

УДК 658.512

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ КРОМОК ВНУТРЕННЕЙ ДИСКОВОЙ ФРЕЗЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ ВИНТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

М. И. МИХАЙЛОВ, Д. В. НИКИТЕНКО

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Ключевые слова: внутренние фрезы, винтовые поверхности, формообразующие кромки, моделирование.

Введение

Современное машиностроение характеризуется повышением требований к геометрическим параметрам качества изготовления поверхностей деталей – точности получаемых размеров, отклонением формы, взаимному расположению поверхностей, их волнистости и шероховатости. Именно эти параметры определяют контактные деформации и жесткость стыков, характеризуют трение и износ поверхностей, герметичность соединений, прочность сцепления с покрытием и т. п. [1], [2]. При этом необходимо обеспечить не только заданные требования качества поверхности, но и их стабильность, которая определяется характеристиками параметров геометрии поверхности детали, задаваемыми законом их распределения.

Геометрия поверхности детали определяется ее топографией. Математическое описание формирования топографии поверхности при механической обработке затрудняется большим количеством влияющих на нее параметров.

В то же время математическое моделирование операций механической обработки по сравнению с экспериментальными исследованиями позволяет получать большее количество информации и сократить время на исследования. Эти преимущества приводят к широкому внедрению моделирования в технологические расчеты. Однако разнородность существующих моделей технологических систем и процессов, а также отсутствие единого подхода к их разработке значительно затрудняет внедрение этих моделей.

Так, С. Л. Леонов и В. Н. Некрасов используют метод математического моделирования при формировании топографии поверхности торцовым фрезерованием, при этом они представляют этот процесс в виде «черного ящика» [1], [3], [4].

Кроме того, топография обработанных поверхностей зависит от расположения формообразующей кромки фрезы в корпусе инструмента и траектории ее движения, на которую, в свою очередь, влияют параметры режима резания и геометрические параметры режущих кромок фрезы [2], [5], [6].

Одним из высокопроизводительных методов обработки цилиндрических и винтовых поверхностей деталей машин является метод фрезерования внутренними фрезами [7], [8], схема которого представлена на рис. 1. Он позволяет обрабатывать цилиндрические поверхности валов, резьбы ходовых винтов станков, тяговых винтов прессов, червяки червячных передач и другие детали, имеющие винтовые поверхности. Несмотря на то, что этот метод фрезерования известен с 50-х гг. XX в. [9], в последнее время к нему проявляется повышенный интерес [10]–[12].

Кроме того, сложные поверхности часто аппроксимируются технологичными линиями.

Целью работы является математическое моделирование формообразующих кромок внутренних фрез при обработке винтовых поверхностей.

Основная часть

Направляющая поверхности детали – винтовая. В этом случае требуется перемещение полученных аппроксимирующих прямых образующей поверхности детали по винтовой линии.

Профиль формообразующих кромок формировался поэтапно.

На первом этапе получали уравнения аппроксимирующих прямых в начальном положении образующей. Для этого выбирались две системы координат – $X_1Y_1Z_1$ (местная) и XYZ (рис. 1, а), которые в начальный момент обработки совпадали.

Тогда уравнения, описывающие образующую, имеют вид:

$$Z = -l \cos \lambda + Z_0; \quad Y = Y_0 + l \sin \lambda, \quad (1)$$

где l – текущая координата точки пересечения аппроксимирующих прямых до рассматриваемой точки M .

На втором этапе формировали поверхность детали. Для этого перемещалась аппроксимирующая прямая по винтовой направляющей поверхности детали и формировалась часть этой поверхности. Вместе с аппроксимирующей прямой будет перемещаться подвижная система координат XYZ , которая также будет совершать винтовое движение относительно системы $X_1Y_1Z_1$. Формулы перехода от системы XYZ к системе $X_1Y_1Z_1$ имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= X \cos \psi - Y \sin \psi; \\ Y_1 &= X \sin \psi + Y \cos \psi; \\ Z_1 &= Z + P\psi, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где P – параметр винтовой поверхности детали; ψ – угол поворота системы XYZ относительно $X_1Y_1Z_1$.

