



Обработка металлов

(технология • оборудование • инструменты)

 Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov


Теоретическое исследование кривизны обработанной поверхности при косоугольном фрезеровании сборными фрезами

 Вадим Куц^{а, *}, Сергей Чевычелов^б

Юго-Западный государственный университет, ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0002-3244-1359>, kuc-vadim@yandex.ru, ^б <https://orcid.org/0009-0006-8958-2191>, tschsa@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.914

История статьи:

 Поступила: 13 марта 2023
 Рецензирование: 29 марта 2023
 Принята к печати: 15 апреля 2023
 Доступно онлайн: 15 июня 2023

Ключевые слова:

 Метод обката
 Сборная фреза
 Косоугольное фрезерование
 Кривизна поверхности
 Главные радиусы кривизны

Благодарности

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнауки № 13.ЦКП.21.0034).

АННОТАЦИЯ

Ведение. В статье рассматриваются методы обработки крупных деталей, имеющих криволинейные выпуклые поверхности с прямолинейной направляющей, на многокоординатных обрабатывающих центрах с ЧПУ по методу касания с дискретным движением подачи инструмента вдоль профиля детали. Показано, что основным недостатком данного метода является более низкая производительность, что связано с наличием дискретного перемещения инструмента между циклами его возвратно-поступательных движений, где величина дискретного перемещения инструмента при заданной точности обработки зависит от величины кривизны обрабатываемой поверхности. Для повышения производительности обработки предлагается использовать сборные дисковые фрезы, оснащённые сменными многогранными пластинами с прямолинейными режущими кромками. Их установка в корпусе фрезы с отличными от нуля углами наклона главной режущей кромки в сочетании с дополнительным поворотом фрезы при обработке вдоль направления поступательного движения подачи позволяет получать вогнутую поверхность и обеспечить более плотное прилегание производящей поверхности инструмента и обработанной поверхности детали. **Целью работы** является снижение погрешности аппроксимации профиля обрабатываемой детали при её обработке по методу касания с дискретным движением сборных дисковых фрез вдоль профиля и обеспечение вследствие этого возможности увеличения шага перемещения инструмента вдоль формируемого профиля для повышения производительности обработки. **Метод исследования:** геометрическая теория проектирования металлорежущих инструментов. **Результаты и обсуждение.** Установленные в работе закономерности позволили создать метод определения угла наклона главной режущей кромки СМП фрезы и углов поворота фрезы вдоль направления поступательного движения подачи при построчной обработке протяженных участков деталей с криволинейным профилем на многокоординатных станках с ЧПУ. Это позволяет за счет поворота фрезы обеспечить наилучшее прилегание ее производящей поверхности к обработанной поверхности в точке их контакта, а также обеспечить снижение погрешности аппроксимации обрабатываемого профиля и повысить производительность обработки за счет возможности увеличения шага перемещения инструмента.

Для цитирования: Куц В.В., Чевычелов С.А. Теоретическое исследование кривизны обработанной поверхности при косоугольном фрезеровании сборными фрезами // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 32–44. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-32-44.

Введение

Обработка крупных деталей, имеющих криволинейные выпуклые поверхности с прямолинейной направляющей, в настоящее время в условиях единичного, мелкосерийного и ремонтного производства осуществляется на многокоординатных обрабатывающих центрах

с ЧПУ ввиду экономической нецелесообразности применения специального оборудования. При этом формирование поверхности детали может выполняться по методу касания с непрерывным движением подачи инструмента вдоль профиля детали (рис. 1, а) или с дискретным движением инструмента (рис. 1, б).

В частности, при фрезеровании деталей с толщиной меньше высоты фрезы обработка может выполняться по методу касания с непрерывным движением подачи инструмента вдоль профиля детали (см. рис. 1, а). При фрезеровании деталей с большой толщиной может применяться метод

*Адрес для переписки

Куц Вадим Васильевич, д.т.н., доцент
 Юго-Западный государственный университет,
 ул. 50 лет Октября, 94,
 305040, г. Курск, Россия
 Тел.: 8 (903) 639-94-01, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

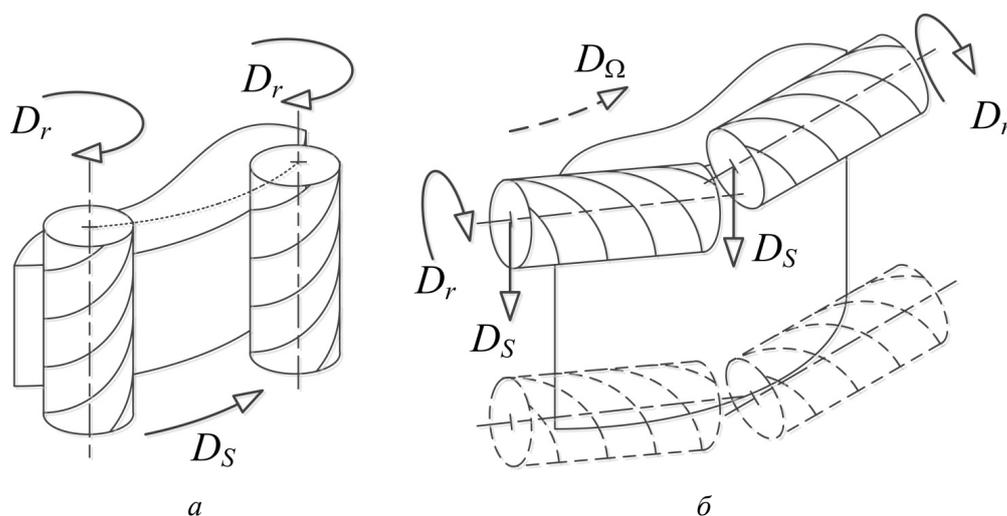


Рис. 1. Формирование поверхности детали методом касания с движением подачи инструмента:

a – непрерывным; b – дискретным

Fig. 1. The formation of the surface of the part by the touch method with the feed movement of the tool:

a – continuous; b – discrete

касания с дискретным движением подачи вдоль профиля детали (см. рис. 1, б), где фреза осуществляет циклические возвратно-поступательные движения подачи перпендикулярно профилю детали и смещается при каждом цикле вдоль профиля детали на заданную дискретную величину, зависящую от требуемой точности обработки. Примером таких деталей могут служить прямозубые крупномодульные зубчатые колёса с величинами модуля больше 9 мм и шириной зубчатого венца больше 50 мм, для которых обработка по первому методу будет затруднена.

