_s = \frac{170}{S_e^{0,28}}, \quad (6)$$

Выражение (4) дает среднюю затрату мощности для прямого зуба цилиндрической фрезы. А.М. Розенберг в фундаментальной статье [2] «Теория работы цилиндрической фрезы со спиральным зубом» (1933 г.) на базе вышеизложенного подхода Solomona, опубликовал результаты своих теоретических исследований, а в статье [3] «Работа цилиндрической фрезы» (1936 г.) результаты экспериментальных исследований, на основании которых были сделаны следующие важные выводы:

1. Расход мощности при работе цилиндрической фрезы не зависит от угла подъема – β (наклона – ω) спирали зуба.

2. Окружное усилие P_o на одном спиральном зубе фрезы определяется уравнением:

$$P_o = D\lambda_1 S_z^{k+1} \operatorname{tg} \beta \frac{2^{k+1}}{k+2} \left[\sin^{k+2} \left(\frac{\psi_2}{2} \right) - \sin^{k+2} \left(\frac{\psi_1}{2} \right) \right], \quad (7)$$

А в случае если под стружкой будет находиться одновременно m зубьев:

$$\sum_1^m P_o = D\lambda_1 S_z^{k+1} \operatorname{tg} \beta \frac{2^{k+1}}{k+2} \sum_1^m \left[\sin^{k+2} \left(\frac{\psi_2}{2} \right) - \sin^{k+2} \left(\frac{\psi_1}{2} \right) \right], \quad (8)$$

Таким образом, в период, начиная с 30-х годов прошлого столетия, развивалось направление определения сил резания при помощи формул *степенного* типа. Одним из основных результатов совершенствования формул *степенного* типа, на тот период, являлось то, что в этих формулах показатели степеней у всех переменных, связанных с размерами срезаемого слоя, получали или равными единице или выраженными через один параметр – k . Так для определения средней суммарной окружной силы резания на цилиндрической фрезе была предложена следующая формула [4]:

$$P_o = \frac{2^{k+1}}{k+2} C_\beta \frac{\lambda}{\pi} B_z S_z^{k+1} \left(\frac{t}{D} \right)^{\frac{k+2}{2}} v^n, \quad (9)$$

где C_β – коэффициент, учитывающий влияние угла подъема спирали зуба фрезы;

λ – коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала;

B – ширина фрезерования, мм;

t – глубина фрезерования, мм;

S_z – подача на зуб, мм/зуб;

z – число зубьев фрезы;

D – диаметр фрезы, мм;

v – скорость резания, м/мин;

k – величина отрицательная и дробная, зависящая от свойств обрабатываемого материала, переднего угла, степени затупления зуба фрезы и др.;

n – показатель степени.

Формулы *степенного* вида получили широкое распространение в СССР на базе которых разрабатывали справочные материалы для промышленных

предприятий. В справочнике [5] приведена формула главной составляющей силы резания P_z при фрезеровании:

$$P_z = \frac{10C_p t^x S_z^y B^n z}{D^q n^o} k_p, \quad (10)$$

где k_p – обобщенный силовой поправочный коэффициент:

$$k_p = k_\gamma k_{\delta_3}, \quad (11)$$

где k_γ – учитывает влияния переднего угла γ на силу резания;
 k_{δ_3} – показывает влияние износа задней поверхности δ_3 на силу резания.

Приведенная формула и таблицы к ней (табл. 1) для различных обрабатываемых материалов и видов фрез позволяет рассчитывать:

- силу, изгибающую фрезу $R = \sqrt{P_r^2 + P_z^2}$;
- крутящий момент $M = \frac{P_z D}{2 \cdot 100}$;
- мощность резания (эффективную) $N_s = \frac{P_z v}{1020 \cdot 60}$,

т.е. параметры, необходимые для выбора инструмента и оборудования при расчете режимов резания.

Составляющие силы резания – сила подачи – P_s , сила отталкивания – $P_{от}$, радиальная сила – P_r и осевая сила – P_x определяют относительно главной составляющей силы P_z и приведены в табл. 2.

Анализ табл. 1 показывает, что в формуле силы P_o для всех видов фрез (концевых, цилиндрических, дисковых, отрезных и прорезных), изготовленных из быстрорежущей стали при обработке конструкционных сталей, ковкого чугуна, медных сплавов, а также алюминиевых сплавов изменяются только значения коэффициента C_p , а все показатели степеней остаются постоянными. Влияние переднего угла – γ и износа зуба фрезы по задней поверхности необходимо учитывать поправочными коэффициентами.

В работе [4] приведены результаты фундаментальных исследований сил при фрезеровании большой группы цветных металлов и сплавов. На рис. 1 и табл. 3 показаны часть полученных результатов.