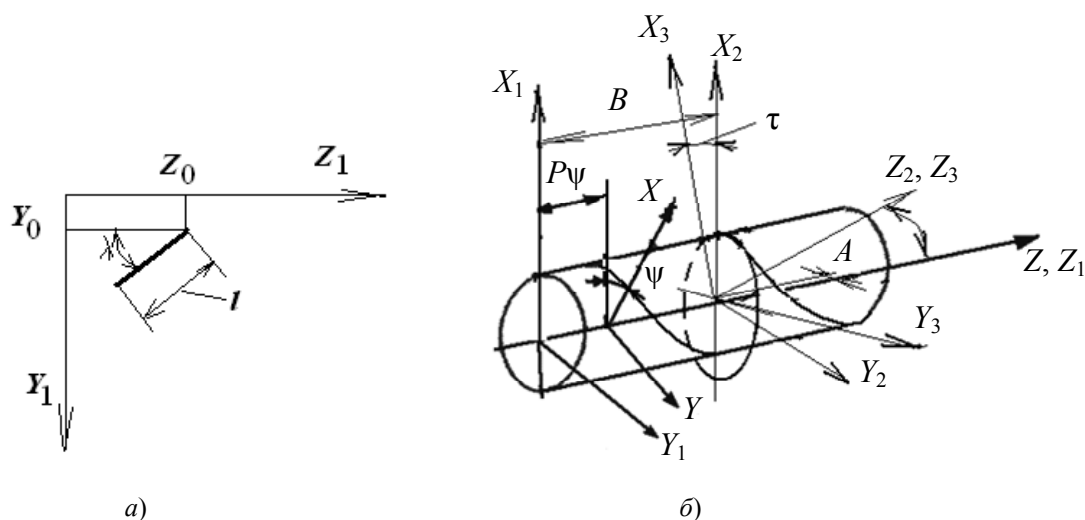


Рис. 1. Расчетная схема формообразования винтовой поверхности

Подставив из системы (1) выражения X , Y и Z в систему (2), получили уравнения винтовой кинематической поверхности детали:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= -Y_0 \sin \psi - l \sin \lambda \sin \psi; \\ Y_1 &= Y_0 \cos \psi + l \cos \psi \sin \lambda; \\ Z_1 &= Z_0 - l \cos \lambda + P\psi. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

На третьем этапе определялась нормаль к кинематической поверхности детали:

$$\bar{N} = \frac{\partial \bar{F}}{\partial l} \times \frac{\partial \bar{F}}{\partial \psi}, \quad (4)$$

где $F = F(l, \psi)$ – уравнение поверхности детали.

Для получения более удобных выражений вектор \bar{N} раскладывается по осям координат на \bar{N}_{x_1} , \bar{N}_{y_1} , \bar{N}_{z_1} :

$$\left. \begin{aligned} \bar{N}_{x_1} &= \frac{\partial Y_1}{\partial l} \frac{\partial Z_1}{\partial \psi} - \frac{\partial Z_1}{\partial l} \frac{\partial Y_1}{\partial \psi}; \\ \bar{N}_{y_1} &= \frac{\partial Z_1}{\partial l} \frac{\partial X_1}{\partial \psi} - \frac{\partial X_1}{\partial l} \frac{\partial Z_1}{\partial \psi}; \\ \bar{N}_{z_1} &= \frac{\partial X_1}{\partial l} \frac{\partial Y_1}{\partial \psi} - \frac{\partial Y_1}{\partial l} \frac{\partial X_1}{\partial \psi}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Подставив выражения (3) в уравнение (5), получили:

$$\left. \begin{aligned} N_{x_1} &= -(Y_0 + l \sin \lambda) \cos \lambda \sin \psi + P \sin \lambda \cos \psi; \\ N_{y_1} &= (Y_0 + l \sin \lambda) \cos \lambda \cos \psi + P \sin \lambda \sin \psi; \\ N_{z_1} &= (Y_0 + l \sin \lambda) \sin \lambda. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Дисковая внутренняя фреза является телом вращения, поэтому нормаль в точке касания инструментальной поверхности и поверхности детали будет пересекать ось фрезы. Координаты точки центра фрезы в системе $X_1 Y_1 Z_1$ будут равны (рис. 1, б):

$$X_{1_{0_2}} = 0; \quad Y_{1_{0_2}} = -A; \quad Z_{1_{0_2}} = B. \quad (7)$$

Затем выбирался на оси фрезы единичный вектор \bar{k}_{0_2} . Проекция его на оси координат в системе $X_1 Y_1 Z_1$ детали имеют вид:

$$k_{0_{2x}} = 0; \quad k_{0_{2y}} = -\sin \sigma; \quad k_{0_{2z}} = \cos \sigma. \quad (8)$$

Затем из условия пересечения векторов \bar{N} и \bar{k}_{0_2} получали выражение:

$$\begin{aligned} (X_1 - X_{1_{0_2}})(\bar{N}_{y_1} \bar{k}_{0_{2z}} - \bar{N}_{z_1} \bar{k}_{0_{2y}}) - (Y_1 - Y_{1_{0_2}})(\bar{N}_{x_1} \bar{k}_{0_{2z}} - \bar{N}_{z_1} \bar{k}_{0_{2x}}) + \\ + (Z_1 - Z_{1_{0_2}})(\bar{N}_{x_1} \bar{k}_{0_{2y}} - \bar{N}_{y_1} \bar{k}_{0_{2x}}) = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Подставив (6)–(8) в уравнение (9), получили математическую модель контактной линии в системе координат $X_1Y_1Z_1$:

$$\begin{aligned} & X_1((Y_0 + l \sin \lambda) \cos \lambda \cos \psi \cos \sigma + P \sin \lambda \sin \psi \cos \sigma) - \\ & - (Y_1 + A)(P \sin \lambda \cos \psi \cos \sigma - (Y_0 + l \sin \lambda) \cos \lambda \sin \psi \cos \sigma) - \\ & - (Z_1 - B)(P \sin \lambda \cos \psi \sin \sigma - (Y_0 + l \sin \lambda) \cos \lambda \sin \psi \sin \sigma) = 0. \end{aligned}$$

На четвертом этапе определялась исходная инструментальная поверхность. Для этого записывалась аппроксимированная образующая поверхности детали в системе $X_2Y_2Z_2$, связанной с фрезой. В этом случае уравнения перехода из системы $X_1Y_1Z_1$ в $X_2Y_2Z_2$ можно записать в виде:

$$\left. \begin{aligned} X_2 &= X_1; \\ Y_2 &= Y_1 \cos \sigma + Z_1 \sin \sigma + (B \sin \sigma + A \cos \sigma); \\ Z_2 &= -Y_1 \sin \sigma + Z_1 \cos \sigma + (B \cos \sigma - A \sin \sigma), \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где A – расстояние между осями X_2 и X_1 в направлении Y_1 ; σ – угол поворота оси Z_2 до совмещения с Z_1 вокруг оси X_2 .

