

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ С ТРЕМЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

С.К. Амбросимов¹, Г.А. Харламов², А.А. Черепенько²

¹Липецкий государственный технический университет, г. Липецк,

²Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел

В современном машиностроении при обработке штампов и пресс-форм широко используется фрезерование как один из наиболее производительных и универсальных методов обработки. Производительность фрезерования обусловлена высокой концентрацией режущих кромок, одновременно участвующих в процессе резания и возможностью нелинейного согласования между отдельными движениями. Но при фрезеровании сложных фасонных поверхностей имеют место проблемы, связанные с большими объемами удаляемых слоев металла, что приводит к быстрому износу инструмента и низкой производительности обработки.

Применение многокоординатных станков с числовым программным управлением позволило использовать в обработке фасонных поверхностей сложную кинематику с нелинейным согласованием движений по нескольким координатам одновременно, но эти возможности используются недостаточно.

В статье рассмотрены наиболее известные методы обката с нелинейным движением формообразования. Выбран универсальный высокопроизводительный способ обработки сложных криволинейных поверхностей, осуществляемый инструментом с двумя коническими и тороидальной поверхностями, описан процесс обкатки сложного профиля комбинированным инструментом. Представлена кинематическая модель согласования для кинематических схем с тремя нелинейно-согласованными движениями, лежащими в одной плоскости, а также выделены три вида согласования движения. Первый – служит для обработки вогнутого дугообразного участка поверхности при значении угла образующих инструмента $\alpha < \beta$ – угла между касательными к противоположным сторонам профиля обрабатываемой поверхности в точках их сопряжения с вогнутыми участками профиля. Второй вид согласования применяется для обработки выпуклых и прямолинейных участков профилей методом огибания образующей без проскальзывания ($p = 1$) и с постоянным по величине проскальзыванием $p = \text{const}$. Третий вид согласования используется только при обработке участков обрабатываемой поверхности вблизи точек сопряжений профилей при значении угла между касательными в точках сопряжений менее 90° .

Ключевые слова: фрезерование сложных поверхностей, кинематика сложно-согласованных движений.

Введение

Фрезерование – один из наиболее производительных методов обработки, что определяется высокой концентрацией режущих кромок, одновременно участвующих в процессе резания, а также за счет возможности нелинейного согласования между отдельными движениями. Однако при фрезеровании сложных фасонных поверхностей имеют место проблемы, связанные с большими объемами удаляемых слоев металла. Следствием этого является низкая стойкость дисковых фасонных или концевых радиусных фрез, невысокая производительность обработки [1].

В настоящее время для обработки сложных фасонных поверхностей, например, штампов и прессформ, как выпуклых, так и вогнутых (рис. 1), в основном используются методы фрезерования концевыми радиусными фрезами. Фрезерование осуществляют строками, а движения по осям X и Y нелинейно согласованы, так как соотношения между отдельными движениями при перемещении инструмента от точки A к точке A_2 постоянно изменяются $\Delta Y_1/\Delta X_1 \neq \Delta Y_2/\Delta X_2$. Но при этом расчет опорных точек для разработки управляющей программы не представляет больших сложностей, так как траектория движения представляет эквидистанту профиля поверхности в обрабатываемом сечении кроме участков, в которых касательная к профилю перпендику-

Расчет и конструирование

лярна оси инструмента (точка A_3). В этих случаях для избежания нулевых скоростей резания инструмент (заготовку) дополнительно наклоняют на некоторый угол φ в плоскости обработки.

Современные многокоординатные станки с ЧПУ позволяют воспроизводить сложную кинематику с нелинейным согласованием движений по нескольким координатам одновременно, однако эти возможности используются недостаточно.