Установлено, что при фрезеровании латуни ЛС59-1 и дюралюминия Д-1 изменение скорости резания – v несущественно влияет на силы резания и этим

влиянием можно пренебречь. Для латуни Л62 и красной меди (рис. 1, а) по мере увеличения скорости резания силы уменьшаются и в зоне рабочих скоростей остаются неизменными. Для силумина АЛ-10 и АЛ-4 зависимость силы от скорости выражается кривыми, характерными для металлов, при резании которых образуется нарост. Эти результаты свидетельствуют о том, что условия формирования сил резания от скорости обуславливаются процессами, происходящими на передней поверхности зуба фрезы и в зоне стружкообразования.

При изменении переднего угла γ изменяются условия стружкообразования, усадка стружки, а следовательно и силы резания на передней поверхности. Силы на задней поверхности при этом остаются постоянными.

Для малых подач ($S_z = 0,02; 0,05$ мм/зуб) (табл. 1), когда силы на передней поверхности сравнительно невелики по сравнению с силами на задней грани, изменение переднего угла, влияющего только на силы на передней поверхности приводит к очень незначительному изменению суммарной силы. Для подачи $S_z = 0,02$ мм/зуб изменение γ от 0° до 20° не влияет на величину силы ($k_\gamma = 1,0$). Для подачи $S_z = 0,05$ мм/зуб влияние не большое, для латуни k_γ уменьшается от 1,06 до 0,95, а для силумина от 1,1 до 0,9.

При фрезеровании с большими подачами силы на передней поверхности оказываются значительно большими, чем на задней грани и их изменение при постоянстве сил на задней поверхности приводит к существенному уменьшению средней окружной силы по мере роста переднего угла. Для подачи $S_z = 0,317$ мм/зуб при изменении γ от 0° до 20° , силы существенно уменьшаются. Для латуни k_γ уменьшается от 1,2 до 0,8, а для силумина от 1,27 до 0,73.

Значительное влияние на силы резания при фрезеровании оказывает и износ зубьев фрезы – δ (рис. 1, б). Износ протекает по задним граням. При этом увеличивается площадь контакта зубьев фрезы с поверхностью резания, что приводит к росту сил на задней грани, тогда как силы на передней поверхности остаются практически неизменными.

В результате многолетнего накопления экспериментальных данных делается важный вывод о том, что степенные уравнения не отражают этой характерной особенности изменения сил от износа, так как в них износ учитывается сомножителем k_δ , тогда как правильнее было бы учитывать прирост сил вторым слагаемым. Другими словами уравнение сил резания должно состоять из двух слагаемых: сил, возникающих на передней поверхности и сил возникающих на задней поверхности. Здесь также было отмечено, что при цилиндрическом фрезеровании, когда толщина стружки измеряется сотыми долями миллиметра и доля сил на задней грани в суммарной окружной силе велика, влияние износа на силы резания оказывается еще более существенным.

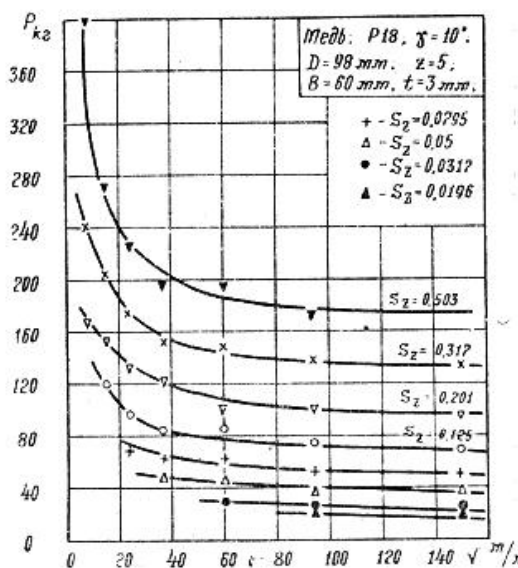
Таблица 1 Значение коэффициента C_p и показателей степеней в формуле окружной силы P_0 при фрезеровании [5]

Углеродистая конструкционная ($\sigma = 750$ МПа)							
Фрезы	Инструментальный материал	C_p	x	y	n	q	ω
Концевые	Твердый сплав	12,5	0,85	0,75	1,0	0,73	-0,13
	Быстрорежущая сталь	68,2	0,86	0,72	1,0	0,86	0
Цилиндрические	Твердый сплав	101	0,88	0,75	1,0	0,87	0
	Быстрорежущая сталь	68,2	0,86	0,72	1,0	0,86	0
Дисковые, отрезные, прорезные	Твердый сплав	261	0,9	0,8	1,1	1,1	0,1
	Быстрорежущая сталь	68,2	0,86	0,72	1,0	0,86	0
12X18H10T (HB 141)							
Концевые	Быстрорежущая сталь	82	0,75	0,6	1,0	0,86	0
Серый чугун (HB 190)							
Цилиндрические	Твердый сплав	54	0,9	0,8	1,0	0,9	0
	Быстрорежущая сталь	30	0,83	0,65	1,0	0,83	0
Дисковые, концевые, прорезные, отрезные	Быстрорежущая сталь	30	0,83	0,65	1,0	0,83	0
Ковкий чугун (HB 150)							
Цилиндрические, дисковые, концевые, прорезные, отрезные	Быстрорежущая сталь	30	0,86	0,72	1,0	0,86	0
Медные сплавы средней твердости (HB 100–140)							
Цилиндрические, дисковые, концевые, прорезные, отрезные	Быстрорежущая сталь	22	0,86	0,72	1,0	0,86	0

