

УДК 621.89

UDC 621.89

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ПОПУТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

DETERMINATION OF CUTTING FORCE AT CUTDOWN MILLING

A. A. Губанова

A. A. Gubanova

Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

anatoliya81@mail.ru

anatoliya81@mail.ru

Рассматриваются силы, действующие на каждое режущее лезвие и их зависимость от площади срезаемого слоя, изменения площади срезаемого слоя в зависимости от текущего значения угла поворота инструмента, его упругих деформационных смещений и величины упругих деформационных смещений обрабатываемой детали; варьирование скорости резания за счет изменения скоростей упругих деформационных смещений.

The article considers the forces acting on each cutting edge and their dependence on the square of the cut off layer, the changes in the area of the cut off layer depending on the current value of the angle of rotation of the tool, its elastic deformation displacement and the magnitude of elastic deformation displacements of the workpiece; the variation of cutting speed due to the speed changes of the elastic deformation displacements.

Ключевые слова: сила резания, толщина срезаемого слоя, ширина фрезерования

Keywords: cutting force, thickness of the cut off layer, milling width

Введение. В настоящее время наиболее часто используют концевые и цилиндрические фрезы с винтовым зубом с переменным окружным шагом зубьев.

В процессе фрезерования фреза одновременно подвергается следующим деформациям:

1. Растяжение вдоль оси.
2. Кручение относительно оси фрезы в направлении, противоположном вращению.

Рассмотрим влияние сил на характеристики точности обработки, сделав акцент на определение проекции сил на независимую систему координат, привязанную к оси вращения фрезы. Поэтому выясним связь между локальной системой координат и системой координат станка, в которой формируется погрешность обработки (рис. 1).

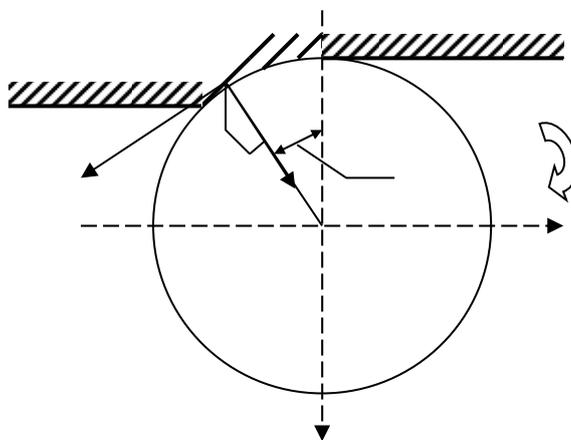


Рис. 1 Силы, действующие на режущую кромку зуба фрезы в плоскости, перпендикулярной к оси вращения

Пусть заданы силы резания в локальной системе координат, которые, как указано ранее, пропорциональны толщине срезаемого слоя. Ограничимся рассмотрением 2-х составляющих этих сил: Y_ψ и X_ψ , то есть тангенциальной силой, которую иногда называют главной силой резания, и силой, действующей в осевом направлении.

Для того чтобы определить силы, заданные в локальной системе координат, $P_\psi = \{P_x(\psi), P_y(\psi)\}$, преобразованную в независимую систему координат — $P_\psi = \{P_x, P_y\}$, можно воспользоваться следующей матрицей перехода [1]:

$$P = L_\psi \cdot P_\psi, \quad (1)$$

где

$$L_\psi = \begin{bmatrix} \sin \psi; & -\cos \psi \\ \cos \psi; & \sin \psi \end{bmatrix} \quad (2)$$

Получаем следующий алгоритм вычисления изменения сил, действующих на участке ΔZ на режущий инструмент и вызывающий его деформации в плоскости X,Y [2]:

1. Определяем функцию изменения толщины срезаемого слоя (а). Для этого, при заданных технологических режимах S_z и t , вычисляются ψ_1 , ψ_2 и a_{\max} .

2. Определяется, для каждого угла поворота — ψ , функция изменения сил F_ψ .

Модуль силы

$$|P| = \rho \times a; \quad \begin{cases} P_z = \rho \times a \times \chi_z \\ P_x = \rho \times a \times \chi_x \end{cases}, \quad (3)$$

где

$$\rho = \frac{\sqrt{P_z^2(\psi) + P_x^2(\psi)}}{a_\psi} = \frac{1.12 P_z}{a_\psi} \quad (4)$$

— сила, приходящаяся на единицу толщины срезаемого слоя;

χ — коэффициент пропорциональности.