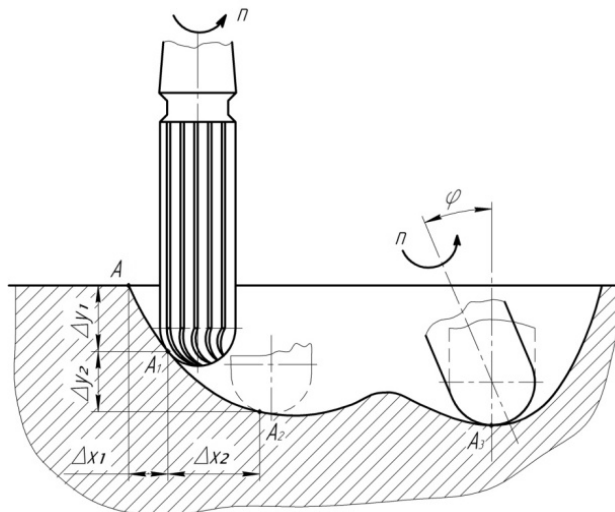


Рис. 1. Схема фрезерования сложных фасонных поверхностей концевыми радиусными фрезами

Использование сложных кинематических схем (КС) позволяет производить обработку сложных поверхностей инструментами с простой формой производящей поверхности с прямолинейными режущими кромками, обеспечивать постоянное смещение режущей кромки относительно поверхности резания, чистый обкат профиля, а также обкат с проскальзыванием инструмента. Эти мероприятия позволяют значительно повысить точность, производительность обработки и стойкость инструмента, а следовательно, снизить затраты на инструмент [2].

1. Фрезерование методом обката с нелинейными движениями формообразования

Для обработки фасонных поверхностей с выпуклыми и вогнутыми повторяющимися участками профилей разработаны методы с линейными движениями формообразования методом огибания образующей. Примером может служить отработка зубчатых колес и шлицевых валов. В ряде случаев профиль инструмента имеет сложную форму, а следовательно, такие инструменты дороги в изготовлении. Известны и другие, более сложные кинематические схемы с нелинейными движениями подачи при обкате образующей (см. рис. 1) [3].

Одним из таких универсальных методов с нелинейным обкатом обработанной поверхности является способ обработки сложных криволинейных поверхностей (патент № 2167746 РФ), осуществляемый инструментом с двумя коническими и тороидальной поверхностями (рис. 2), поскольку позволяет обрабатывать профили, пересекающиеся под любым углом.

Прямолинейные образующие инструмента выполняются под углом α , величина которого равна или меньше минимального угла β_{\min} между касательными к противоположным сторонам профиля обрабатываемой поверхности в точках их сопряжения с вогнутыми участками профиля [4].

Обработка каждой выпуклой стороны профиля производится прямолинейной одноименной стороной профиля инструмента, а вогнутого сопрягаемого участка профиля детали – его радиусной тороидальной поверхностью. Обработку осуществляют с тремя одновременными нелинейно согласованными формообразующими движениями, лежащими в одной плоскости профилирования. Одно из них, вращательное ω_{x1} , осуществляется таким образом, чтобы прямолинейная образующая инструмента была последовательно касательной к каждой точке обрабатываемого профиля, а два других S_z и S_y согласуются с вращательным ω_{x1} таким образом, чтобы при обработке участков профилей прямолинейные образующие перекатывались по обрабатываемой поверхности. Разработанный метод обработки сложных поверхностей позволяет повысить точность за

счет обката профилей детали прямолинейными образующими инструмента, кроме того, он универсален и высокопроизводителен.