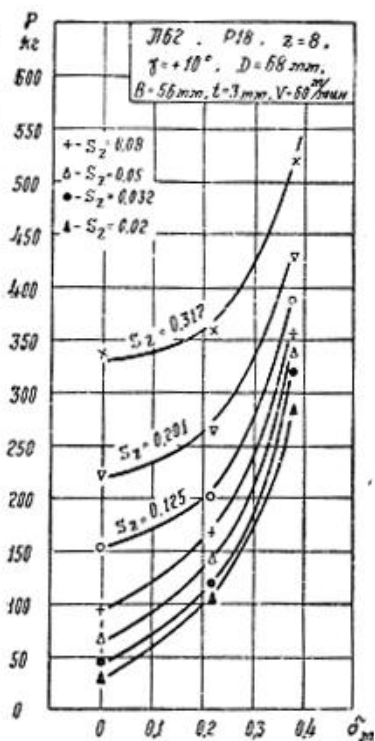
Примечание: окружную силу P_0 для алюминиевых сплавов рассчитывать как для стали с введением коэффициента 0,25. При затуплении фрезы для мягкой стали сила возрастает в 1,75 - 1,9 раза, для других случаев в 1,2 - 1,4 раза.

Таблица 2 – Относительные значения составляющих силы резания при фрезеровании (Фрезы цилиндрические, дисковые, концевые) [5]

Фрезерование	Сила подачи $P_s:P_z$	Сила отталкивания $P_{от}:P_z$	Радиальная сила $P_r:P_z$	Осевая сила $P_x:P_z$
Встречное	1,1 - 1,2	0 - 0,25	0,4 - 0,6	0,2 - 0,4tg ω
Попутное	-(0,7 - 0,9)	0,7 - 0,9	0,4 - 0,6	



а



б

Рисунок 1 – Влияние скорости резания – v , подачи на зуб – S_z и износа инструмента – δ на значение окружной силы – P при цилиндрическом фрезеровании [4]

Таблица 3 – Поправочные коэффициенты k_γ для различных подач при фрезеровании [4]

Марка металла	Подача S_z , мм/зуб	k_γ		
		$\gamma = 0^\circ$	$\gamma = 10^\circ$	$\gamma = 20^\circ$
Латунь ЛС59-1	0,02	1,0	1,0	1,0
	0,05	1,06		0,95
	0,125	1,1		0,9
	0,317	1,2		0,8
Силумин АЛ-10	0,02	1,0	1,0	1,0
	0,05	1,1		0,9
	0,125	1,13		0,87
	0,317	1,27		0,73

В этот период (70-е годы) происходит принципиальное изменение взглядов на процесс резания и в том числе на силы резания и методы их расчета [6]. Ряд ученых [7, 8] пришли к выводу о непригодности использования для расчетов сил резания эмпирических формул степенного вида. Эти формулы не только не отражают физической сущности процесса резания, но и могут привести к ошибкам расчета достигающим 100–200%. Было показано, что за основу при разработке методов расчета сил резания следует брать положения, выдвинутые еще в 1893 г. К.А. Зворыкиным, что силы резания состоят из двух групп: из сил, действующих на переднюю поверхность инструмента и сил, действующих на его заднюю поверхность. Эти группы сил определяются различными процессами и их закономерностями.

А.М. Розенберг [7] и Н.Н. Зорев [8] независимо друг от друга разработали метод экстраполяции силовой зависимости от толщины срезаемого слоя на нулевую толщину, который позволяет экспериментально измеренную силу резания разделить на силу, действующую на переднюю поверхность и силу, действующую на заднюю поверхность инструмента.

Это позволило экспериментально определить эти силы, произвести исследования и создать методы их расчета. В основу этого метода было взято положение, что силы, действующие на заднюю поверхность при определенных условиях (А.М. Розенберг – при постоянной температуре, Н.Н. Зорев – при постоянной усадке стружки) не зависят от толщины срезаемого слоя.

В основу современных выводов уравнений для расчета сил резания берутся следующие основные положения [9]:

1. Сила резания P раскладывается на две составляющие: силу, совпадающую по направлению с вектором скорости резания P_z и силу, расположенную в плоскости, перпендикулярной к этому вектору P_{xy} (рис. 2).

