

ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.9

Ю. Н. ВНУКОВ, д-р техн. наук,
А. Г. САРЖИНСКАЯ, Запорож'є, Україна

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОРЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ СФЕРИЧЕСКИМИ ФРЕЗАМИ

У статті викладено особливості розрахунку складників сили різання при торцевому фрезеруванні сферичними фрезами.

В статье изложены особенности расчета составляющих силы резания при торцевом фрезеровании сферическими фрезами.

At the article, the cutting force design procedure for milling by ball end mills with direct and spiral wipers is described.

В настоящее время чрезвычайно актуальной является задача определения технологических составляющих силы резания при различных видах обработки. Особенно это касается торцевого фрезерования фрезами со сферической рабочей частью, поскольку данный инструмент нашел широкое применение при изготовлении сложных поверхностей в условиях, когда применение другого инструмента исключено по причине невозможности обработки (наличие поднутрений, скосов, криволинейных поверхностей различных радиусов и проч.). Знание составляющих силы резания в данном случае необходимо для прогнозирования качества обработанной поверхности (при чистовой обработке), а также для расчетов на прочность самого инструмента (при тяжелых условиях работы, например, на обдирочных операциях).

Анализ публикаций по данной теме [1] показывает, что целостный подход к решению данной задачи отсутствует. Зарубежные исследователи [2] рассчитывают силы путем умножения так называемых коэффициентов силы резания на поправочные коэффициенты, учитывающие особенности рассматриваемого вида обработки. Коэффициенты силы резания определяют из экспериментов по ортогональному резанию. Поправочные коэффициенты также являются эмпирическими данными. Использование такого подхода приводит к значительным погрешностям расчетных величин сил. Поэтому необходимо разработать алгоритм, позволяющий определять силы резания с достаточной точностью независимо от вида обработки.

Сложность определения силы резания при работе сферических фрез обусловлена рядом особенностей конструкции данного инструмента и кинематики процесса резания.

В первую очередь, это переменность сечения среза, как на дуге контакта, так и по длине режущей кромки. То есть, в каждой точке режущей кромки i -го зуба, положение которой характеризуется углом φ_{ij} (а положение самого зуба на дуге контакта определяется углом ψ_i), толщина среза определяется как

$$a_{ij} = S_z \cdot \sin \psi_i \cdot \sin \varphi_{ij} \quad (1)$$

Кроме того, скорость резания в каждой точке режущей кромки также переменна, что связано с изменением диаметра. В частности, на пересечении сферы и оси фрезы имеется точка с нулевой окружной скоростью резания (рис.1).

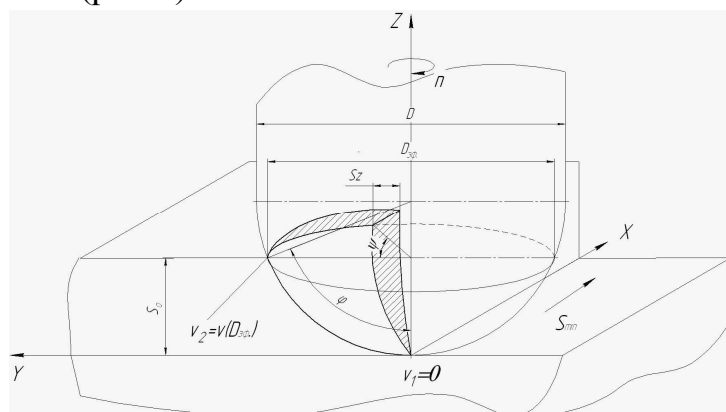


Рисунок 1 – Переменное сечение среза при работе сферической фрезы

Причем при отсутствии стружки деформация обрабатываемого материала не равна нулю. В совокупности с зоной проскальзывания, которая имеет место в силу малых толщин среза (несмотря на то, что скорость в точках режущей кромки, находящихся в зоне проскальзывания, не равна нулю, материал детали не срезается, а подминается под режущую кромку), наличие этой точки приводит к значительному ухудшению качества обработанной поверхности. Поэтому на практике стараются вывести эту точку из зоны резания. Для этого фрезу наклоняют в направлении движения подачи или в направлении, перпендикулярном этому движению. В случае положительного угла наклона точка с нулевой скоростью резания находится за пределами рабочего участка зуба фрезы, а в случае отрицательного угла эта точка попадает в зону обработки, однако она не приходится на нулевую толщину среза, как в случае с нулевым углом наклона (рис.2).

Переменность скорости резания также приводит к тому, что степень деформации ε_{ij} в каждой точке режущей кромки разная, а значит, и удельные силы, возникающие в процессе резания, в каждой точке режущей

кромки тоже разные, они уменьшаются по мере увеличения скорости – от центра к периферии фрезы. Кроме того, с изменением окружной скорости (в данном случае - скорости главного движения) при постоянной скорости вспомогательного движения (движения продольной подачи) изменяется кинематический передний угол γ_k , что также приводит к изменению степени деформации.