Обработка деталей по методу касания с непрерывным движением подачи инструмента вдоль профиля детали получила широкое распространение, существует большое количество работ, посвященных этому вопросу [1–6]. Однако вопросы обработки по методу касания с дискретным движением подачи вдоль профиля детали ввиду меньшей распространённости профильных деталей с большой толщиной менее изучены [7–10]. Основным недостатком этого способа является более низкая производительность, что связано с наличием дискретного перемещения инструмента между циклами возвратно-поступательных движений, при этом величина дискретного перемещения инструмента Δ_Ω при заданной точности обработки зависит от величины кривизны обрабатываемой поверхно-

сти (рис. 2), что приводит к уменьшению производительности обработки.

Для повышения производительности обработки в этом случае целесообразно применять фрезы, имеющие вогнутую форму производящей поверхности, которая обеспечивает более плотное ее прилегание к обрабатываемой поверхности. Под производящей поверхностью понимается поверхность, образованная формообразующей режущей кромкой фрезы в результате осуществления ею главного движения, т. е. движения, определяющего скорость резания [11].

Однако применительно к конструкциям сборных дисковых или торцевых фрез, оснащенных сменными многогранными пластинами (СМП), можно констатировать, что отсутствуют СМП стандартной конструкции с вогнутой режущей кромкой. В работах [12–16] было установлено, что при вращении фрезы с установленной в корпусе СМП с прямолинейной режущей кромкой под углом наклона главной режущей кромки, отличным от нуля ($\lambda \neq 0$), производящая поверхность приобретает вогнутую форму, и с увеличением угла λ кривизна этой поверхности увеличивается. В работах [15, 16] также показывается, что кривизну производящей поверхности таких фрез можно повысить, повернув фрезу вдоль направления поступательного движения

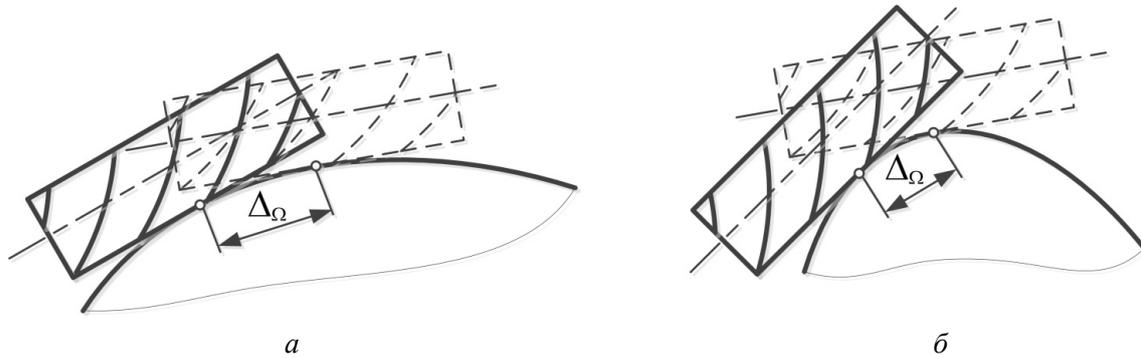


Рис. 2. Зависимость величины дискретного перемещения инструмента от кривизны профиля обрабатываемой поверхности:

a – при малой кривизне; *б* – при высокой кривизне

Fig. 2. The dependence of the value of the discrete tool movement on the curvature of the profile of the surface being processed:

a – at low curvature; *б* – at high curvature

подачи на величину угла ξ (реализовав схему косоугольного фрезерования), для чего предполагается использовать 5-координатные обрабатывающие центры. Таким образом, целесообразно разработать конструкцию фрезы с подбором угла наклона главной режущей кромки СМП, при котором будет обеспечено равенство кривизны производящей поверхности и наименьшей кривизны профиля выпуклой обрабатываемой поверхности, и путем поворота фрезы при фрезеровании на рассчитанный угол ξ обеспечивать это равенство вдоль всего профиля. Реализация такого подхода требует исследования влияния параметров фрезы (диаметра, угла наклона главной режущей кромки) и угла наклона фрезы вдоль направления поступательного движения подачи ξ на изменение кривизны обработанной поверхности (главных радиусов кривизны).

Из вышесказанного можно сформулировать **цель данного исследования** как снижение погрешности аппроксимации профиля обрабатываемой детали при ее обработке по методу касания с дискретным движением сборных дисковых или концевых фрез вдоль профиля и обеспечение вследствие этого возможности увеличения шага перемещения инструмента вдоль формируемого профиля для повышения производительности обработки.

Задачей является выполнение теоретического исследования изменения кривизны обработанной поверхности при косоугольном фрезеровании сборными фрезами, оснащенными СМП,

а также создание метода определения угла наклона главной режущей кромки СМП фрезы и углов поворота фрезы вдоль направления поступательного движения подачи, обеспечивающих наилучшее прилегание производящей поверхности фрезы и поверхности детали в точках их контакта.

Методика исследований

Выполним построение модели сборной фрезы номинальным диаметром d , состоящей из одной СМП, установленной в корпусе фрезы с главным углом в плане φ и углом наклона главной режущей кромки λ (рис. 3).

Уравнение режущей кромки СМП, определяющее производящую поверхность исследуемой фрезы, опишем в собственной системе координат $(X_1 Y_1 Z_1)$:

$$\bar{r}_1(t) = [t \ 0 \ 0 \ 1]^T, \quad (1)$$

где t – параметр длины режущей кромки СМП.

Уравнение режущей кромки СМП (1) последовательно преобразуем в систему координат корпуса фрезы $(X_4 Y_4 Z_4)$ с учетом заданного главного угла в плане (см. рис. 3, поз. 1), угла наклона главной режущей кромки (см. рис. 3, поз. 2) и диаметра фрезы (рис. 3, поз. 3)

$$\begin{aligned} \bar{r}_4(t) = & A_{43}^{\{2\}}(d/2) \cdot A_{32}^{\{5\}}(\lambda) \times \\ & \times A_{21}^{\{6\}}(\pi/2 - \varphi) \cdot \bar{r}_1(t), \end{aligned} \quad (2)$$

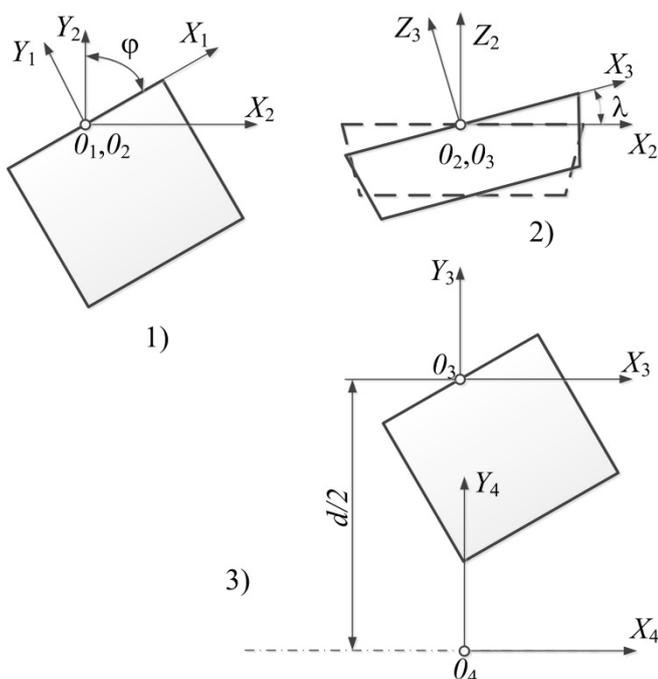


Рис. 3. Схема моделирования последовательной установки СМП в корпусе фрезы:

1 – установка главного угла в плане; 2 – установка угла наклона главной режущей кромки; 3 – установка по заданному диаметру в корпусе фрезы

Fig. 3. Simulation scheme of sequential installation of the RPI in the milling cutter body:

1 – setting the taper lead angle; 2 – setting the side rake angle; 3 – installation according to a given diameter in the milling cutter body

где $A_{43}^{\{2\}}(d/2)$ – матрица, определяющая установку СМП на заданный диаметр фрезы d в системе координат корпуса фрезы $X_4Y_4Z_4$:

$$A_{43}^{\{2\}}(d/2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d/2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$A_{32}^{\{5\}}(\lambda)$ – матрица, задающая поворот СМП относительно оси OX_3 системы координат $X_3Y_3Z_3$ для обеспечения заданного угла наклона главной режущей кромки:

$$A_{32}^{\{5\}}(\lambda) = \begin{bmatrix} \cos \lambda & 0 & \sin \lambda & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \lambda & 0 & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$A_{21}^{\{6\}}(\pi/2 - \varphi)$ – матрица, задающая поворот СМП относительно оси OX_2 системы координат $X_2Y_2Z_2$ для обеспечения заданного главного угла в плане:

$$A_{21}^{\{6\}}(\pi/2 - \varphi) =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\pi/2 - \varphi) & -\sin(\pi/2 - \varphi) & 0 & 0 \\ \sin(\pi/2 - \varphi) & \cos(\pi/2 - \varphi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Задавая вращение режущей кромки СМП (2) относительно оси инструмента, получим уравнение производящей поверхности исследуемой фрезы:

$$\bar{r}_f(t, \theta) = A_{f5}^{\{5\}}(\pi/2) \cdot A_{54}^{\{4\}}(\theta) \cdot \bar{r}_4(t), \quad (3)$$

где θ – угловой параметр производящей поверхности фрезы; $A_{f5}^{\{5\}}(\pi/2)$ – матрица, задающая поворот системы координат производящей поверхности инструмента для совмещения оси Z_f с осью корпуса фрезы:

$$A_{f5}^{\{5\}}(\pi/2) = \begin{bmatrix} \cos(\pi/2) & 0 & \sin(\pi/2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\pi/2) & 0 & \cos(\pi/2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$A_{54}^{\{4\}}(\theta)$ – матрица, задающая поворот профиля режущей кромки СМП $\bar{r}_4(t)$ на величину угла θ .

На рис. 4 показан результат построения производящей поверхности фрезы с параметрами $d = 30$ мм, $\varphi = 90^\circ$ и $\lambda = 20^\circ$ по уравнению (3).

В результате задания величины угла $\lambda \neq 0$ производящая поверхность фрезы будет представлять собой однополосный гиперboloид вращения, характеризуемый непостоянством величин главных радиусов кривизны поверхности вдоль оси вращения, где наименьшая их величина достигается в точках $(0, \theta)$ для всех $\theta \in [0; 2\pi]$.

Уравнение обработанной поверхности при поступательном движении подачи фрезы вдоль оси X_0 детали и заданной величине поворота фрезы на величину угла ξ (косоугольном фрезе-

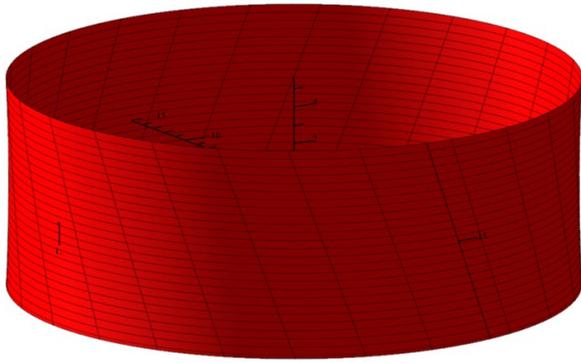


Рис. 4. Производящая поверхность фрезы

Fig. 4. Milling cutter generating surface

ровании) построим на основании уравнения формообразования:

$$\bar{r}_0(x, t, \theta) = A^{\{1\}}(x) \cdot A^{\{5\}}(\xi) \times A^{\{6\}}(-\theta) \cdot \bar{r}_f(t, \theta), \quad (4)$$

где x – параметр перемещения фрезы вдоль оси X_0 ; $A^{\{1\}}(x)$ – матрица, задающая перемещение фрезы вдоль оси X_0 :

$$A^{\{1\}}(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$A^{\{5\}}(\xi)$ – матрица поворота фрезы вдоль направления поступательного движения подачи на величину угла ξ :

$$A^{\{5\}}(\xi) = \begin{bmatrix} \cos \xi & 0 & \sin \xi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \xi & 0 & \cos \xi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$A^{\{6\}}(-\theta)$ – матрица, задающая вращение фрезы:

$$A^{\{6\}}(-\theta) = \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & \sin(-\theta) & 0 & 0 \\ \sin(-\theta) & \cos(-\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Для учета связи огибания вида $\theta = \theta(x, t)$ на основе уравнения (4) составим и решим относительно параметра θ уравнение

$$\begin{vmatrix} \bar{i}_0 \frac{\partial \bar{r}_0(x, t, \theta)}{\partial x} & \bar{j}_0 \frac{\partial \bar{r}_0(x, t, \theta)}{\partial x} & \bar{k}_0 \frac{\partial \bar{r}_0(x, t, \theta)}{\partial x} \\ \bar{i}_0 \frac{\partial \bar{r}_0(x, t, \theta)}{\partial t} & \bar{j}_0 \frac{\partial \bar{r}_0(x, t, \theta)}{\partial t} & \bar{k}_0 \frac{\partial \bar{r}_0(x, t, \theta)}{\partial t} \\ \bar{i}_0 \frac{\partial \bar{r}_0(x, t, \theta)}{\partial \theta} & \bar{j}_0 \frac{\partial \bar{r}_0(x, t, \theta)}{\partial \theta} & \bar{k}_0 \frac{\partial \bar{r}_0(x, t, \theta)}{\partial \theta} \end{vmatrix} = 0, \quad (5)$$

что позволит представить уравнение (4) как функцию от двух параметров:

$$\bar{r}_0(x, t) = A^{\{1\}}(x) \cdot A^{\{5\}}(\xi) \times A^{\{6\}}(-\theta(x, t)) \cdot \bar{r}_f(t, \theta(x, t)). \quad (6)$$

На рис. 5 представлены графики функции $\theta(x, t)$ при $x = 0$ для фрезы с параметрами $d = 30$ мм, $\phi = 90^\circ$, $\lambda = 20^\circ$ и угла поворота фрезы ξ , равного 0° (линия 1) и 20° (линия 2). На рис. 6 показаны результаты моделирования производящей поверхности фрезы при ее повороте на угол $\xi = 20^\circ$ и номинальная обработанная поверхность.