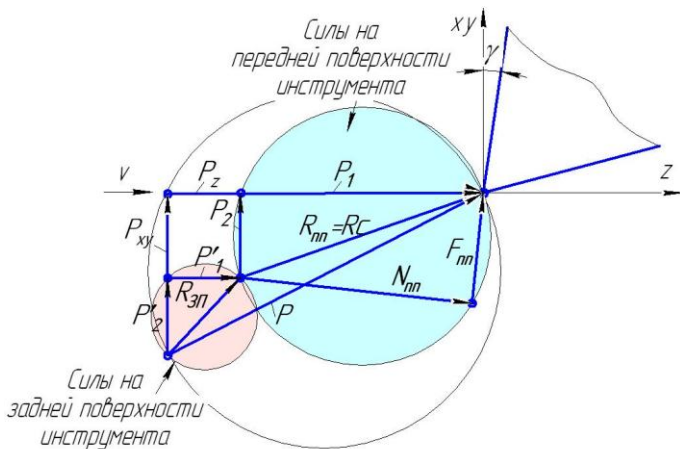


Рисунок 2 – Полная система сил, действующих одновременно на передней поверхности F_{nn} , N_{nn} и P_1 , P_2 , а также на задней поверхности $F_{3П} = P'_1$, $N_{3П} = P'_2$, формирующих технологические составляющие P_z и P_{xy} силы резания P

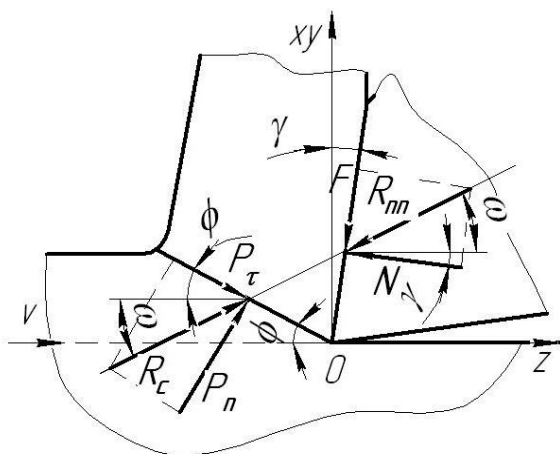


Рисунок 3 – Силы стружкообразования (условие равновесия стружки $R_c = R_{nn}$)

3. Каждая из этих сил состоит из двух частей: составляющей силы, действующей на переднюю поверхность инструмента и составляющей силы, действующей на заднюю поверхность инструмента:

$$P_z = P_1 + P'_1, \quad (12)$$

$$P_{xy} = P_2 + P'_2, \quad (13)$$

где P_1 и P_2 – силы на передней поверхности;
 P'_1 и P'_2 – силы на задней поверхности.

3. Силы, действующие на переднюю и заднюю поверхность инструмента определяются различными физическими процессами при резании и следовательно подчиняются разным закономерностям. Силы, действующие на переднюю поверхность инструмента связаны с процессами в зоне стружкообразования и процессами в зоне контакта стружки с передней поверхностью инструмента, рис. 3. Силы, действующие на заднюю поверхность инструмента, определяются процессами в зоне контакта задней поверхности с поверхностью резания рис. 4. Соответственно формулы для определения сил, действующих на переднюю и заднюю поверхности инструмента, будут отличаться друг от друга и выводы этих формул должны быть выполнены отдельно.

Таким образом, был предложен новый подход расчета сил резания с использованием понятий удельных сил, действующих на передней и задней поверхности независимо друг от друга, так называемые «структурные формулы» [10].

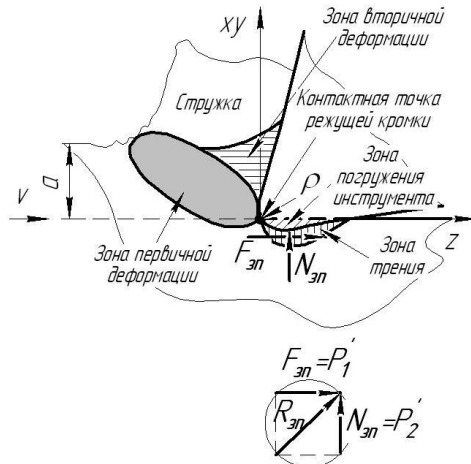


Рисунок 4 – Система сил, действующих на заднюю поверхность инструмента

Если формулы составляющих силы резания представляют собой сумму сил на передней и задней поверхности (12, 13) (рис. 2).

$$P_z = P_1 + P'_1,$$

$$P_{xy} = P_2 + P'_2,$$

где P_1 и P_2 – силы на передней поверхности;

P'_1 и P'_2 – силы на задней поверхности,

то расчет значений этих составляющих силы резания можно выразить через удельные силы формулами:

$$P_z = C_{III}ab + C_{зп} \sum l_{xy}, \quad (14)$$

$$P_{xy} = U_{III}ab + U_{зп} \sum l_{1Pxy}, \quad (15)$$

где C_m и U_m – удельные силы на передней поверхности;

$C_{зп}$ и $U_{зп}$ – удельные силы на задней поверхности;

ab – площадь среза, a и b – толщина и ширина среза;

$\sum l_{xy}$, $\sum l_{1Pxy}$ – проекции суммарной длины рабочих частей режущих кромок на плоскость, перпендикулярную направлению, в котором определяется величина силы.

