

УДК 621.919.1.04 + 621.9.01

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗОНЫ РЕЗАНИЯ ПРИ МНОГОКООРДИНАТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

В.А. Батуев, В.В. Батуев

На основе аналитической геометрии в пространстве разработана математическая модель зоны резания при многокоординатном фрезеровании. Данная математическая модель позволяет производить расчет толщины среза при обработке пространственно-сложных поверхностей концевыми радиусными фрезами, учитывая трахоидальный характер движения их режущих кромок.

Ключевые слова: толщина среза; фрезерование; зона резания; многокоординатная обработка.

Непрерывное изменение геометрии зоны резания при фрезеровании пространственно-сложных поверхностей вызвано не только влиянием конфигурации обрабатываемой поверхности, но и сложным перемещением в пространстве инструмента, имеющего криволинейную режущую кромку.

В работах исследователей для определения параметров срезаемого слоя при фрезеровании (толщины среза, угла контакта, ширины фрезерования) рассматривалась кинематическая схема, основанная на сочетании двух равномерных движений: вращательного и поступательного, совершаемых в плоскости, перпендикулярной оси фрезы. Такой подход осуществлялся при изучении относительно простых случаев фрезерования различными видами инструмента, включая и фасонный, для одно и двухкоординатной обработки.

Для трехкоординатной обработки до исследований, проведенных авторами настоящей работы, не было строгих зависимостей, однозначно определяющих связь конфигурации обрабатываемой поверхности, а следовательно, и направления вектора подачи в пространстве, с параметрами срезаемого слоя. В свою очередь параметры срезаемого слоя оказывают большое влияние на силы резания. В связи с этим необходимо с учетом кинематики фрезерования пространственно-сложных поверхностей определить теоретические зависимости для расчета основных параметров геометрии зоны резания (толщины среза, положения и длины активной части режущей кромки) с целью количественного анализа изменения последних и использования при разработке расчетно-аналитического метода определения сил резания.

Для обработки пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ наиболее употребительны концевые радиусные фрезы. В данной работе приведены результаты исследования процесса фрезерования радиусной частью инструмента, как менее всего изученного, хотя разработанная методика и результаты исследования могут быть использованы для фрез с любым профилем.

При фрезеровании радиусной частью криволинейное лезвие фрезы срезает стружку серповидной формы с переменной толщиной. Толщина срезаемого слоя является одним из важнейших элементов фрезерования, которая определяется как расстояние между двумя последовательными положениями трахоидальной траектории движения точки лезвия фрезы, измеряемое в сечениях, перпендикулярных к профилю инструмента. С некоторым приближением, для упрощения математического описания размеров срезаемого слоя при фрезеровании, трахоиду заменяют дугами окружности. В этом случае, при фрезеровании горизонтальной плоскости, когда ось фрезы перпендикулярна вектору движения подачи (рис. 1), текущее значение толщины срезаемого слоя для произвольной точки M криволинейной режущей кромки определяется из известного соотношения:

$$a_M = S_z \cdot \sin \psi_M \cdot \sin \varphi_M, \quad (1)$$

где S_z – подача на зуб; ψ_M – значение угла контакта зуба фрезы для точки M ; φ_M – угол профиля в рассматриваемой точке режущей кромки.