Оценку кривизны обработанной поверхности выполним путем расчета двух главных кривизн k_1 и k_2 , которые являются корнями решения уравнения

$$k^2 - 2Hk + K = 0, \quad (7)$$

где

$$H = \frac{LG - 2FM + EN}{2(EG - F^2)}; \quad (8)$$

$$K = \frac{LN - M^2}{EG - F^2}. \quad (9)$$

Здесь E, F, G – коэффициенты первой квадратичной формы (g) обработанной поверхности (6), описываемой формулой

$$g = E \cdot dx^2 + 2F \cdot dx \cdot dt + G \cdot dt^2; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} E &= \left(\frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial x} \right)^2; \\ F &= \frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial x} \frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial t}; \\ G &= \left(\frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial t} \right)^2, \end{aligned} \quad (11)$$

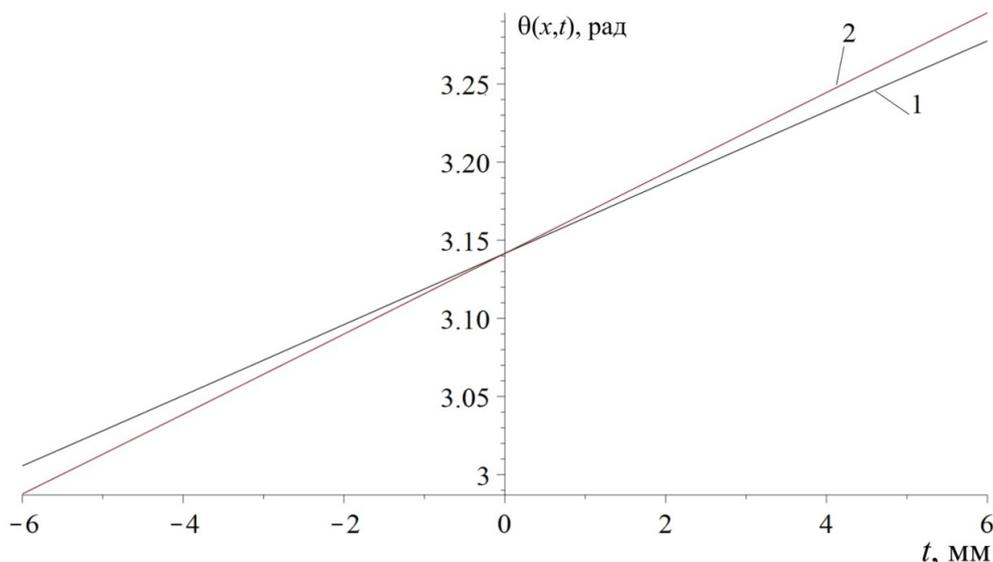


Рис. 5. Графики функции $\theta(x, t)$ при $x = 0$

Fig. 5. Graphs of the function $\theta(x, t)$ at $x = 0$

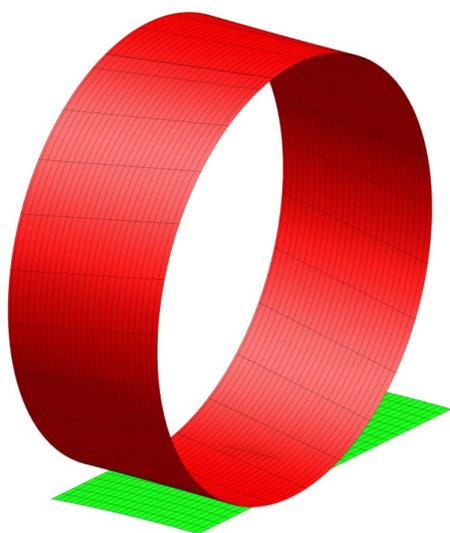


Рис. 6. Моделирование производящей поверхности фрезы и номинальной обработанной поверхности
Fig. 6. Modeling of the milling cutter's producing surface and the nominal machined surface

L, M, N – коэффициенты второй квадратичной формы (q) обработанной поверхности (6), описываемой формулой

$$q = L \cdot dx^2 + 2M \cdot dx \cdot dt + N \cdot dt^2; \quad (12)$$

$$L = \frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial x} \frac{\bar{n}(x, t)}{\sqrt{EG - F^2}}; \quad (13)$$

$$M = \frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial x \partial t} \frac{\bar{n}(x, t)}{\sqrt{EG - F^2}}; \quad (14)$$

$$N = \frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial t} \frac{\bar{n}(x, t)}{\sqrt{EG - F^2}}, \quad (15)$$

где $\bar{n}(x, t)$ – нормаль к обработанной поверхности:

$$\bar{n}(x, t) = \frac{\frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial x} \times \frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial t}}{\left| \frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial x} \times \frac{\partial \bar{r}_0(x, t)}{\partial t} \right|}. \quad (16)$$

Для удобства восприятия в дальнейшем вместо k_1 и k_2 будем рассматривать главные радиусы кривизны обработанной поверхности: $R_1 = k_1^{-1}$ и $R_2 = k_2^{-1}$.

Исследование главного радиуса кривизны обработанной поверхности в поперечном сечении (рис. 7) для фрезы с $d = 30$ мм, $\varphi = 90^\circ$, $\lambda = 20^\circ$ и $\xi = 0^\circ$ подтвердило, что наименьшего значения он достигает в точке поверхности формируемой серединой режущей кромки СМП ($t = 0$) и по мере удаления от середины увеличивается (кривая 1).