Удельные силы рассчитываются по формулам (16), (17), (18), (19) [9].

$$C_{III} = \tau_p (\varepsilon + 1), \quad (16)$$

$$U_{III} = \tau_p (\varepsilon + 1)tg\omega, \quad (17)$$

$$C_{зп} = 1,5\tau_p\varepsilon\rho + \mu_1\sigma_T h_3, \quad (18)$$

$$U_{зп} = 1,5\tau_p\rho(3,17\varepsilon + 1)tg\omega + \sigma_T h_3, \quad (19)$$

где τ_p – касательное напряжение вдоль условной плоскости сдвига;

ε – относительный сдвиг;

ω – угол действия;

ρ – радиус округления режущей кромки;

μ_1 – коэффициент трения на задней поверхности;

σ_T – предел текучести обрабатываемого материала;

h_3 – ширина площадки износа на задней поверхности.

Таким образом, сила на передней поверхности равна произведению удельной силы на передней поверхности на площадь срезаемого слоя, а сила на задней поверхности равна произведению удельной силы на задней

поверхности на проекцию рабочей длины режущих кромок на плоскость перпендикулярную определяемой силе. Площадь срезаемого слоя и рабочие длины режущих кромок определяются геометрической спецификой каждого вида обработки. [9].

Анализ формул (16), (17), (18), (19) для расчета удельных сил резания показывает, что в них учтено влияние механических свойств обрабатываемого материала, условий несвободного и косоугольного резания, состояние износа режущего инструмента и др. Однако, в них отсутствуют такие параметры условий резания как передний угол, скорость резания, форма передней поверхности и др. т. е. те параметры, которые влияют на силы резания через степень деформации металла стружки.

Очень важным положением является то, что эти удельные силы для различных видов обработки (точение, сверление, фрезерование и др.) при одинаковых условиях взаимодействия режущего клина инструмента с обрабатываемым материалом (ε , σ_v , δ , σ_m , γ , φ , ρ , h_z и др.) имеют одинаковые значения [10].

Еще одним преимуществом аналитических уравнений *структурного* типа является их дифференцируемость, т. е. возможность с помощью тех же констант описывать не только общие значения сил, но и их различные распределения по ширине фрезерования и по времени работы зуба фрезы (угла поворота). В настоящее время разработаны теоретические формулы для расчета мгновенных и средних сил при цилиндрическом фрезеровании фрезами с винтовыми режущими зубьями, в которых за основу приняты удельные силы, действующие на передней и задней поверхности зуба фрезы [11, 12, 13].

Современный алгоритм расчета сил при концевом цилиндрическом фрезеровании по статической дискретной модели представлен в работе [11] и приведен на рис. 5.

Для вычисления сил используют прием дискретизации режущей части фрезы. Зуб фрезы разбивают на участки db режущей кромки и интервалы изменения толщины среза при изменении угла поворота φ .

Дальнейшая последовательность расчета состоит из следующих этапов:

1. Определение нормальных сил N_{1pm} , N_{2pm} и сил трения F_{1pm} , F_{2pm} на передней и задней поверхностях.
2. Определение радиальной P_{rmp} и тангенциальной P_{tmp} сил на m -участке зуба фрезы, p -го дискретного перемещения.
3. Определение силы подачи P_{hpm} и силы отжима P_{vpm} на m -участке зуба фрезы, p -го дискретного перемещения.
4. Определение результирующей силы подачи P_{hp} и отжима P_{vp} в момент p -го дискретного перемещения на отдельном зубе.

Сравнение расчетных и экспериментально измеренных технологических составляющих силы резания приведены на рис. 6 [11] (2003 г.). В работе [12]

(2011) при расчете сил резания учтены: влияние угла наклона винтовой режущей кромки зуба фрезы – ω на изменение условий трения на передней поверхности и условий деформирования в плоскости сдвига, влияние перехода от процесса пропахивания до возникновения и дальнейшего снятия стружки на задней поверхности, а также влияния угла наклона свободной поверхности срезаемого слоя – ξ на изменение угла наклона плоскости сдвига – ϕ . Сравнение расчетных и экспериментальных измерений сил резания приведены на рис. 7 [12].