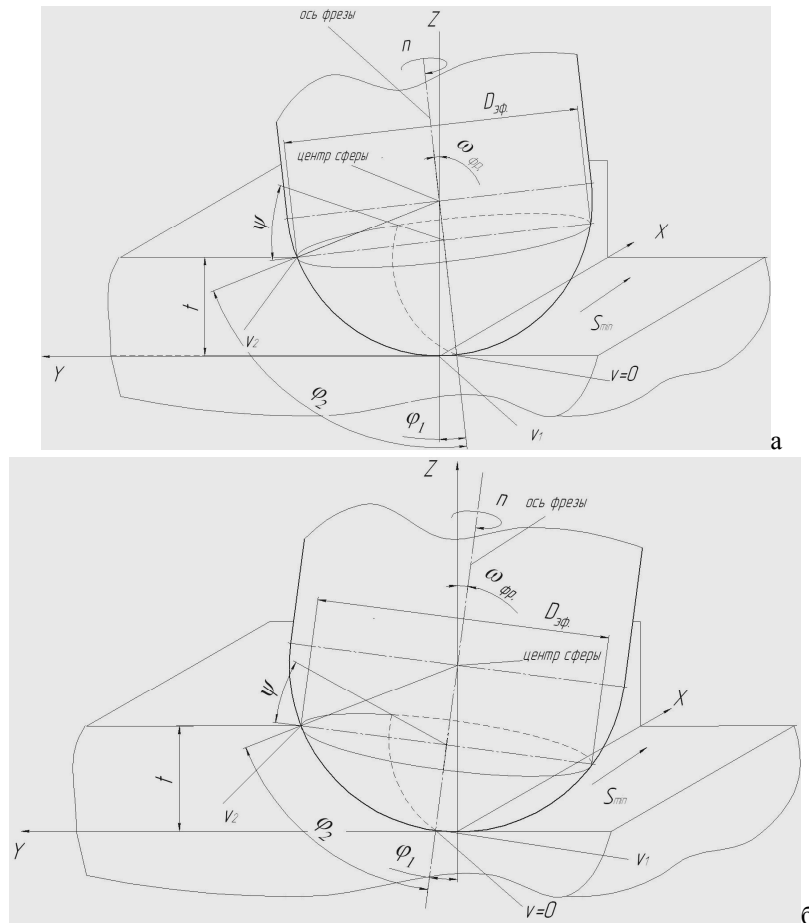


Рисунок 2 – Наклон сферической фрезы в процессе работы (а – к обрабатываемой поверхности; б - от обрабатываемой поверхности)

Все вышеперечисленные особенности должны быть учтены при определении составляющих силы резания. Однако, поскольку количество их велико, целесообразно сначала провести анализ степени их влияния на конечный результат расчета. Так, например соотношение скоростей главного и вспомогательного движений при данном виде обработки таково, что изменением скорости главного движения можно пренебречь, и использовать в расчете величину статического переднего угла, приняв его значение постоянным.

Рассмотрим задачу определения составляющих силы резания на примере наиболее простого варианта обработки – резания сферической фрезой с прямым зубом при угле наклона фрезы, равном 0 ($\omega_{фр.} = 0$) (рис.1). Положение каждого зуба характеризуется углом ψ_i на дуге контакта. Угол контакта определяется аналогично цилиндрическому фрезерованию

$$\theta = \arccos(1 - 2S_r / D_{эф.}), \quad (2)$$

где S_r - радиальная подача, мм; $D_{эф.}$ - эффективный диаметр, мм.

$$D_{эф.} = 2\sqrt{S_o \cdot (D - 2S_o)}, \quad (3)$$

где S_o - осевая подача, мм; D – диаметр фрезы, мм.

Тогда угол, определяющий длину режущей кромки зуба, участвующую в работе, рассчитываем так

$$\varphi = \arccos\left(\frac{D - 2S_o}{D}\right). \quad (4)$$

Среднюю скорость на зубе определяем интегрированием скорости в точке по длине кромки

$$\bar{v}_i = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} v_{\max} \sin \varphi_{ij} d\varphi = v_{\max} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2), \quad (5)$$

где v_{\max} - скорость в точке, расположенной на диаметре D , м/мин; φ_1, φ_2 - углы, определяющие границы рабочего участка режущей кромки, град;

$$v_{\max} = \frac{\pi D n}{1000},$$

где n - частота вращения фрезы, об/мин

Для случая, когда угол наклона фрезы равен 0: $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = \varphi$. Тогда средняя скорость на зубе согласно формуле (5) равна

$$\bar{v}_i = \int_0^{\varphi} v_{\max} \sin \varphi_{ij} d\varphi = v_{\max} (1 - \cos \varphi).$$

Поскольку, как упоминалось выше, с изменением скорости степень деформации срезаемого слоя также изменяется, целесообразно в расчетах использовать среднюю степень деформации по длине режущей кромки,

величина которой $\bar{\varepsilon} = \varepsilon(\bar{v})$ определяется по методике, подробно изложенной в работе [3].

В остальном составляющие силы резания при фрезеровании сферическими фрезами определяются аналогично цилиндрическим фрезам. Схема сил, действующих на зуб сферической фрезы, условно показана на рис.3.