Исследование также показало (см. рис. 7), что увеличение угла поворота фрезы (при $\xi = 20^\circ$, кривая 2) приводит к уменьшению главного радиуса кривизны. На рис. 8 приведены

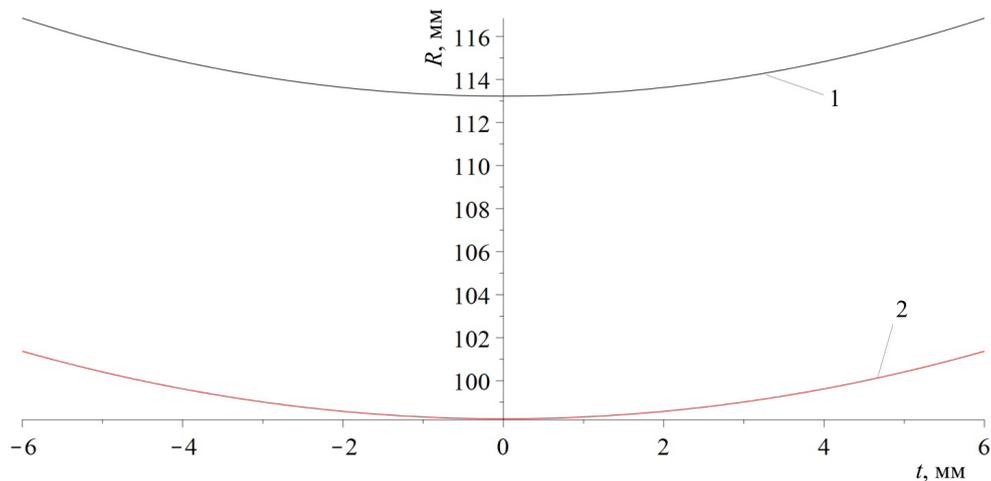


Рис. 7. Изменение главного радиуса кривизны (R) на различных участках обработанной поверхности в поперечном сечении

Fig. 7. Change of the main radius of curvature (R) on different sections of the processed surface in cross-section

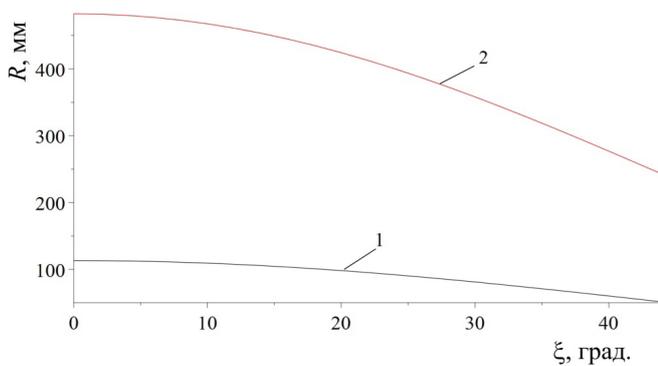


Рис. 8. Изменение главного радиуса кривизны (R) обработанной поверхности в поперечном сечении в зависимости от угла ξ

Fig. 8. Change of the main radius of curvature (R) of the treated surface in cross-section depending on the angle ξ

графики изменения главной кривизны обработанной поверхности в поперечном сечении (в точке $t = 0$) при различных углах поворота фрезы $\xi \in [0; 45^\circ]$ с параметрами $d = 30$ мм, $\varphi = 90^\circ$ и угле $\lambda = 10^\circ$ (линия 1) и 20° (линия 2).

Использование полученных формул позволяет выполнить расчет угла наклона главной режущей кромки СМП и углов поворота фрезы вдоль направления поступательного движения подачи, которые будут обеспечивать наилучшее прилегание производящей поверхности фрезы и поверхности детали в точках их контакта. Эти расчеты целесообразно выполнять в следующей последовательности:

1) при заданном диаметре фрезы с использованием формулы (7) рассчитать минимальное

значение угла λ (при $\xi = 0^\circ$), обеспечивающего наилучшее прилегание производящей поверхности фрезы в точке поверхности с наименьшей кривизной (наибольшим главным радиусом кривизны) из условия

$$R_{d \max} \approx R(\lambda, \xi), \quad (17)$$

где $R_{d \max}$ – наибольший радиус кривизны профиля формируемой поверхности; $R(\lambda, \xi)$ – главный радиус кривизны обработанной поверхности фрезой при заданном угле λ и угле поворота фрезы ξ .

2) при установленном значении угла λ выполнить расчет углов наклона фрезы ξ в остальных точках профиля формируемой поверхности из условия (17). В случае, когда обрабатываемые поверхности имеют большой диапазон значений главного радиуса кривизны, обеспечить строгое выполнение равенства (17) во всех точках может быть невозможно. Для этих точек необходимо принять угол ξ равным наибольшему возможному значению ($\xi = 45^\circ$).

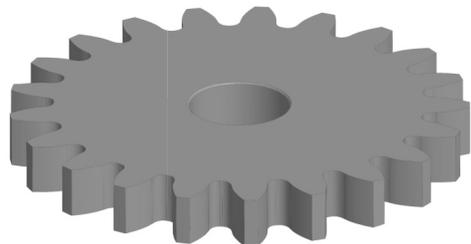
Результаты и их обсуждение

Практическое применение построенных моделей и установленных закономерностей рассмотрим на примере обработки эвольвентой поверхности прямозубчатого зубчатого колеса (рис. 9, а) с модулем 20 мм, количеством зубьев 21 и шириной венца 50 мм и с уравнением

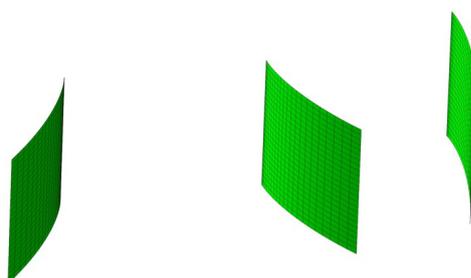
$$\bar{r}_d(u, v) = [R_0(\cos u + u \cdot \sin u) \quad R_0(\sin u - u \cdot \cos u) \quad v \quad 1]^T, \quad (18)$$

где R_0 – радиус основной окружности зубчатого колеса.

Для нашего колеса $R_0 = 197,3$ мм.



a



b

Рис. 9. Колесо зубчатое прямозубое: *a* – геометрическая модель; *b* – результат моделирования поверхности зубьев по формуле (17)

Fig. 9. Spur gear:

a – a geometric model; *b* – the result of modeling the surface of the teeth according to (17)

Вычисление главного радиуса кривизны данной поверхности в поперечном направлении показало, что его величина при $u \in [0; 0,61]$ изменяется в пределах от 0 до 120,5 мм. Диаметр фрезы был принят равным 30 мм, и выполнен расчет минимального значения угла λ (при $\xi = 0^\circ$), обеспечивающего наилучшее прилегание производящей поверхности фрезы в точке поверхности с наименьшей кривизной (наибольшим главным радиусом кривизны) $u = 0,61$ исходя из условия (17). Шаг приращения угла λ был задан равным 30° , угол $\xi = 0^\circ$, и установлено, что условие (17) выполняется при $\lambda = 19^\circ$ с $R(19^\circ) = 126,5$ мм. Далее при заданном значении угла $\lambda = 19^\circ$ был выполнен расчет углов наклона фрезы ξ для точек профиля формируемой поверхности (рис. 10).