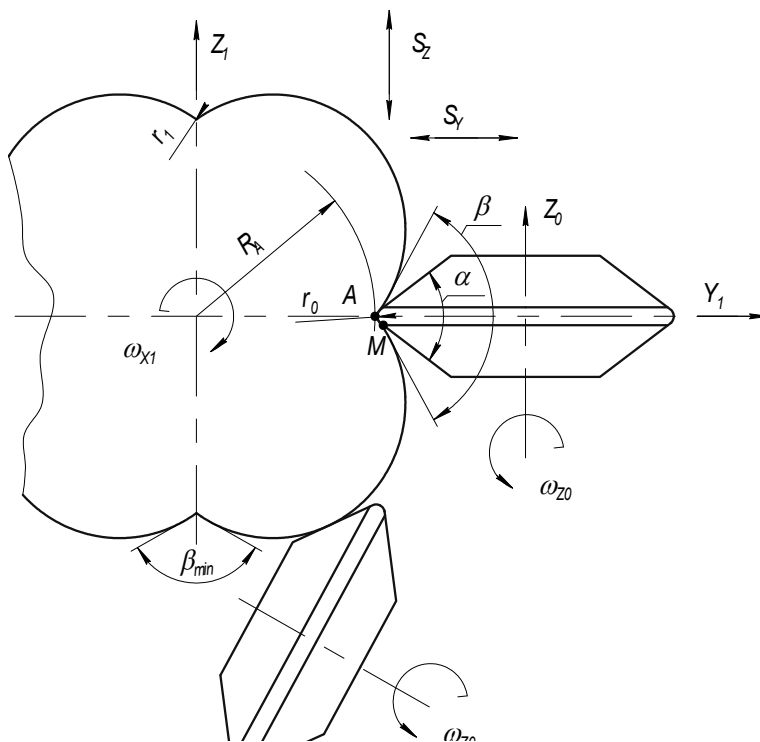


Рис. 2. Схема обката сложного профиля детали инструментом с комбинированным профилем

2. Кинематическая модель согласования для КС с тремя нелинейно-согласованными движениями, лежащими в одной плоскости

Рассмотрим вариант профилирования при величине угла между двумя касательными к сторонам профиля большей, чем 90° (рис. 3).

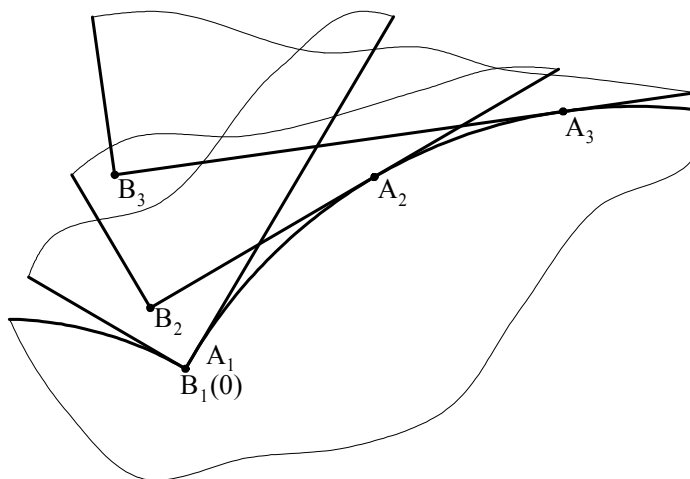


Рис. 3. Схема формирования профиля детали при значениях угла $\beta < 90^\circ$ между касательными к точкам сопряжений профилей

В процессе обработки таких профилей инструментом вблизи точки 0 возможно создание таких условий при согласовании трёх элементарных движений: вращательного и двух поступательных, когда инструмент вращается относительно точки 0. При этом профиль инструмента перекатывается без проскальзывания по обрабатываемым участкам профилей, не пересекая нерабочей стороной инструмента необрабатываемого профиля детали, т. е. при перекатывании правой

Расчет и конструирование

стороны профиля инструмента траектория точки B пересечения правой и левой сторон инструмента не пересекает левой части необрабатываемого профиля [5].

Обработка профилей с углами менее 90° при обкате без проскальзывания приводит к подрезанию вершиной инструмента (точкой B , наиболее удалённой от оси вращения шпинделя) вначале необрабатываемой, а затем и обработанной сторон профиля заготовки (рис. 4).

Возможно создание условий, при которых точка B перемещается, последовательно касаясь необрабатываемого профиля в точках B_1'', B_2'', B_3'' , или располагается на некотором расстоянии от них со стороны противоположной телу детали. Это условие можно использовать для предварительного формирования противоположного профиля. В таком случае согласование формообразующих движений приводит к обкатыванию с проскальзыванием, причём величина скольжения P зависит от угла β и от функций, которыми описаны профили обкатываемой и сопряжённой с ней стороны:

$$P = F(f(z), f_B(z), \beta). \quad (1)$$

Движения заготовки и инструмента в общем случае можно согласовать, установив нелинейные функции $S_Z = f(\omega_{x1})$, $S_Y = f(\omega_{x1})$ поступательных перемещений стола с заготовкой при заданной функции ω_{x1} вращательного движения заготовки.