Исходная поверхность дискового инструмента образовывалась круговым движением линии (10) относительно Z_2 . Для записи уравнения искомой круговой поверхности ввелась условно неподвижная система координат $X_3Y_3Z_3$, в которой будет поворачиваться $X_2Y_2Z_2$ вместе с характеристикой. Формулы перехода от системы $X_2Y_2Z_2$ к $X_3Y_3Z_3$ будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} X_3 &= X_2 \cos \tau - Y_2 \sin \tau; \\ Y_3 &= X_2 \sin \tau + Y_2 \cos \tau; \\ Z_3 &= Z_2. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Подставив (10) в (11), получили:

$$\left. \begin{aligned} X_3 &= X_1 \cos \tau - Y_1 \cos \sigma \sin \tau - Z_1 \sin \sigma \sin \tau - (B \sin \sigma + A \cos \sigma \sin \tau); \\ Y_3 &= X_1 \sin \tau + Y_1 \cos \sigma \cos \tau + Z_1 \sin \sigma \cos \tau + (B \sin \sigma + A \cos \sigma) \cos \tau; \\ Z_3 &= -Y_1 \sin \sigma + Z_1 \cos \sigma + (B \cos \sigma - A \sin \sigma). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Подставив в (12) значения параметров X_1 , Y_1 , Z_1 , получили уравнения исходной инструментальной поверхности:

$$\begin{aligned} X_3 &= (-Y_0 \sin \psi - l \sin \lambda \sin \psi) \sin \tau - (Y_0 \cos \psi + l \sin \lambda \cos \psi) \cos \sigma \sin \tau - \\ & - (Z_0 - l \cos \lambda + P\psi) \sin \sigma \sin \tau - (B \sin \sigma + A \cos \sigma \sin \tau); \\ Y_3 &= (-Y_0 \sin \psi - l \sin \lambda \sin \psi) \sin \tau + (Y_0 \cos \psi + l \sin \lambda \cos \psi) \cos \sigma \cos \tau + \\ & + (Z_0 - l \cos \lambda + P\psi) \sin \sigma \cos \tau + (B \sin \sigma + A \cos \sigma) \cos \tau; \\ Z_3 &= (Z_0 - l \cos \lambda + P\psi) \cos \sigma - (Y_0 \cos \psi + l \sin \lambda \cos \psi) \sin \sigma + (B \cos \sigma - A \sin \sigma). \end{aligned}$$

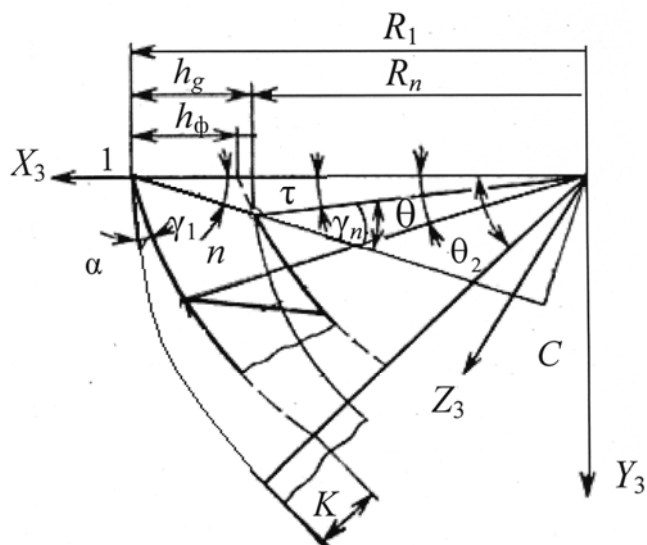


Рис. 2. Расчетная схема формообразования винтовой поверхности

Учитывая, что каждая точка характеристики определяется радиусом R_n , а исходная поверхность образуется вращением характеристики, исходную поверхность инструмента можно записать:

$$X_\phi = R_n \sin \tau; \quad Y_\phi = R_n \cos \tau; \quad Z_\phi = Z_2, \quad (13)$$

где R_n – текущий радиус точки характеристики; τ – угол поворота системы координат вместе с характеристикой относительно неподвижной системы, связанной с фрезой (см. рис. 1, б); Z_2 – текущее значение аппликаты Z_ϕ , в плоскости которой находится R_n :

$$R_n = \sqrt{X_2^2 + Y_2^2}, \quad (14)$$

где X_2, Y_2 определяют по уравнениям (10).