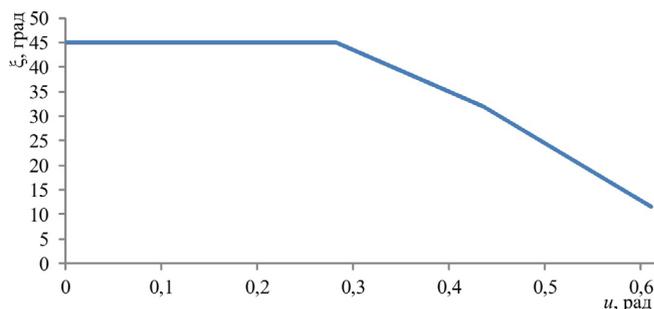


Рис. 10. Изменение угла ξ при $\lambda = 19^\circ$ и $u \in [0; 0,61]$

Fig. 10. Change of angle ξ at $\lambda = 19^\circ$ and $u \in [0; 0,61]$

На рис. 11 показано положение фрезы при формировании различных участков формируемой поверхности зуба колеса в соответствии с рассчитанными углами поворота фрезы (см. рис. 10).

На рис. 11 позиция 1 соответствует точке профиля поверхности зуба $u = 0$ рад; позиция 2 соответствует точке профиля поверхности зуба $u = 0,44$ рад; позиция 3 соответствует точке профиля поверхности зуба $u = 0,61$. Из рис. 11 следует, что с увеличением кривизны обрабатываемой поверхности увеличивается угол поворота фрезы.

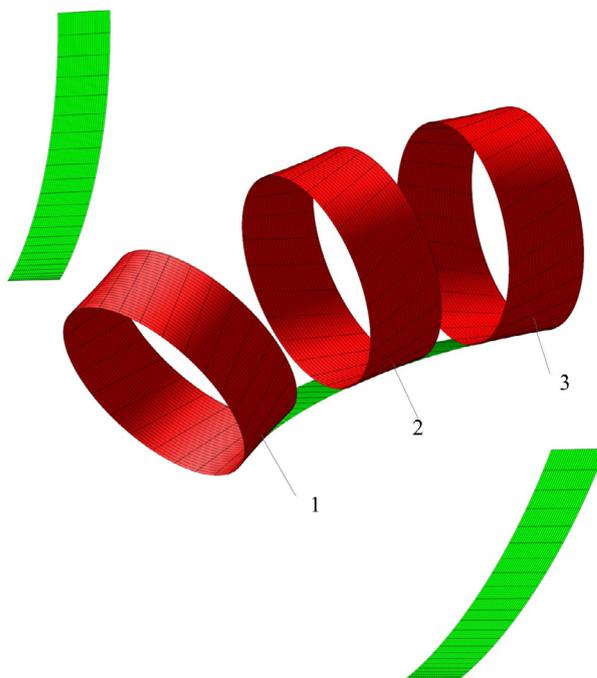


Рис. 11. Установка фрезы в различных точках формируемой поверхности

Fig. 11. Installation of the milling cutter across points of the surface being formed

Выводы

Установленные закономерности изменения главного радиуса кривизны обработанной поверхности в поперечном сечении позволят при построчной обработке протяженных участков деталей с криволинейным профилем (в частности выпуклых участков поверхности) на многокоординатных станках с ЧПУ за счет поворота фрезы обеспечить наилучшее прилегание ее производящей поверхности к обработанной поверхности в точке их контакта, а также обеспечить снижение погрешности аппроксимации профиля обработанной поверхности и повышение производительности обработки за счет возможности увеличения шага перемещения инструмента вдоль формируемого профиля.

Список литературы

1. Вэй П.М. Повышение эффективности контурной обработки на станках с ЧПУ путем коррекции траектории и режимов резания: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2014. – 22 с.
2. Petrakov Y., Shuplietsov D. Contour milling programming technology for virtual basing on a CNC machine // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 2, N 1 (98). – P. 54–60. – DOI: 10.15587/1729-4061.2019.162673.
3. Petrakov Y., Korenkov V., Myhovych A. Technology for programming contour milling on a CNC machine // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – Vol. 2. – P. 55–61. – DOI: 10.15587/1729-4061.2022.255389.
4. Dumitrache A., Borangiu T., Dogar A. Automatic generation of milling toolpaths with tool engagement control for complex part geometry // IFAC Proceedings Volumes. – 2020. – Vol. 43. – P. 252–257. – DOI: 10.3182/20100701-2-pt-4011.00044.
5. Управление точностью контурной обработки концевыми фрезами / В.А. Тимирязев, М.З. Хостиков, И.К. Данилов, А.Г. Дацко // СТИН. – 2020. – № 12. С. 22–26.
6. A novel gear machining CNC design and experimental research / J. Han, L. Wu, B. Yuan, X. Tian, L. Xia // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 88. – P. 1711–1722. – DOI: 10.1007/s00170-016-8883-y.
7. Kim H.C., Lee S.G., Yang M.Y. An optimized contour parallel tool path for 2D milling with flat end-mill // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2006. – Vol. 31. – P. 567–573. – DOI: 10.1007/s00170-005-0228-1.
8. Operation planning based on cutting process models / M.D. Tsai, S. Takata, M. Inui, F. Kimura, T. Sata // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1991. – Vol. 40. – P. 95–98. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61942-8.
9. Engin S., Altintas Y. Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part I: Helical end mills // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2001. – Vol. 41. – P. 2195–2212. – DOI: 10.1016/S0890-6955(01)00045-1.
10. Камсюк М.С. О точности обработки сложно-контурных деталей на станках с ЧПУ, оснащенных поворотными столами // Точность и производительность обработки на станках с ЧПУ. – М.: МВТУ, 1982. – С. 59–86. – (Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана; № 376).
11. Колесов К.Н. Повышение эффективности работы концевых твердосплавных фрез на основе выбора элементов кинематики формообразования и конструктивных параметров инструмента: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2011. – 19 с.
12. Improving efficiency of machining the geometrically complex shaped surfaces by milling with a fixed shift of the cutting edge / A. Skorkin, O. Kondratyuk, N. Lamnauer, V. Burdeinaya // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 2, N 1 (98). – P. 60–69. – DOI: 10.15587/1729-4061.2019.163325.
13. Influence assessment of metal-cutting equipment geometrical accuracy on OMV-technologies accuracy / A.G. Koltsov, D.A. Blokhin, E.V. Krivonos, A.N. Narezhev // 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), Omsk, 15–17 November. – Omsk, 2016. – P. 7819029. – DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819029.
14. Fussell B.K., Jerard R.B., Hemmett J.G. Modeling of cutting geometry and forces for 5-axis sculptured surface machining // Computer Aided Design. – 2003. – Vol. 35, N 4. – P. 333–346.
15. Petrakov Y., Shuplietsov D. Programming of adaptive machining for end milling // Mechanics and Advanced Technologies. – 2017. – Vol. 1 (79). – P. 34–40. – DOI: 10.20535/2521-1943.2017.79.97342.
16. Lee S.K., Ko S.L. Development of simulation system for machining process using enhanced Z map model // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Vol. 3. – P. 608–617. – DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00761-6.
17. Calculating the Hausdorff distance between curves / E. Belogay, C. Cabrelli, U. Molter, R. Shonkwiler // Information Processing Letters. – 1997. – Vol. 64, iss. 1. – P. 17–22. – DOI: 10.1016/S0020-0190(97)00140-3.
18. Nosov P.S., Yalansky A.D., Iakovenko V.O. 3D Modelling of rehabilitation corset with use of power-shape delcam // Information Technologies in Educa-

tion, Science and Production. – 2013. – Vol. 1, iss. 2. – P. 222–230.