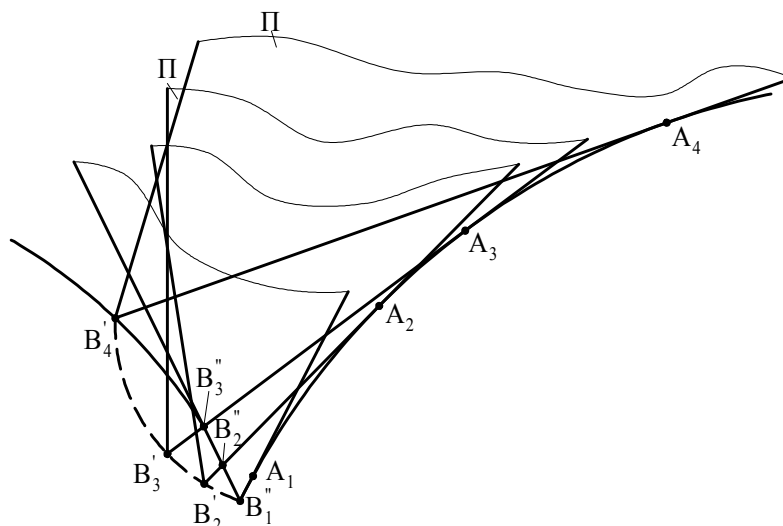


Рис. 4. Схема формирования профиля детали при значениях угла $\beta < 90^\circ$ между касательными к сторонам профиля

Таким образом, в общем случае при обработке фасонной поверхности, имеющей выпуклые, прямолинейные и вогнутые участки, используются три вида согласования движений.

Первый – служит для обработки вогнутого дугообразного участка поверхности при значении угла $\alpha < \beta$. В этом случае инструмент поворачивается относительно полюса зацепления, который находится в центре сопряжённой с профилями окружности радиуса r_1 , до касания прямолинейного участка профиля инструмента с точкой M (см. рис. 2). При равенстве радиуса дугообразного участка профиля инструмента r_0 радиусу r_1 инструмент работает с чистым скольжением $p = 0$, а движения заготовки и инструмента линейно согласованы, т. е. $\omega_{xi} = K(S_Y + S_Z)$. Движения S_Y и S_Z согласованы таким образом, что совместно воспроизводят вращательное плоскопараллельное движение вокруг оси O_1X_1 .

Основной целью методов с предварительным установлением производящей поверхности является определение зависимости между согласуемыми движениями, например между углом поворота заготовки φ и соответствующими перемещениями заготовки (инструмента) S_Y , S_Z .

Для вогнутого дугообразного участка поверхности при повороте заготовки на угол φ :

$$\begin{cases} S_Z = (R_A + r_0) \cdot \cos \varphi; \\ S_Y = (R_A + r_0) \cdot \sin \varphi, \end{cases} \quad (2)$$

где R_A – радиус детали у точки A (см. рис. 2).

Скорости движений формообразования, соответственно, являясь первыми производными перемещения по времени $V = ds/dt$, определяются по формулам:

$$\begin{cases} \omega_{x1} = \varphi/t, \\ V_{SZ} = -(R_A + r_0) \cdot \omega_{x1} \cdot \sin(\omega_{x1} \cdot t), \\ V_{SY} = -(R_A + r_0) \cdot \omega_{x1} \cdot \cos(\omega_{x1} \cdot t). \end{cases} \quad (3)$$

Второй вид согласования применяется для обработки выпуклых и прямолинейных участков профилей методом огибания образующей без проскальзывания ($p = 1$) и с постоянным по величине проскальзыванием $p = \text{const}$.