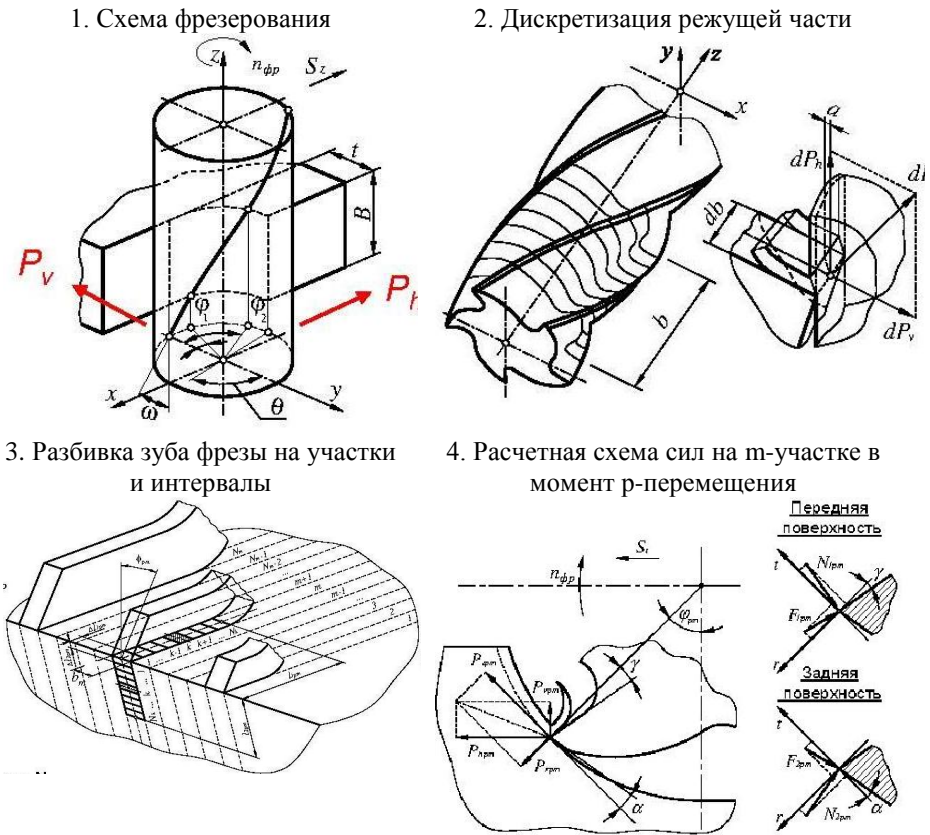


Рисунок 5 – Последовательность современного расчета сил при концевом цилиндрическом фрезеровании по статической дискретной модели [11] (2004)

Приведенные на рис. 6 и рис. 7 результаты позволяют утверждать, что в настоящее время хорошо изучена физическая модель возникновения сил резания в статических условиях (т. е. в условиях, построенных на равновесии стружки между передней поверхностью и зоной сдвига) с учетом их независимого действия на переднюю и заднюю поверхность инструмента, а также разработаны формулы и алгоритмы расчета их мгновенных и средних значений с высоким уровнем точности.

Учет изменения суммарной площади сечения среза и суммарной длины активной кромки в расчетных формулах позволяет вычислять колебания технологических составляющих вынуждающей силы фрезерования за один оборот фрезы или по длине контакта на отрезных фрезах. [13].

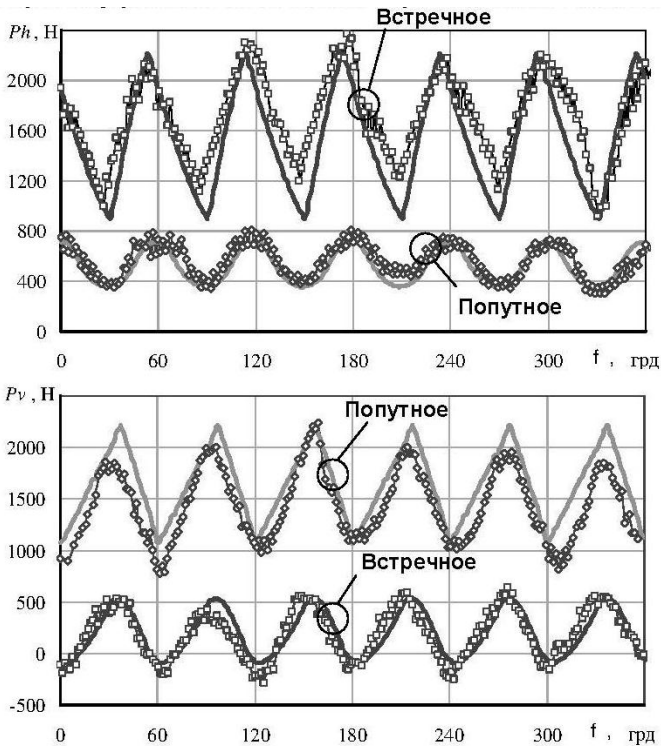


Рисунок 6 – Сравнение экспериментальных измерений с результатами аналитического расчета сил при контурном цилиндрическом фрезеровании [11].

Условия фрезерования: Сталь 45, P6M5, $\varnothing 24$ мм, $z = 6$, $\omega = 20^\circ$, $t = 5$ мм,
 $b = 20$ мм, $S_z = 0,03$ мм/зуб, $v = 18,84$ м/хв, $n = 250$ об/мин).

Динамометр УДМ-600, средние значения 10–20 оборотов.