Для образования режущей кромки зуба фрезы ее исходная поверхность, определяемая системой уравнения (13), пересекалась плоскостью передней грани $I-C$ (рис. 2), которая образует положительный передний угол γ_1 в точке зуба, лежащей на наибольшем радиусе фрезы R_1 .

Уравнение передней поверхности:

$$X_\phi = (R_n - Y_\phi) \operatorname{tg} \gamma_1; \quad (15)$$

$$Z_\phi = Z_2.$$

Подставив (13) в (15) и произведя некоторые преобразования, получили связь между углом τ и радиусом R_n :

$$\tau = \arcsin \left(\frac{R_1 \sin \gamma_1}{R_n} \right) - \gamma_1. \quad (16)$$

Уравнения (13) и (15) описывают режущую кромку зубьев фрезы.

Заключение

Получена математическая модель формообразующих кромок внутренней дисковой фрезы на основе преобразования систем координат и линейной аппроксимации образующей поверхности детали с ее винтовой направляющей, которая позволяет автоматизировать процесс проектирования внутренних фрез.

Литература

1. Леонов, С. Л. Обеспечение требуемого микрорельефа поверхности при фрезерной обработке основы для нанесения покрытия / С. Л. Леонов // Обработка металлов. – 2008. – № 1. – С. 4–7.
2. Михайлов, М. И. Сборный металлорежущий механизированный инструмент: Ресурсосберегающие модели и конструкции / М. И. Михайлов ; под ред. Ю. М. Плещачевского. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 339 с. : ил.
3. Леонов, С. Л. Основы создания имитационных технологий прецизионного формообразования / С. Л. Леонов, А. Т. Некрасов. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2006. – 198 с.
4. Леонов, С. Л. Конструирование моделей для расчета шероховатости и топографии обработанных поверхностей / С. Л. Леонов, Е. Ю. Хоменко // Ползунов. вестн. – 2008. – № 1/2. – С. 170–174.
5. Михайлов, М. И. К вопросу о методике моделирования кинематических поверхностей, сформированных режущим инструментом по различным схемам формообразования / М. И. Михайлов // Машиностроение : сб. науч. тр. – Минск, 2000. – Вып. 16. – С. 125–132.
6. Михайлов, М. И. Моделирование точности сборного механизированного инструмента / М. И. Михайлов // Современ. проблемы машиноведения : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2006. – С. 88–89.
7. Виксман, Е. С. Скоростное нарезание резьб и червяков (вихревое нарезание вращающимися резцами) / Е. С. Виксман. – М. : Машиностроение, 1966. – 91 с.
8. Розенберг, С. А. Охватывающее фрезерование / С. А. Розенберг. – М. : Тип. им. Воровского, 1950. – 36 с.
9. Левин, Б. Г. Скоростной метод нарезания резьбы / Б. Г. Левин, А. М. Фраткин. – М. : Ленингр. отд-ние и 1-я тип. Машгиза, 1948. – 41 с.
10. Wehmann, R. The Whirling Process for Improved Worm Gears 2003 / R. Wehmann // Gear Solutions Magazine. – 2003. – Oktober. – Mode of access: http://www.gearsolutions.com/media/uploads/assets/Digital_Editions/2003Digfiles/1003/GearSolutions1003.pdf. – Date of access: 10.10.2017.
11. Foitzik, B. Viel Wirbel um Qualität WB / B. Foitzik // Werkstatt + Betrieb. – 2015. – № 9. – Mode of access: <https://www.werkstatt-betrieb.de/wb-zeitschrift/archiv/artikel/wirbelmaschinen-industrie-4-0-inbetriebnahme-zuverlaessigkeit-1155128.html>. – Date of access: 10.10.2017.
12. Плотников, Ф. А. Повышение эффективности технологии обработки наружных винтовых канавок трения качения : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Ф. А. Плотников. – М., 2015. – 127 с.

Получено 04.06.2018 г.