Результирующие по координатам равны:

$$P(\psi) = P_{x_\psi} \times \cos \psi + P_{y_\psi} \times \sin \psi \quad (5)$$

$$P(\psi) = P_{x_\psi} \times \sin \psi - P_{y_\psi} \times \cos \psi \quad (6)$$

Если заданы векторы сил $\overline{P_z}$ и $\overline{P_x}$, тогда:

$$P(\psi) = \overline{P_z} \cdot \chi_z \quad (7)$$

$$P(\psi) = \overline{P_x} \cdot \chi_x \quad (8)$$

где χ_z , χ_x — есть величины постоянные.

$$\chi_z = \frac{P_z}{\sqrt{P_z^2 + P_x^2}}; \quad (9)$$

$$\lambda_x = \frac{P_x}{\sqrt{P_z^2 + P_x^2}}; \quad (10)$$

Рассмотрим это на конкретном примере.

Расчеты производим для различных значений подач на зуб фрезы $S_z = 0,047$ мм/зуб, $S_z = 0,033$ мм/зуб и $S_z = 0,013$ мм/зуб, оставляя неизменными глубину резания $t = 3$ мм, частоту вращения шпинделя $n = 530$ мин⁻¹ и скорость резания $v = 15,57$ м/мин, диаметр фрезы – Ø 20.

По результатам строим график изменения толщины срезаемого слоя.

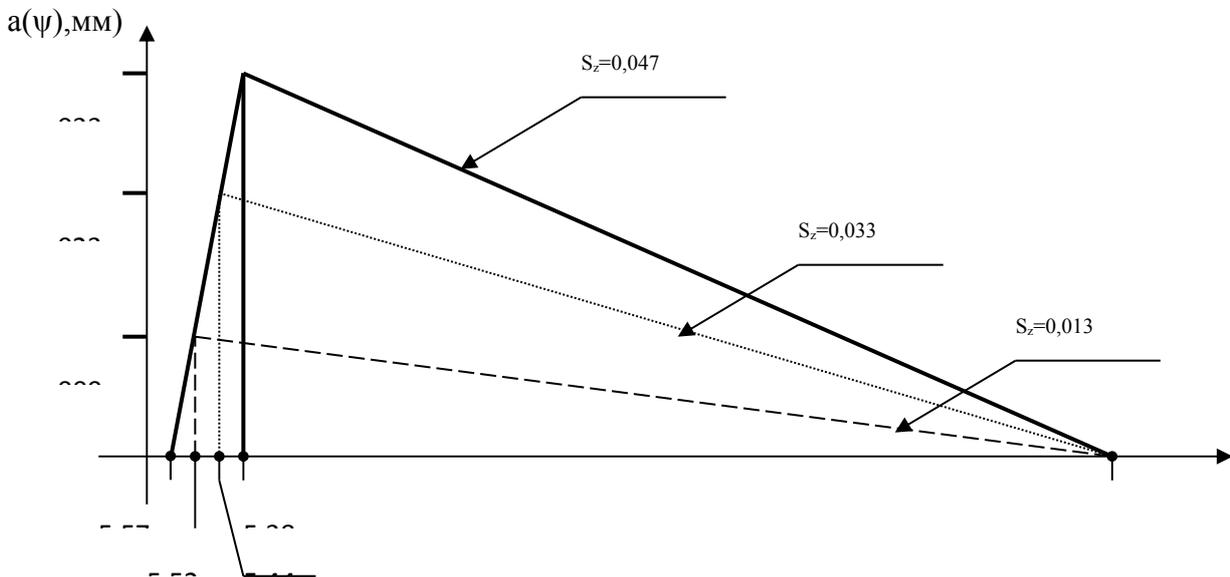


Рис. 2. График изменения толщины срезаемого слоя

Площадь поперечного сечения среза, снимаемого одним зубом, определяется по формуле:

$$F = a_{\text{мгн}} \cdot b \quad (11)$$

где $a_{\text{мгн}}$ — мгновенная толщина срезаемого слоя;

b — ширина фрезерования (в рассматриваемом случае $b = \Delta Z = 1$ мм).

Главная составляющая сил резания при подаче $S_z = 0,047$ мм/зуб определяется по формуле [3]:

$$Y_\psi = \frac{10C_{pt^x} s_z^y B^n z}{D^q n^w} = \frac{10 \times 68,2 \times 3^{0,86} \times 0,047^{0,72} \times 1^1 \times 1}{20^{0,86} \times 530^0} = 14,756 H$$

где $B=1$ мм — ширина фрезерования (участок ΔZ);

$t=3$ мм — глубина резания;

$z=1$ число зубьев фрезы, участвующих в контакте на участке ΔZ ;

$D=20$ мм — диаметр фрезы;

$n=530$ мин⁻¹ — частота вращения шпинделя;

$S_z = 0,047$ мм/зуб — подача на зуб.

Коэффициент и показатели степени: $C_p = 68,2$, $x = 0,86$, $y = 0,72$, $n = 1$, $q = 0,86$, $w = 0$.