P_h – сила подачи, P_v – сила отжима

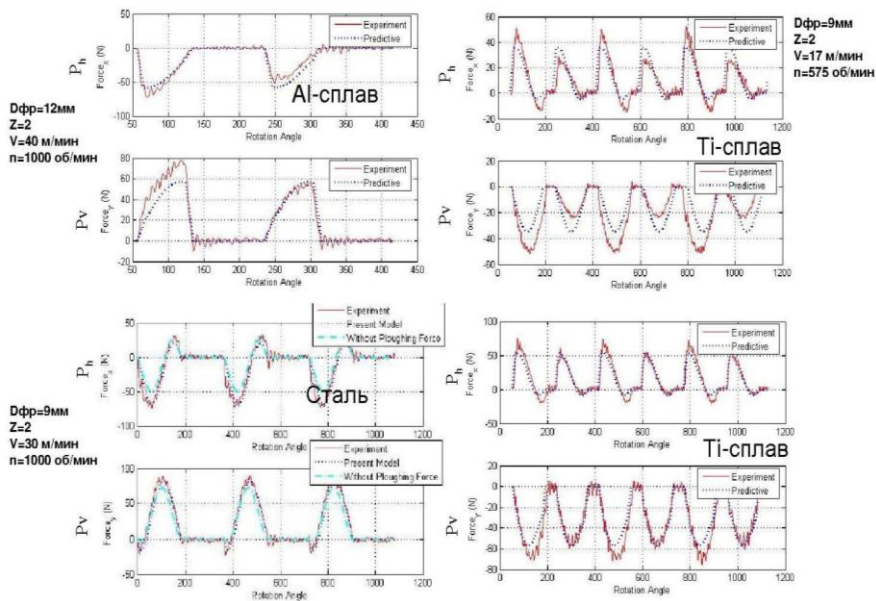


Рисунок 7 – Сравнение экспериментальных измерений с результатами аналитического расчета сил при концевом цилиндрическом фрезеровании [12] (2011).

Измерительная аппаратура: Пьезоэлектрический динамометр с фильтрацией низких частот до 200 Гц, частота дискретизации записи $(1-2,5) \cdot 10^4$ 1/с.

P_h – сила подачи, P_v – сила отжима

Однако, учет только переменных значений вынуждающей силы резания при фрезеровании не позволяет исследовать причину и механизм возбуждения автоколебаний, вызывающих возникновение вибраций, так как в рассмотрении отсутствует упругая система (СПИД), которая определенным образом реагирует на прилагаемые к ней силы резания. (см. часть 2).

Выводы:

1. Подробно рассмотрена эволюция развития исследований по изучению сил при цилиндрическом фрезеровании. Показано, что «формулы степенного вида» для расчета сил, не отражают физической сущности процесса резания, поэтому в промышленно развитых странах, начиная с 60-х годов, расчеты сил ведут по «структурным формулам», в которых силы рассматривают как сумму нагрузок, действующих независимо на переднюю и заднюю поверхности инструмента.

Современные алгоритмы расчета средних значений всех составляющих силы резания уже хорошо разработаны, используются в промышленности для всех видов обработки и не требуют дальнейших уточнений для повышения точности.

2. Знания только о величине составляющих силы резания не позволяет рассматривать причины и механизмы возбуждения различных по своей природе колебаний, возникающих в зоне обработки. Необходима дополнительная информация о свойствах упругой системы СПИД, которая определенным образом реагирует на прилагаемую к ней силу резания. Совместное рассмотрение воздействия силы резания и реакции упругой системы СПИД на это воздействие является основой динамики процесса резания.