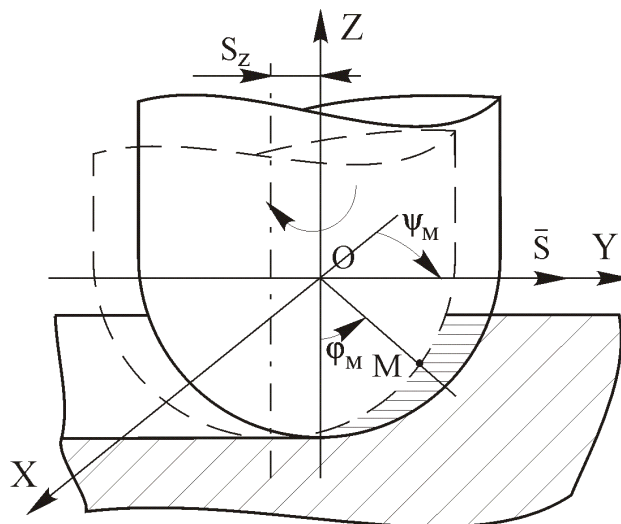


Рис. 1. Схема фрезерования горизонтальной плоскости

При фрезеровании наклонной поверхности (рис. 2) движение подачи направлено под некоторым углом ω к горизонтальной плоскости. В этом случае толщина среза не может быть определена по общеизвестной формуле (1), так как не выполняется условие перпендикулярности вектора \bar{S} к оси вращения инструмента, для которого она получена. Поэтому, рассматривая произвольную точку пересечения режущей кромки с секущей плоскостью, в которой необходимо определить толщину срезаемого слоя, следует повернуть систему координат XYZ на угол ω таким образом, чтобы ось OZ' оказалась перпендикулярной вектору \bar{S} (см. рис. 2), и предположить, что OZ' является осью вращения фрезы. Следует отметить, что направление измерения толщины среза для любой точки радиусной части фрезы при проведенных преобразованиях сохраняется.

На основе указанного подхода авторами получена формула для расчета толщины среза для любой точки криволинейной режущей кромки в нормальном сечении при фрезеровании наклонных поверхностей:

$$a_i = S_z \sqrt{1 - (\pm \sin \varphi_i \cdot \sin \psi_i \cdot \sin |\omega| + \cos \varphi_i \cdot \cos \omega)^2 - \sin^2 \varphi_i \cdot \cos^2 \psi_i}. \quad (2)$$

Знак (+) берется при схеме резания «вверх». Знак (–) при схеме резания «вниз». При угле $\omega = 0$, т. е. в случае, когда вектор \vec{S} совпадает с горизонтальной плоскостью, формула (2) принимает вид (1).

Из теории резания металлов известно, что траектория движения зуба фрезы представляет собой трахоиду. При отношениях скорости движения детали (подачи) к скорости вращения инструмента, имеющих место при фрезеровании, дуга трахоиды по форме весьма мало отличается от дуги окружности. Поэтому, для упрощения расчетов, трахоиду заменяют дугами окружности с диаметром равным диаметру фрезы. При этом ошибка от указанной замены не превышает одного процента. Формула (2) для определения толщины среза при объемном фрезеровании была выведена на основе данной упрощенной кинематической схемы, т.е. путем замены трахоид дугами окружности. Однако, особенностью обработки радиусной частью фрезы является то, что процесс резания в разных точках криволинейного лезвия протекает при различных скоростях. Причем скорость изменяется в широком диапазоне – от максимальной, в точке сопряжения радиусной части с цилиндрической (конической), до нулевой в точке оси фрезы. Изменение скорости оказывает существенное влияние на форму траекторий движения точек криволинейной режущей кромки. В свою очередь, форма траектории определяет толщину срезаемого слоя и длину контакта зуба с обрабатываемым материалом. Поэтому необходимо провести теоретические и экспериментальные исследования по выявлению количественных связей между изменением траектории и геометрией срезаемого слоя.

Для подтверждения влияния трахоидального характера движения точек режущей кромки радиусной части фрезы на форму срезаемого слоя и, как следствие, на длину контакта зуба с обрабатываемым материалом (путь зуба в металле были проведены эксперименты по измерению сил резания).

Анализируя результаты экспериментов было обнаружено, что при обработке паза радиусной частью двухзубой фрезы существует зона одновременной работы зубьев, расположенных через 180° , т. е. второй зуб вступил в работу тогда, когда первый еще продолжал резание. Следовательно, угол контакта зуба с припуском больше 180° . Экспериментальные данные также показали увеличение угла контакта с ростом подачи. При подаче на зуб $S_z = 0,05$ мм/зуб величина ψ равна 200° , а при подаче на зуб $S_z = 0,15$ мм/зуб – 220° . Таким образом, данные экспериментов через величину пути зуба в металле, подтверждают существенное влияние трахоид-

дального характера движения криволинейной режущей кромки фрезы на форму срезаемого слоя, которая в большей степени зависит от величины подачи и от скорости движения точек режущей кромки, определяемой их удалением от оси фрезы.