19. *Omm O.C.* Разработка сборных дисковых фрез с кинематическим обкаточным движением для обработки зубчатых колес крупного модуля на станках с ЧПУ: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2011. – 23 с.

20. *Ott O.S., Artyukhin L.L.* Shaping involute profiles by means of a disk tool // *Russian Engineering Research*. – 2011. – Vol. 31, N 3. – P. 283–287. – DOI: 10.3103/S1068798X11030221.

21. *Omm O.C.* Формирование эвольвентных поверхностей деталей дисковым инструментом // *Вестник МГТУ «Станкин»*. – 2010. – № 3 (11). – С. 67–71.

22. *Гречишников В.А., Колесов Н.В., Петухов Ю.Е.* Математическое моделирование в инструментальном производстве. – М.: МГТУ «Станкин», 2003. – 113 с.

23. *Golebski R., Boral P.* Study of machining of gears with regular and modified outline using CNC machine tools // *Materials*. – 2021. – Vol. 14. – P. 2913. – DOI: 10.3390/ma14112913.

24. Методология структурно-параметрического синтеза металлорежущих систем / А.Г. Ивахненко, В.В. Куц, О.Ю. Еренков, А.В. Олейник, М.Ю. Са-

рилов. – Комсомольск-на-Амуре: КнАГУ, 2015. – 282 с. – ISBN 978-5-7765-1175-2.

25. *Куц В.В.* Методология предпроектных исследований специализированных металлорежущих систем: дис. ... д-ра техн. наук. – Курск, 2012. – 365 с.

26. *Емельянов С.Г., Куц В.В.* Математическое моделирование сборных фасонных фрез. – Курск: Курский гос. техн. ун-т, 2008. – 254 с. – ISBN 978-5-7681-0364-4.

27. *Isaev A.V., Grechishnikov V.A.* Machining curvilinear sections by means of cutting plates with a linear edge // *Russian Engineering Research*. – 2010. – Vol. 30, N 4. – P. 413–417. – DOI: 10.3103/S1068798X10040222.

28. *Емельянов С.Г., Чевычелов С.А., Хомутов Р.Н.* Повышение эффективности чистой обработки крупномодульных зубчатых колес // *Известия Юго-Западного государственного университета*. – 2019. – Т. 23, № 3. – С. 8–17. – DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-3-8-17.

29. *Емельянов С.Г., Чевычелов С.А., Чистяков П.П.* Схемы формообразования гиперболическими инструментами // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2017. – № 8-1. – С. 133–140.

Конфликт интересов

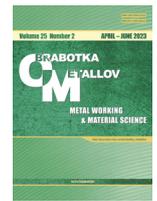
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Theoretical study of the curvature of the treated surface during oblique milling with prefabricated milling cutters

Vadim Kuts^{a,*}, Sergey Chevychelov^b

Southwest State University, 94, 50 let Oktyabrya str., Kursk, 305040, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-3244-1359>, kuc-vadim@yandex.ru, ^b <https://orcid.org/0009-0006-8958-2191>, tschsa@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 13 March 2023

Revised: 29 March 2023

Accepted: 15 April 2023

Available online: 15 June 2023

Keywords:

Form-generating method

Interlocking side mill

Oblique milling

Surface curvature

The main radii of curvature

Acknowledgements

Research were partially conducted at core facility “Structure, mechanical and physical properties of materials”.

ABSTRACT

Introduction. The paper discusses the methods of processing large parts having curved convex surfaces with a rectilinear guide on multi-coordinate CNC machining centers using the touch method with a discrete motion of the tool feed along the profile of the part. It is shown that the main disadvantages of this method are lower productivity, which is due to the presence of discrete tool motions between cycles of its translation mode, where the value of discrete tool motion for a given processing accuracy depends on the curvature of the surface being processed. To improve processing performance, it is proposed to use prefabricated disc cutters equipped with replaceable polyhedral inserts (RPI) with rectilinear cutting edges. Its installation in the cutter body with non-zero angles of inclination of the main cutting edge, in combination with an additional rotation of the cutter, during processing, along the direction of the translational feed movement, allows you to obtain a concave surface and ensure a tighter fit of the producing surface of the tool and the machined surface of the part. **The aim** of the work is to reduce the error of approximation of the profile when it is processed using the touch method with discrete motion of prefabricated disc cutters along the profile and, consequently, to ensure workpiece the possibility of increasing the step of tool movement along the profile being formed to improve processing performance. **Research methods:** geometrical theory of designing metal-cutting tools. **Results and discussion.** The regularities established in the work made it possible to create a method for determining the angle of inclination of the main cutting edge of the RPI milling cutter and the angles of rotation of the milling cutter along the direction of translational feed movement during line-by-line processing of extended sections of parts with a curved profile on multi-coordinate CNC machines by turning the milling cutter to ensure the best fit of its producing surface to the surface being processed at the point of its contact, to reduce the approximation error processed profile and improve processing performance, due to the possibility of increasing the tool movement step.

For citation: Kuts V.V., Chevychelov S.A. Theoretical study of the curvature of the treated surface during oblique milling with prefabricated milling cutters. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 32–44. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-32-44. (In Russian).

References

1. Wei P.M. *Povyshenie effektivnosti konturnoi obrabotki na stankakh s ChPU putem korrektsii traektorii i rezhimov rezaniya*. Avtoref. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of contour machining on CNC machines by correcting the trajectory and cutting modes. Author’s abstract of PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2014. 22 p.
2. Petrakov Y., Shuplietsov D. Contour milling programming technology for virtual basing on a CNC machine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, vol. 2, no. 1 (98), pp. 54–60. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.162673.
3. Petrakov Y., Korenkov V., Myhovych A. Technology for programming contour milling on a CNC machine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022, vol. 2, pp. 55–61. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.255389.