В этом случае установление функциональной взаимосвязи между отдельными движениями формообразования сводится к установлению перемещений вершины инструмента $\Delta S_Z, \Delta S_Y$ вращениях в зависимости от угла поворота заготовки φ .

Причём эти перемещения должны совершаться таким образом, чтобы обрабатываемая сторона профиля инструмента оставалась касательной к обрабатываемой стороне профиля детали [6].

Вводятся следующие обозначения: 1, 1' – последовательные положения стороны профиля инструмента (рис. 5); 2, 2' – последовательные положения обкатываемой стороны профиля детали; A_1, A_1' – начальная точка контакта инструмента с обработанной поверхностью в двух последовательных положениях заготовки; A_2, A_2' – соответственно следующая точка контакта; B_1, B_1' – два последовательных положения вершины инструмента при перемещении инструмента вдоль осей Z и Y без обката; B'' – положение вершины инструмента в следующей точке контакта с заготовкой при перемещении инструмента одновременно по осям Z и Y при обкате. Обрабатываемая сторона профиля может быть задана точками A_1, A_2, A_2', A_3' либо функционально f, f' ; необрабатываемая – f_B, f_B' или точками $T_1, \dots, T_{i-1}, T_i, T_{i+1}, \dots, T_n$.

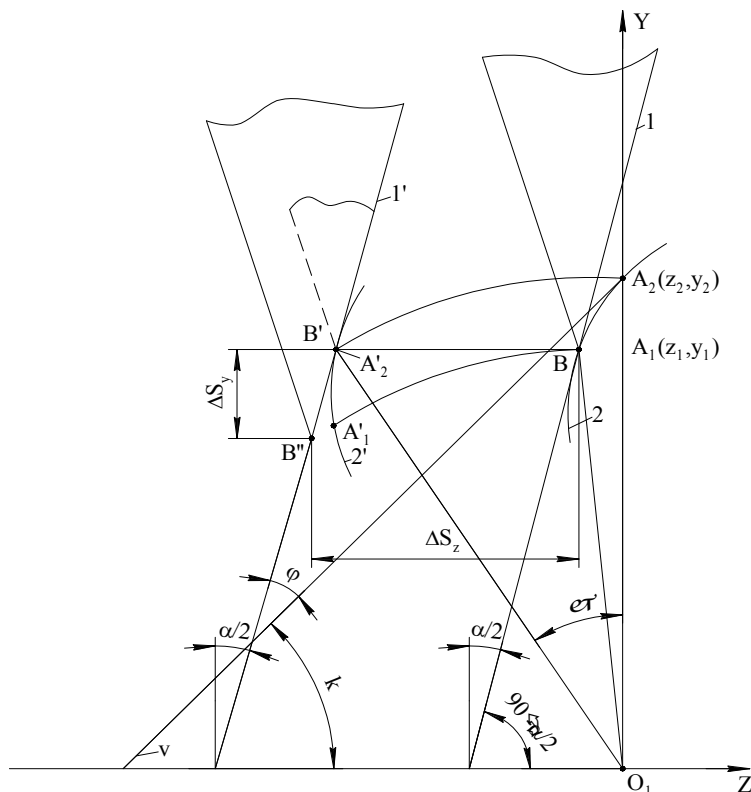


Рис. 5. Схема установления функциональной связи между формообразующими движениями при постоянной величине скольжения

Положения профиля инструмента 1 определяются углом его наклона к оси O_1Z в системе координат O_1YZ или углом профиля инструмента $\alpha/2$. Для обработки профиля, положение которого изменяется в системе координат O_1YZ по закону:

$$\varphi = \omega t, \quad (4)$$

профиль инструмента должен быть касательным ко всем последовательным положениям профиля поверхности, описываемого функцией $y = f(z)$ в этой же системе координат. При повороте профиля поверхности на угол φ профиль инструмента перемещается из точки $A_1(z_1, y_1)$ в точку $A_2'(z_2', y_2')$, т. е. при обработке со скольжением $p = 0$ вершина профиля инструмента B переместится по оси Z из точки A_1 в точку $A_2'(B')$.