Радиальная составляющая $P_x(\psi) = 0,5H$, $P_y(\psi) = 7,378H$

Результирующая сила $R = \sqrt{P_z^2 + P_r^2}$;

Коэффициенты пропорциональности:

$$\chi_z = \frac{P_z}{\sqrt{P_z^2 + P_r^2}} = \frac{P_z}{\sqrt{P_z^2 + 0,5^2 P_z^2}} = \frac{P_z}{P_z \sqrt{1 + 0,25}} = 0,8944;$$

$$\chi_r = \frac{P_r}{\sqrt{P_z^2 + P_r^2}} = \frac{0,5P_z}{\sqrt{P_z^2 + 0,5^2 P_z^2}} = \frac{0,5P_z}{P_z \sqrt{1 + 0,25}} = 0,4472.$$

Модуль силы, действующей на фрезу $\text{mod } R = \rho \cdot a$

$$R_{y'} = \rho \cdot a \cdot \chi_y \quad (12)$$

$$R_{x'} = \rho \cdot a \cdot \chi_x \quad (13)$$

где ρ — коэффициент, характеризующий условия обработки.

$$\rho = \frac{\sqrt{P_z^2 + P_x^2}}{a(\psi)} = \frac{1,12P_z}{a(\psi)};$$

Определяем шаг изменения угла ψ при переходе от одного условно вырезанного «диска» с $\Delta Z=1$ мм к другому. Этот шаг в нашем случае составляет $4,64^\circ$.

Проекция этой силы на оси X и Y соответственно составят:

$$P_{(\psi)} = P_{y'(\psi)} \cdot \cos \psi + P_{y(\psi)} \cdot \sin \psi = p \cdot a_{(\psi)} \cdot \chi_z \cdot \cos \psi + p \cdot a_{(\psi)} \cdot \chi_r \sin \psi \quad (14)$$

$$P_{(\psi)} = P_{x(\psi)} \cdot \sin \psi - P_{x'(\psi)} \cdot \cos \psi = p \cdot a_{(\psi)} \cdot \chi_r \cdot \sin \psi - p \cdot a_{(\psi)} \cdot \chi_z \cos \psi \quad (15)$$

По результатам вычислений строим графики изменения силы резания в зависимости от угла контакта ψ (рис. 3-5).