* Corresponding author

Kuts Vadim V., D.Sc. (Engineering), Associate Professor
 Southwest State University,
 94, 50 let Oktyabrya str.,
 305040, Kursk, Russian Federation
 Tel.: 8 (903) 639-94-01, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

4. Dumitrache A., Borangiu T., Dogar A. Automatic generation of milling toolpaths with tool engagement control for complex part geometry. *IFAC Proceedings Volumes*, 2020, vol. 43, pp. 252–257. DOI: 10.3182/20100701-2-pt-4011.00044.
5. Timiryazev V.A., Khostikoev M.Z., Danilov I.K., Datsko A.G. Upravlenie tochnost'yu konturnoi obrabotki kontsevyimi frezami [Precision control of contour machining with end mills]. *STIN = Russian Engineering Research*, 2020, no. 12, pp. 22–26. (In Russian).
6. Han J., Wu L., Yuan B., Tian X., Xia L. A novel gear machining CNC design and experimental research. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 88, pp. 1711–1722. DOI: 10.1007/s00170-016-8883-y.
7. Kim H.C., Lee S.G., Yang M.Y. An optimized contour parallel tool path for 2D milling with flat endmill. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, vol. 31, pp. 567–573. DOI: 10.1007/s00170-005-0228-1.
8. Tsai M.D., Takata S., Inui M., Kimura F., Sata T. Operation planning based on cutting process models. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1991, vol. 40, pp. 95–98. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61942-8.
9. Engin S., Altintas Y. Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part I: Helical end mills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, vol. 41, pp. 2195–2212. DOI: 10.1016/S0890-6955(01)00045-1.
10. Kamsyuk M.S. O tochnosti obrabotki slozhnokonturnykh detalei na stankakh s ChPU, osnashchennykh povorotnymi stolami [About the accuracy of processing of complex-contoured parts on CNC machines equipped with turntables]. *Tochnost' i proizvoditel'nost' obrabotki na stankakh s ChPU* [Precision and productivity of machining on CNC machines]. Moscow, BMSTU Publ., 1982, pp. 59–86.
11. Kolesov K.N. *Povyshenie effektivnosti raboty kontsevykh tverdospaynykh frez na osnove vybora elementov kinematiki formoobrazovaniya i konstruktivnykh parametrov instrumenta*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of end carbide cutters based on the selection of kinematics elements of shaping and design parameters of the tool. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2011. 19 p.
12. Skorkin A., Kondratyuk O., Lamnauer N., Burdeinaya V. Improving efficiency of machining the geometrically complex shaped surfaces by milling with a fixed shift of the cutting edge. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, vol. 2, no. 1 (98), pp. 60–69. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.163325.
13. Koltsov A.G., Blokhin D.A., Krivonos D.A., Narezhev A.N. Influence assessment of metal-cutting equipment geometrical accuracy on OMV-technologies accuracy. *2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, Omsk, Omsk, 15–17 November 2016, p. 7819029. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819029.
14. Fussell B.K., Jerard R.B., Hemmett J.G. Modeling of cutting geometry and forces for 5-axis sculptured surface machining. *Computer aided design*, 2003, vol. 35, no. 4, pp. 333–346.
15. Petrakov Y., Shuplietsov D. Programming of adaptive machining for end milling. *Mechanics and Advanced Technologies*, 2017, vol. 1 (79), pp. 34–40. DOI: 10.20535/2521-1943.2017.79.97342.
16. Lee S.K., Ko S.L. Development of simulation system for machining process using enhanced Z map model. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 3, pp. 608–617. DOI: 10.1016/s0924-0136(02)00761-6.
17. Belogay E., Cabrelli C., Molter U., Shonkwiler R. Calculating the Hausdorff distance between curves. *Information Processing Letters*, 1997, vol. 64, iss. 1, pp. 17–22. DOI: 10.1016/s0020-0190(97)00140-3.
18. Nosov P.S., Yalansky A.D., Iakovenko V.O. 3D Modelling of rehabilitation corset with use of powershape delcam. *Information Technologies in Education, Science and Production*, 2013, vol. 1, iss. 2, pp. 222–230.
19. Ott O.S. *Razrabotka sbornykh diskovykh frez s kinematicheskim obkatochnym dvizheniem dlya obrabotki zubchatykh koles krupnogo modulya na stankakh s ChPU*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Development of prefabricated disk cutters with kinematic winding motion for processing gears of a large module on CNC machines. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2011. 23 p.
20. Ott O.S., Artyukhin L.L. Shaping involute profiles by means of a disk tool. *Russian Engineering Research*, 2011, vol. 31, no. 3, pp. 283–287. DOI: 10.3103/S1068798X11030221.
21. Ott O.S. Formirovanie evol'ventnykh poverkhnostei detalei diskovym instrumentom [Formation of involute surfaces of parts with a disk tool]. *Vestnik MGTU «Stankin» = Vestnik MSUT «Stankin»*, 2010, vol. 3 (11), pp. 67–71.
22. Grechishnikov V.A., Kolesov N.V., Petukhov Yu.E. *Matematicheskoe modelirovanie v instrumental'nom proizvodstve* [Mathematical modeling in tool manufacturing]. Moscow, MSUT “Stankin” Publ., 2003. 113 p.
23. Gołębski R., Boral P. Study of machining of gears with regular and modified outline using CNC machine tools. *Materials*, 2021, vol. 14, p. 2913. DOI: 10.3390/ma14112913.
24. Ivakhnenko A.G., Kuts V.V., Erenkov O.Yu., Oleinik A.V., Sarilov M.Yu. *Metodologiya strukturno-parametricheskogo sinteza metallovezhushchikh sistem* [Methodology of structural-parametric synthesis of metal-

cutting systems]. Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-na-Amure State University Publ., 2015. 282 p. ISBN 978-5-7765-1175-2.

25. Kuts V.V. *Metodologiya predproektnykh issledovaniy spetsializirovannykh metallozhushchikh sistem*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Improving the efficiency of contour machining on CNC machines by correcting the trajectory and cutting modes. Dr. eng. sci. diss.]. Kursk, 2012. 365 p.

26. Emel'yanov S.G., Kuts V.V. *Matematicheskoe modelirovanie sbornykh fazonnykh frez* [Mathematical modeling of prefabricated shaped milling cutters]. Kursk, KurskSTU Publ., 2008. 254 p. ISBN 978-5-7681-0364-4.

27. Isaev A.V., Grechishnikov V.A. Machining curvilinear sections by means of cutting plates with a linear edge. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 4, pp. 413–417. DOI: 10.3103/S1068798X10040222.

28. Emelianov S.G., Chevychelov S.A., Khomutov R.N. Povyshenie effektivnosti chistovoi obrabotki krupnomodul'nykh zubchatykh koles [Improving the finishing efficiency of coarse-grained gear wheels]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the South-West State University*, 2019, vol. 23, no. 3, pp. 8–17. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-3-8-17.

29. Emelyanov S.G., Chevychelov S.A., Chistyakov P.P. Skhemy formoobrazovaniya giperboloidnymi instrumentami [Schemes for formation of hyperboloid instruments]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2017, no. 8-1, pp. 133–140.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).