Для обеспечения обкатывания без проскальзывания ($p = 1$) вершина профиля перемещается из точки B в точку B'' так, чтобы длина профиля $B'B''$ была равна криволинейному участку обрабатываемого профиля $A_1'A_2'$ или A_1A_2 . Таким образом, вершина профиля в направлении оси O_1Y совершает перемещение ΔS_y , а в направлении оси O_1Z — ΔS_z .

Поэтому задача сводится к определению уравнений касательных, проведённых под углом $\left(90^\circ - \frac{\alpha}{2}\right)$ к оси O_1Z к двум положениям функций $y = f(z)$, отличающихся на угол поворота φ . Эта задача относительно просто решается для исходного положения профиля на участке A_1A_2 и достаточно сложно для следующего положения функций на участке $A_1'A_2'$.

3. Кинематическая модель определения точек касания и положения вершины профиля инструмента при функциональном задании профиля

1. Определяется угол к касательной, проведённой к некоторой точке A_2 (с координатами z_2, y_2), принадлежащей профилю в исходном положении. На этом этапе проводится анализ касательной, так как при значении аппликаты z_2 может быть несколько уравнений, касательных к данной функции. Угол наклона касательной в точке A_2

$$K = \arctg \left(\frac{df}{dz} \right) \Big|_{z_2}, \quad (5)$$

2. Определяется новое положение точки A_2 (точка A_2' с координатами z_2', y_2'), при котором касательная займёт положение профиля инструмента 1, т. е. касательная повернётся на угол φ и займёт положение под углом $\left(90^\circ - \frac{\alpha}{2}\right)$ к оси O_1Z :

$$\Delta\varphi = 90^\circ - \frac{\alpha}{2} - K. \quad (6)$$

Поскольку точка A_2 (A_2') поворачивается на угол φ относительно центра вращения O_1 , её новые координаты записывают через функцию преобразования координат:

$$\begin{aligned} z_2' &= -y_2 \sin \varphi + z_2 \cos \varphi, \\ y_2' &= y_2 \cos \varphi + z_2 \sin \varphi. \end{aligned} \quad (7)$$

3. Определяются координаты точки A_1 , через которую проводится касательная, параллельная положению профиля 1 инструмента и составляющая угол $\left(90^\circ - \frac{\alpha}{2}\right)$ с осью:

$$\frac{df}{dz} \Big|_{z_1} = \operatorname{tg} \left(90^\circ - \frac{\alpha}{2} \right). \quad (8)$$

Найденное значение z_1 подставляется в уравнение функции профиля. Таким образом, определяются координаты точки касания A_1 при повороте профиля на угол φ .

4. Определяются перемещения вершины профиля инструмента из точки B' в точку B без движения обката ($p = 0$):

$$\begin{aligned} \Delta S_{z1} &= z_1 - z_2', \\ \Delta S_{y1} &= y_1 - y_2'. \end{aligned} \quad (9)$$

5. Определяются перемещения вершины инструмента из точки B_1 в точку B'' , при этом кривая AB может с достаточной степенью точности быть заменена хордой.

При условии $p = 1$:

$$\Delta S_z = \Delta S_{z1} + \left| \sqrt{(z_2 - z_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \right| \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \tag{10}$$

$$\Delta S_y = \Delta S_{y1} + \left| \sqrt{(z_2 - z_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \right| \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

При условии $p \neq 1$:

$$\Delta S_z = \Delta S_{z1} + p \cdot \left| \sqrt{(z_2 - z_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \right| \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \tag{11}$$

$$\Delta S_y = \Delta S_{y1} + p \cdot \left| \sqrt{(z_2 - z_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \right| \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

4. Кинематическая модель определения точек касания и положения вершины профиля инструмента при $\beta < 90^\circ$

Третий вид согласования используется только при обработке участков обрабатываемой поверхности вблизи точек сопряжений профилей при значении угла между касательными в точках сопряжений менее 90° (рис. 6) [7].