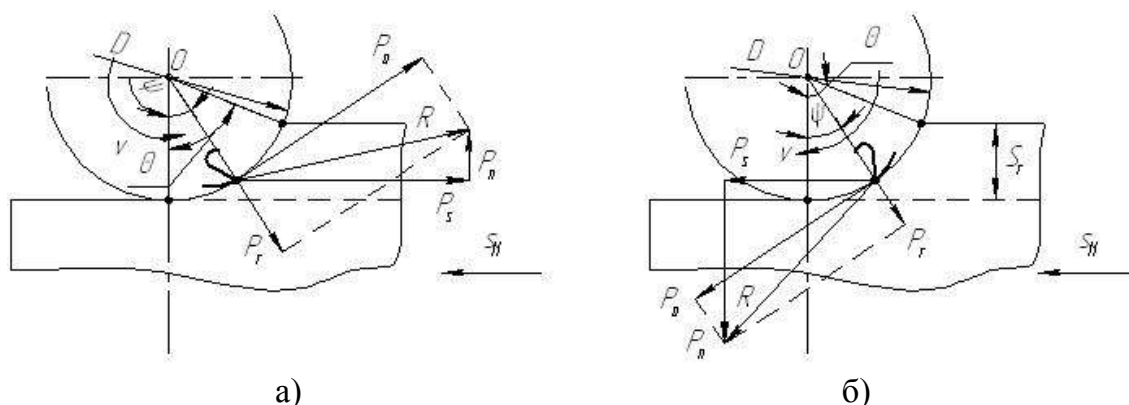


Рисунок 3 – Схема сил, действующих при работе прямого зуба сферической фрезы (а - встречное фрезерование, б – попутное фрезерование) (упрощенно)

Согласно методике [4] запишем выражения для окружной и радиальной составляющих силы на i -ом зубе фрезы, расположенном на угле ψ_i на дуге контакта:

$$P_{O_i} = B \left(C_{III} S_z \sin \psi_i \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi + C_\rho + C_h \right) = R\varphi \left(C_{III} S_z \sin \psi_i \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi + C_\rho + C_h \right) \quad (6)$$

$$P_{R_i} = B \left(U_{III} S_z \sin \psi_i \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi + U_\rho + U_h \right) = R\varphi \left(U_{III} S_z \sin \psi_i \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi + U_\rho + U_h \right) \quad (7)$$

где C_{III}, U_{III} - удельные силы на передней поверхности; C_ρ, U_ρ - удельные силы, действующие на радиус округления режущей кромки со стороны передней поверхности инструмента; C_h, U_h - удельные силы, действующие на площадку износа по задней поверхности; B - длина режущей кромки, мм.

$$B = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} R d\varphi = R \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) = R\varphi \quad (8)$$

Методика определения удельных сил, действующих на зуб фрезы, также подробно описана в работе [4].

Как видно из рисунка 3, первая составляющая равнодействующей силы резания (совпадающая с вектором скорости резания) – это окружная сила P_o , а вторая – перпендикулярная ей радиальная сила P_r . Следовательно, разложив векторную сумму этих двух сил на соответствующие направления, получим еще две технологические составляющие силы резания – силу подачи P_s и силу отжима P_n .

Тогда

$$P_{si} = \pm P_{oi} \cos \psi_i + P_{ri} \sin \psi_i \quad (9)$$

$$P_{ni} = \pm P_{oi} \sin \psi_i - P_{ri} \cos \psi_i \quad (10)$$

Верхние знаки в формулах (9) и (10) соответствуют случаю встречного фрезерования, нижние – попутного.

Имея зависимости для определения сил, действующих на один зуб фрезы, можно рассчитать мгновенные значения составляющих силы резания, действующей на фрезу. В общем виде формула имеет вид

$$P_k = \sum_{i=1}^m P_{ki}, \quad (11)$$

где P_k - сила, действующая на фрезу в заданном направлении k , Н; P_{ki} - сила, действующая на i -ый зуб фрезы в заданном направлении k , Н; m – количество одновременно работающих зубьев,

$$m = \frac{\theta}{\beta},$$

где $\beta = \frac{2\pi}{z}$ - угловой шаг зубьев фрезы.

При расчете сил, действующих на сферическую фрезу с винтовым зубом, а также при наклоне сферы в процессе работы, необходимо учитывать величины заданных углов ω и $\omega_{фр.}$ соответственно.

Список литературы: 1. Внуков Ю.Н., Саржинская А.Г. Анализ особенностей различных подходов при аналитическом расчете сил резания // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар.науч.-техн.сб. –Харьков: НТУ «ХПИ», 2008.- Вып.74. - С.31-56. 2. Y. Altintas, E.Shamoto and other. Analytical prediction of stability lobes in ball and mill//Transactions of ASME.-Vol.121, November 1999, pages 586-592. 3. Внуков Ю.Н., Саржинская А.Г. Методика теоретического определения составляющих силы резания при токарной обработке// Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение.- К.: НТУУ «КПИ».-2007.-№ 52.-С.377-384. 4. Внуков Ю.Н., Саржинская А.Г. Методика теоретического определения составляющих силы резания при фрезерной обработке// Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ» - 2009 - №77 –С.31-46.