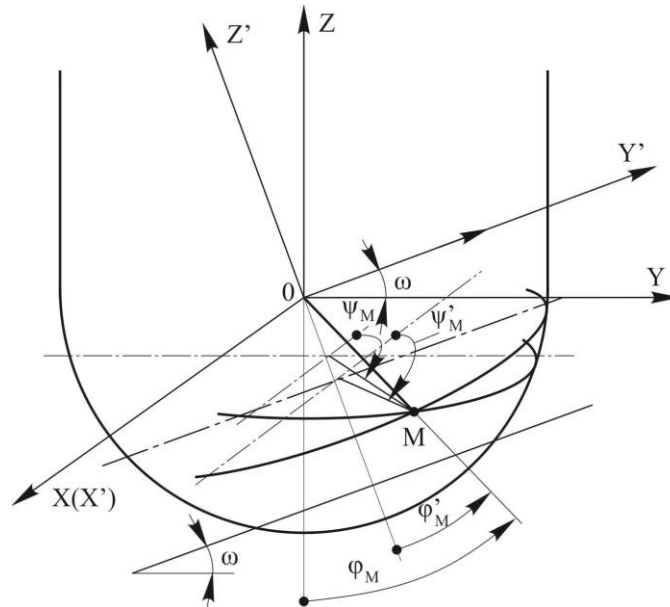


Рис. 2. Определение толщины среза при фрезеровании наклонных поверхностей концевыми радиусными фрезами

Траектория движения точек режущей кромки в зависимости от их положения на радиусной части инструмента меняется значительно. При сравнении углов контакта от начала резания до выхода из металла разных участков зуба фрезы выявлено, что точки режущей кромки, расположенные ближе к центру, вступают в работу раньше и заканчивают ее позднее чем точки, находящиеся на большем диаметре. Это объясняется различием их траекторий движения, которые определяют форму сечения среза. Не трудно заметить, что ближе к оси вращения фрезы трахоиды имеют форму, значительно отличающуюся от круглой. Следовательно, замена их дугами окружности для расчета толщины среза, может внести существенную погрешность. Это подтверждает необходимость учета в аналитических зависимостях влияния трахоидального характера движения точек криволинейной режущей кромки на размеры срезаемого слоя. Такие зависимости могут быть выведены для трех различных схем резания встречающихся при фрезеровании пространственно-сложных поверхностей.

1. Схема резания «вверх», когда угол $\alpha = 90^\circ - \omega$ между положительным направлением оси фрезы и вектором движения подачи меньше 90° . За положительное принято направление от конца фрезы к шпинделю.

2. Схема резания «вниз», когда угол α больше 90° .

3. Контурная схема, когда направление вектора движения подачи перпендикулярно оси вращения фрезы, т. е. $\alpha = 90^\circ$.

Для аналитического описания толщины срезаемого слоя при схеме резания «вверх» разработана расчетная схема (рис. 3), на которой изображены два последовательных положения режущей кромки фрезы.