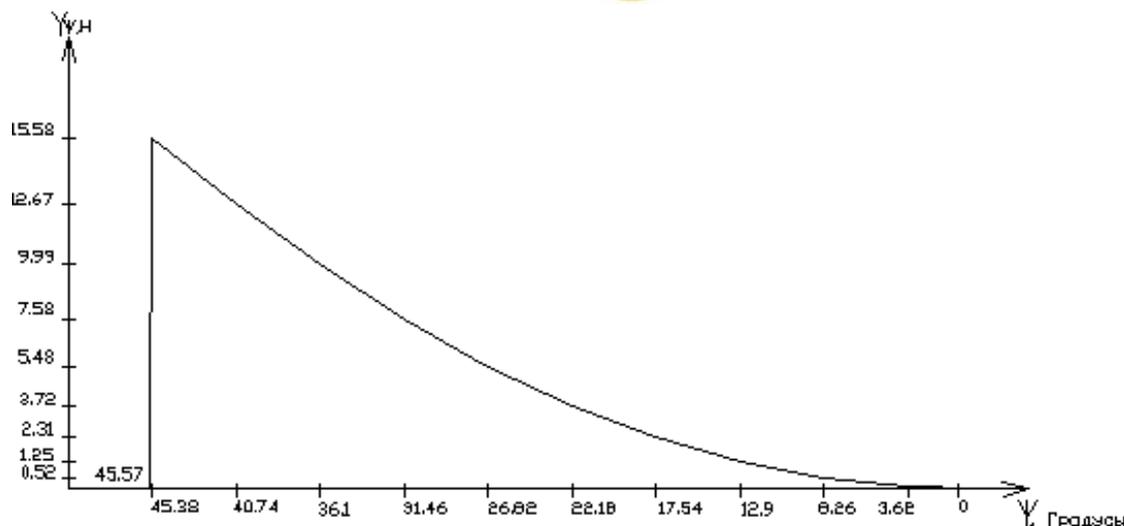


Рис. 3. График изменения силы резания по оси Y в зависимости от угла контакта ψ

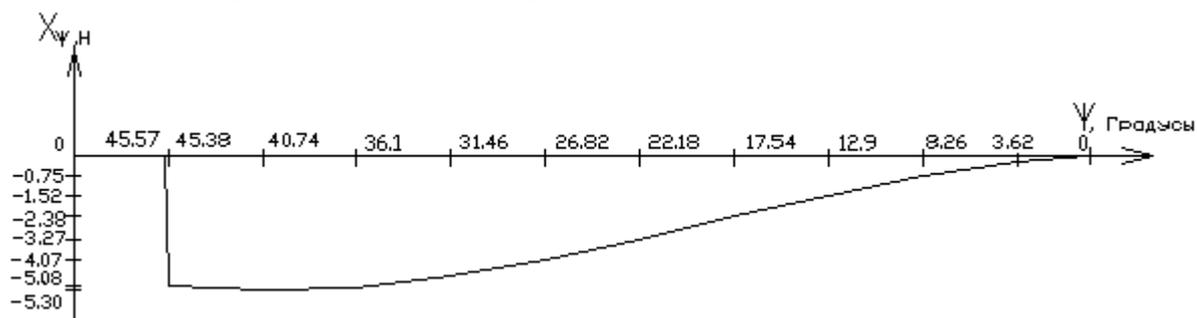


Рис. 4. График изменения силы резания по оси X в зависимости от угла контакта ψ

График изменения суммарной составляющей сил резания приведен на рис.4.

Сделаем предварительное заключение по закономерности изменения сил, действующих на фрезу на участке ΔZ .

1. Сила, действующая на зуб, является периодической функцией угла поворота ψ .
2. Составляющие силы P_x и P_y имеют разный знак.

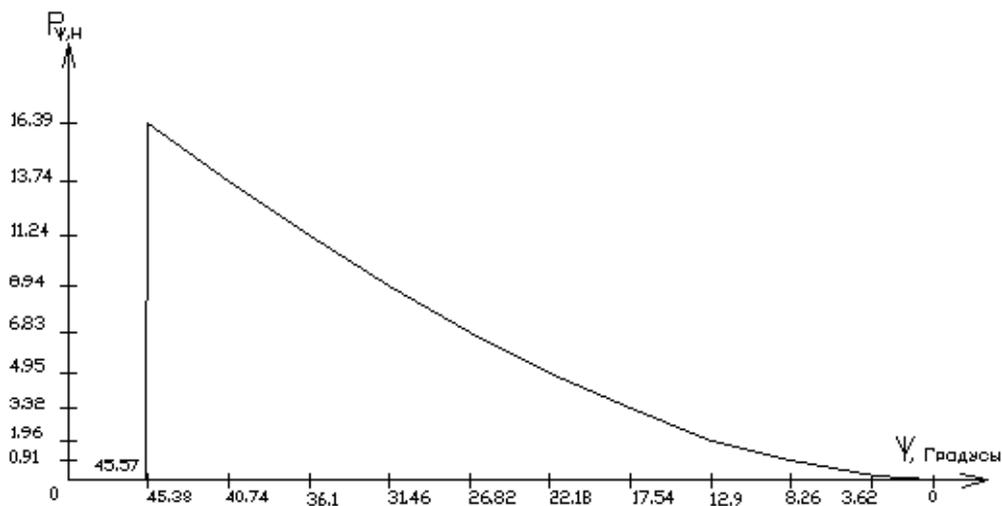


Рис. 5. График изменения результирующей силы резания в зависимости от угла контакта ψ

Заключение. Таким образом, необходимо отметить два противоположных эффекта, имеющих место при фрезеровании. Во-первых, за счет силы P_y происходит отжим фрезы от формообразующей поверхности и, тем самым, влияет на текущее значение срезаемого слоя. Во-вторых, за счет силы P_x , знак которой отрицательный, фреза деформируется в сторону направления скорости подачи (при попутном фрезеровании). Следовательно, при увеличении мгновенного значения величины подачи не только возрастает величина P_x , но и имеет место упругое затягивание инструмента в направлении подачи. Другими словами, меняется сама величина подачи. В свою очередь, сила P_x зависит от текущего значения величины срезаемого слоя и угла поворота ψ .

Указанное обстоятельство показывает, что реальные движения режущих лезвий фрезы по отношению к заготовке должны отличаться от тех значений, которые получаются исходя из анализа движений исполнительных органов станка, для которых определяются технологические режимы.

Библиографический список

1. Заковоротный, В. Л. Синергетическая концепция при построении систем управления точностью изготовления деталей сложной геометрической формы / В. Л. Заковоротный, М. Б. Флек, Д. Т. Фам // Вестник Донского государственного технического университета. — 2011. — Т. 11. № 10 (61). — С. 1785-1797.
2. Лукьянов, А. Д. Методы экспериментального анализа вибрационной активности процесса фрезерования / А. Д. Лукьянов, А. А. Губанова, И. А. Семко // Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении-2016: сборник научных трудов / Научно-производственный кооператив «ОНИКС». — Ирбит : НПК «ОНИКС», 2016. — С.156–167.
3. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов — Москва : Машиностроение, 1967. — 359 с.