Перемещение по оси O_1Z для обеспечения условия незарезания должно быть уменьшено так, чтобы вершина профиля инструмента располагалась в точке B'' (рис. 6). В этом случае элементарные перемещения при повороте профиля на угол φ определяются отрезками $\Delta S_z'$ и $\Delta S_y'$ или, при установленных координатах точки A_2' отрезком $\Delta S_z''$.

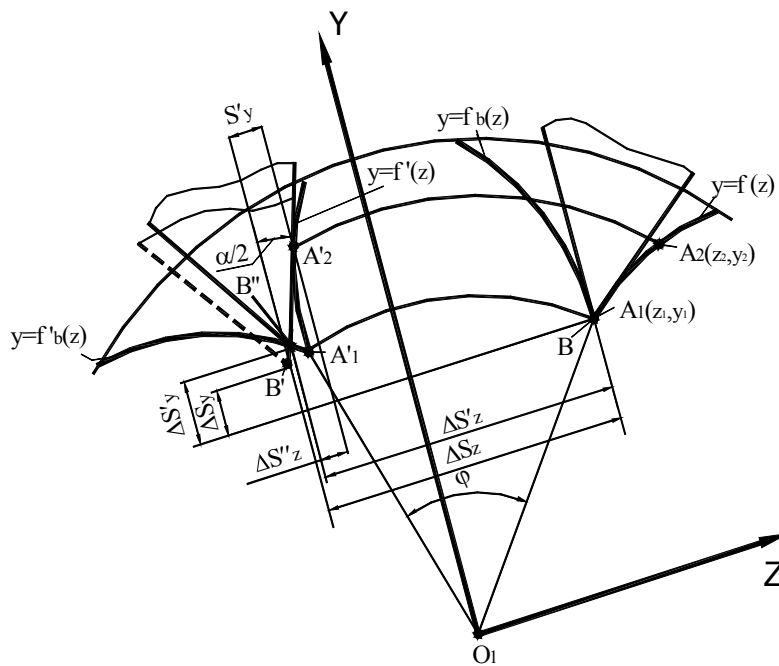


Рис. 6. Схема к установлению функциональной связи между формообразующими движениями вблизи точек сопряжения $\beta < 90^\circ$

Поскольку точка B'' возникает в результате пересечения необрабатываемой стороны профиля $y = f'_B(z)$ касательной к обрабатываемой стороне профиля в точке A_2' , её координаты определяются в результате решения системы уравнений:

$$\begin{cases} y = f'_B(z); \\ \frac{df'(z)}{dz} \end{cases} \tag{12}$$

Заключение

Представлен новый метод механической обработки поверхностей со сложными выпуклыми пересекающимися профилями инструментами с прямолинейными режущими кромками, обеспечивающий постоянное смещение режущей кромки относительно поверхности резания, обкат профиля без проскальзывания и с проскальзыванием инструмента. Обкат профиля с проскальзыванием позволяет исключить подрезание профиля при углах пересечения соседних профилей менее 90° . Новый метод позволяет значительно повысить точность и производительность обработки и стойкость инструмента, за счет постоянного смещения вершины режущей кромки относительно поверхности резания, а следовательно, снизить затраты на инструмент. Разработана кинематическая модель процесса механической обработки поверхностей со сложными пересекающимися профилями с тремя нелинейными движениями формообразования, лежащими в одной плоскости, позволяющая установить функциональную взаимосвязь между отдельными движениями формообразования. Представлен алгоритм расчета перемещений инструмента и заготовки для разработки управляющих программ.