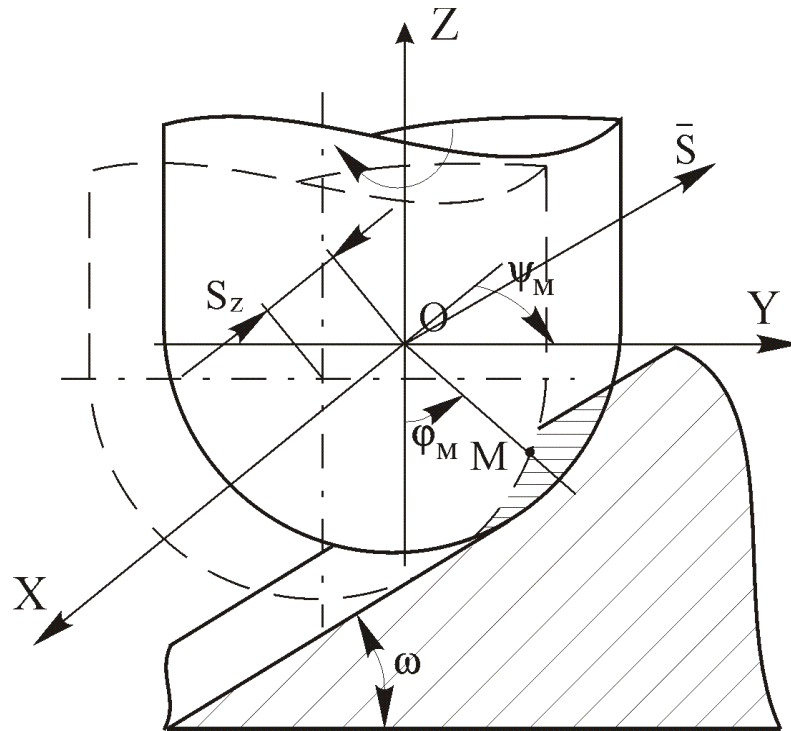


Рис. 3. Расчетная схема для определения толщины среза с учетом трахоидального характера движения точек криволинейной режущей кромки при фрезеровании «вверх»

На основе приведенной расчетной схемы получено трансцендентное уравнение (3) для определения текущего значения угла контакта λ предыдущего зуба фрезы с учетом трахоидального характера движения точек криволинейной режущей кромки:

$$2\pi \cdot \sqrt{R^2 - \left[\frac{S_z \cdot (2\pi + z\psi - z\lambda)}{2\pi} \cdot \left(\frac{\cos \omega \cdot \cos \lambda}{\sin(\lambda - \psi) \cdot \operatorname{tg} \phi} \mp \sin |\omega| \right) \right]^2} \times \quad (3)$$

$$\frac{S_z \cdot z \cdot \cos \omega \cdot \cos \psi}{\sin(\psi - \lambda)} + \frac{2\pi + z \cdot \psi}{z} = \lambda,$$

где z – количество зубьев фрезы; λ – текущие значения угла контакта первого и второго зубьев фрезы соответственно.

Знак (–) берется при схеме резания «вверх». Знак (+) при схеме резания «вниз». При контурной схеме в уравнения подставляется угол $\omega = 0$.

Таким образом, зная взаимосвязь двух последовательных положений режущей кромки, толщину среза, измеренную по нормали к поверхности резания, можно определить:

$$a = R - \frac{S_z \cdot (2\pi + z\psi - z\lambda) \cdot \cos \omega \cdot \cos \lambda}{2\pi \cdot \sin(\lambda - \psi) \cdot \sin \varphi}. \quad (4)$$

Анализируя уравнения (3) и (4) видим, что толщина среза зависит не только от текущего значения угла контакта ψ и угла профиля φ , но и от радиуса фрезы R , подачи на зуб S_z , количества зубьев z и от угла наклона обрабатываемой поверхности в направлении вектора движения подачи. Для количественной оценки влияния перечисленных параметров и трахоидального характера движения точек криволинейной режущей кромки на толщину срезаемого слоя, проведен анализ результатов расчетов по зависимостям (2) и (4).

Анализ результатов показал, что в случае замены трахоид дугами окружностей относительная погрешность расчетной толщины среза достигает 50 % в точках криволинейной режущей кромки, находящихся вблизи оси вращения фрезы. По мере удаления точек от оси эта погрешность уменьшается и в местах сопряжения радиусной части с цилиндрической не превышает 1 %.

Таким образом, трахоидальный характер движения точек криволинейной режущей кромки, находящихся вблизи оси вращения фрезы, оказывает существенное влияние на фактическую величину толщины среза. Поэтому данную особенность необходимо учитывать при разработке аналитических силовых зависимостей объемного фрезерования.

[К содержанию](#)