Список использованных источников: 1. *Salomon C.* Zur theorie des Fräsvorgandes, Z. Ver. Deut. Ing., 1928, P. 1619–1624 2. *Розенберг А. М.* Теория работы цилиндрической фрезы со спиральным зубом / *А. М. Розенберг, В. В. Суднишников* // Вестник металлопромышленности, 1933. №4, С.36–48. 3. *Розенберг А. М.* Работа цилиндрической фрезы / *А. М. Розенберг* // Известия Томского индустриального института [Известия ТИИ]. – 1936. – Т. 55, [Вып. 1–3]. – С. 128-165. 4. Исследование сил резания при фрезеровании цветных металлов / *А. М. Розенберг [и др.]* // Известия Томского политехнического института [Известия ТПИ]. – 1965. – Т. 133. – [С. 129-141]. 5. Справочник технолога–машиностроителя [В 2-х т.] / Под ред. *А.Г. Косиловой и Р.К. Мецержакова.* – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1986. 496 с. 6. *Розенберг А.М.* Новые зависимости для расчета сил при фрезеровании / *А.М. Розенберг, Г.Л. Куфарев, Ю.А. Розенберг* // Обрабатываемость жаропрочных и титановых сплавов.: Сб. докл. межвуз. ВНТК. Куйбышев, 1963. С. 78 – 92. 7. *Розенберг А. М.* Определение сил на задней грани реза. Сборник Зап. Сиб. филиала АН СССР. «Вопросы машиноведения и машиностроения» Новосибирск, 1941. 8. *Зорев Н.Н.* Вопросы механики процесса резания металлов / *В. В. Зорев.* – М. Машгиз, 1956. – 368 с. 9. *Розенберг Ю.А.* Резание материалов: Учебник для техн. вузов / *Ю. А. Розенберг.* – Курган: Изд-во ОАО «Полиграфический комбинат» Зауралье, 2007. – 294 с. 10. *Розенберг Ю.А.* Силы резания и методы их определения : учеб. пособие : [В 2 ч.] / *Ю. А. Розенберг, С. И. Тахман* : Кург. машиностроит. ин-т. – Курган : КМИ, 1995. – 103 с. 11. *Крыжановский С. А.* Прогнозування параметрів процесу контурної обробки кінцевими фрезами на основі моделювання процесу різання та точності обробки : автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» / *С. А. Крыжановский* – Киев, 2005. – 22 с. 12. *Zou G.* An integrated model for force prediction in peripheral milling operations : A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in The Faculty of Graduate Studies (Mechanical Engineering), the university of British Columbia (Vancouver), 2011, 229 p. 13. *Панчук В. Г.* Теоретичні основи проектування відрізних фрез : автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.03.01 / *В. Г. Панчук*; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". – К., 2009. – 36 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Salomon C.* Zur theorie des Fräsvorgandes, Z. Ver. Deut. Ing., 1928, P. 1619–1624 2. *Rozenberg A. M.* Teoriya raboty cilindricheskoj frezy so spiral'nym zubom / *A.M. Rozenberg, V.V. Sudnishnikov* // Vestnik metallopromyshlennosti, 1933. №4, P.36-48. 3. *Rozenberg A.M.* Rabota cilindricheskoj frezy / *A. M. Rozenberg* // Izvestiya Tomskogo industrial'nogo instituta [Izvestiya TPI]. – 1936. – Т. 55, [Vyp. 1-3]. – P. 128-165. 4. Yssledovanye syl rezaniya pry frezerovanyu tsvetnykh metallov / *A. M. Rozenberh [y dr.]* // Yzvestiya Tomskoho polytekhnycheskoho ynstytuta [Yzvestiya TPY]. – 1965. – Т. 133. – [P. 129-141]. 5. Spravochnyk tekhnoloha–mashynostroytelya [V 2-kh t.] / Pod red.. *A. H. Kosylovoy y R. K. Meshcheryakova.* – 4-e izd., pererab. y dop. – М. : Mashynostroenye, 1986. 496 p. 6. *Rozenberg A. M.* Novye zavisimosti dlya

rascheta sil pri frezerovanii / A. M. Rozenberg, G. L. Kufarev, YU. A. Rozenberg // Obrabatyvaemost' zharoprochnykh i titanovykh splavov.: Sb. dokl. mezhvuz. VNTK. Kujbyshev, 1963. P. 78 – 92.

7. Rozenberg A. M. Opredelenie sil na zadnej grani rezca. Sbornik Zap. Sib. filiala AN SSSR. «Voprosy mashinovedeniya i mashinostroeniya» Novosibirsk, 1941. **8. Zorev N. N.** Voprosy mekhaniki processa rezaniya metallov / V. V. Zorev. – M. Mashgiz, 1956. – 368 p. **9. Rozenberg YU. A.** Rezanie materialov: Uchebnik dlya tekhn. vuzov / YU. A. Rozenberg. – Kurgan: Izd-vo OAO «Poligraficheskij kombinat» Zaural'e, 2007. – 294 p. **10. Rozenberg YU. A.** Sily rezaniya i metody ih opredeleniya : ucheb. posobie : [V 2 ch.] / YU. A. Rozenberg, S. I. Tahman : Kurg. mashinostroit. in-t. – Kurgan : KMI, 1995. – 103 p. **11. Kryzhanovskij S. A.** Prognozovannaya parametriv procesu konturnoi obrobki kincevimi frezami na osnovi modelyuvannaya procesu rizannaya ta tochnosti obrobki : avtoref. dis. na soiskanie nauchn. stepeni kand. tekhn. nauk: spec. 05.03.01 «Procesi mekhanichnoi obrobki, verstati ta instrumenti» / S. A. Kryzhanovskij – Kiev, 2005. – 22 p. **12. Zou G.** An integrated model for force prediction in peripheral milling operations : A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in The Faculty of Graduate Studies (Mechanical Engineering), the university of British Columbia (Vancouver), 2011, 229 p. **13. Panchuk V. G.** Teoretichni osnovi proektuvannaya vidriznih frez : avtoref. dis... d-ra tekhn. nauk: 05.03.01 / V. G. Panchuk; Nac. tekhn. un-t Ukraini "Kiiv. politekhn. in-t". – K., 2009. – 36 p.