Литература / References

1. Mokritskii B.Ya., Kirichek A.V., Shpilev A.M., Pustovalov D.A., Sablin P.A. Acoustic Assessment of Tool Quality. *Russian Engineering Research*, 2011, vol. 33, no. 2, pp. 74–78. DOI: 10.3103/S1068798X13020111
2. Vereshchaka A.S., Grigorev S.N., Kim V.A., Mokritskii B.Ya., Kirichek A.V. Design of an Effective Manufacturing Process for Tool Materials. *Russian Engineering Research*, 2014, vol. 34, no. 8, pp. 516–521. DOI: 10.3103/S1068798X14080152
3. Richard J., Demellayer R. Micro-EDM-Milling Development of New Machining Technology for Micro-Machining. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 6, pp. 292–296. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.023
4. Denkena B., Böß V., Nesper D., Gilge P., Hohenstein S., Seume J. Prediction of the 3D Surface Topography after Ball End Milling and its Influence on Aerodynamics. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 31, pp. 221–227. DOI: 10.1016/j.procir.2015.03.049
5. Chețan P., Boloș V., Pozdîrcă A., Peterlicean A. Influence of Radial Finishing Trajectories to the Roughness Obtained by Milling of Spherical Surfaces. *Procedia Technology*, 2014, vol. 12, pp. 420–426. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.12.508
6. Erdim H., Lazoglu I. Offline Force Control and Feedrate Scheduling for Complex Free Form Surfaces in 5-Axis Milling. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1, pp. 96–101. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.015
7. Siebrecht T., Kersting P., Biermann D., Odendahl S., Bergmann J. Modeling of Surface Location Errors in a Multi-Scale Milling Simulation System Using a Tool Model Based on Triangle Meshes. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 37, pp. 188–192. DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.064

Амбросимов Сергей Константинович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения», Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, ambsk@mail.ru.

Харламов Геннадий Андреевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, ipk@ostu.ru.

Черепенько Аркадий Анатольевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, arkancher@yandex.ru.

Поступила в редакцию 15 июня 2016 г.

THE KINEMATIC MODEL OF FORMATION OF COMPLEX SURFACES WITH THREE NONE LINEAR MOVEMENTS FORMING

S. Ambrosimov¹, *ambsk@mail.ru*,
G. Harlamov², *ipk@ostu.ru*,
A. Cherepenko², *arkancher@yandex.ru*

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation,

²Orel State University, Orel, Russian Federation

In the modern mechanical engineering when processing stamps and compression molds milling used as one of the most productive and universal methods of processing. Productivity of milling is caused by high concentration of the cutting edges which are at the same time participating in process of cutting and a possibility of non-linear coordination between separate movements. But when milling difficult shaped surfaces the problems connected to large volumes of the deleted metal layers that leads in fast wear of the tool and poor performance of processing take place.

Use of multicoordinate machines with numerical-program control allowed to use in processing of shaped surfaces difficult kinematics with non-linear coordination of movements on several coordinates at the same time, but opportunities are used by it insufficiently.

In article the most known methods of a running with non-linear movement of a shaping are considered. The universal, high-performance method of processing of difficult curvilinear surfaces which is realized by the tool with two conical and toroidal surfaces is selected, process of a running in of a difficult profile is described by a combined tool. The kinematic model of coordination for kinematic schemes with three non-linear it is coordinated by the movements lying in one plane is provided and also three types of coordination of movement are selected. The first – serves for processing of a concave arc section of a surface in case of value of an angle of generatrix of the tool $\alpha < \beta$ – an angle between tangents to the opposite sides of a profile of a processed surface in points of their conjugation to concave sections of a profile. The second type of coordination is applied to processing of convex and rectilinear sections of profiles by method of rounding of a generatrix without slip ($p = 1$) and with slip of p , constant on value, $p = \text{const}$. The third type of coordination is used only when processing sections of a processed surface near points of conjugations of profiles in case of value of an angle between tangents in points of conjugations less than 90° .

Keywords: milling of difficult surfaces, kinematics difficult coordinated movements.

Received 15 June 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Амбросимов, С.К. Кинематическая модель с тремя нелинейными движениями формообразования сложных поверхностей / С.К. Амбросимов, Г.А. Харламов, А.А. Черепенько // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 63–71. DOI: 10.14529/engin160308

FOR CITATION

Ambrosimov S., Harlamov G., Cherepenko A. The Kinematic Model of Formation of Complex Surfaces with Three None Linear Movements Forming. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 63–71. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin160308