

УДК 621.914.1

doi: 10.18698/0536-1044-2019-3-11-20

Влияние ориентации инструмента на силы резания при концевом фрезеровании

Б.Б. Пономарев, Ши Хьен Нгуен

Иркутский национальный исследовательский технический университет

The Influence of Tool Orientation on Cutting Forces during End Milling

B.B. Ponomarev, Nguyen Sy Hien

Irkutsk National Research Technical University

Приведены результаты однофакторного моделирования и анализа влияния ориентации инструмента по углам наклона и опережения на силы резания при чистовой обработке деталей сфероцилиндрической фрезой. Для построения границ и области контакта инструмента с заготовкой использована программа NX 10, а для создания трехмерной конечно-элементной модели и нахождения сил резания — программный продукт SIMULIA ABAQUS. Получены зависимости сил резания от угла поворота инструмента при различной ориентации оси инструмента относительно нормали к обрабатываемой поверхности. Результаты исследования позволят осуществить переход к двухфакторному анализу влияния комбинации углов наклона и опережения инструмента на силы резания и к определению оптимальной ориентации инструмента при пятикоординатном фрезеровании с максимальной производительностью.

Ключевые слова: ориентация инструмента, пятикоординатная обработка, угол наклона, угол опережения, сфероцилиндрическая фреза, силы резания

This article presents the results of single-factor modeling and analysis of the influence of tool orientation with regard to the tilt angle and lead angle, on cutting forces when finish milling by a ball end cutter. The program NX 10 is used to build boundaries and contact areas of the tool and the workpiece, and the SIMULIA ABAQUS software is used to create a three-dimensional finite element model and determine the cutting forces. Graphs that describe dependencies of the cutting forces on the tool rotation angle are obtained for different orientations of the tool axis relative to the surface normal. The computational results will allow transition to the two-factor analysis of the influence of tilt angle combinations on the cutting forces and the determination of the optimal tool orientation during five-axis milling with maximum productivity.

Keywords: tool orientation, five-axis milling, tilt angle, lead angle, ball end mill, cutting forces

В отличие от концевой фрезерования на трехкоординатных станках при пятикоординатной обработке инструмент может быть сориентирован под любым углом к оси OZ станка, что позволяет избежать его столкновения с заготовкой и исключить контакт вершины инструмента — точки на режущей кромке с нулевой скоростью резания — из процесса обработки [1]. При этом

положение инструмента относительно обрабатываемой поверхности в точке их контакта определяют два дополнительных параметра: углы наклона и опережения инструмента относительно нормали к обрабатываемой поверхности [2, 3].

Большая часть предшествующих исследований в области механической обработки слож-

нопрофильных деталей на пятикоординатных станках была сосредоточена на изучении и анализе геометрических аспектов решения проблем, связанных с получением эффективных траекторий движения инструмента [4–6]. Взаимосвязь между геометрией формируемой поверхности в процессе концевой фрезерования и его динамикой до сих пор мало изучена.

Авторами работ [7, 8] предложены математические модели для теоретического определения сил резания в различных положениях инструмента путем преобразования систем координат, связанных с ним и заготовкой. Однако результаты реализации этих моделей и способ выбора оптимального положения инструмента для получения максимальной производительности и эффективности процесса обработки в этих статьях не представлены.

Разрабатываемый метод оптимизации процесса чистового фрезерования предполагает проведение анализа динамических характеристик в локальных областях сложной поверхности. При этом сначала поверхности свободной формы разбивают на отдельные области по значениям кривизны, а затем для каждой области проводят выбор инструментов и ориентации их положения при фрезеровании [9, 10].

При смене ориентации инструмента относительно сложнопрофильной поверхности изменяется форма мгновенной поверхности касания инструмента с заготовкой, а следовательно, и нагрузки, действующие на него. Скорость резания на вершине инструмента равна нулю, поэтому, когда эта точка находится в зоне контакта с заготовкой, а продольная подача стола станка осуществляется с постоянной скоростью, происходит увеличение нагрузки на инструмент. Вследствие этого снижается качество поверхностного слоя получаемой детали.

При подготовке управляющих программ обработки фрезерованием сложнопрофильных поверхностей деталей перед разработчиком встает задача: безошибочно назначить углы наклона и опережения концевой инструмента (как правило, сфероцилиндрической фрезы). При этом необходимо выполнить требования конструкторской документации, предъявляемые к качеству поверхностного слоя детали. Назначаемые параметры ориентации инструмента не должны приводить к возникновению критических значений сил резания и амплитудно-частотных характеристик процесса, обеспечивая при этом максимальную производительность обработки.

Цель работы — моделирование и анализ влияния изменения углов наклона и опережения инструмента на силы резания.

Для моделирования процесса концевой фрезерования использован инженерный программный продукт SIMULIA ABAQUS. В качестве инструмента выбрана двузубая сфероцилиндрическая фреза диаметром 2 мм из стали P18, а в качестве заготовки — пластина из стали 45. Линейно-эластические и пластические свойства материалов представлены в моделях Джонсона–Кука [11, 12].

При исследовании влияния позиции инструмента относительно нормали к заготовке в точке касания режимы резания были неизменными.

Режимы резания в моделях ABAQUS

Глубина резания, мм 0,22
 Частота вращения шпинделя, мин⁻¹ 12 500
 Подача на зуб, мм/зуб 0,025
 Скорость подачи стола, м/мин 0,625

Трансформирование систем координат. В программе ABAQUS сила резания, действующая на инструмент, определяется проекциями F_x , F_y и F_z на три координатные оси OX , OY и OZ системы координат заготовки (СКЗ), которая принята как абсолютная.

В работах [13, 14] для преобразования касательной F_k , радиальной F_p и осевой F_o составляющих силы резания в проекции силы на координатные оси системы координат инструмента (СКИ) F_{x_i} , F_{y_i} и F_{z_i} предложено использовать метод преобразования координат с применением матриц элементарных переходов:

$$\begin{bmatrix} dF_{x_i} \\ dF_{y_i} \\ dF_{z_i} \end{bmatrix} = T_i \begin{bmatrix} dF_p \\ dF_k \\ dF_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin K \sin \varphi & -\cos \varphi & -\cos K \sin \varphi \\ -\sin K \cos \varphi & \sin \varphi & -\cos K \cos \varphi \\ \cos K & 0 & -\sin K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_p \\ dF_k \\ dF_o \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где T_i — матрица для преобразования радиальной F_p , касательной F_k и осевой F_o составляющих силы резания в проекции сил резания СКИ; $K = K(z)$ — осевой угол погружения точки P фрезы (рис. 1); $\varphi = \varphi_j(z)$ — угол погружения [6].

Угол погружения — это угол между плоскостью $OY'Z'$ системы координат, связанной с ин-

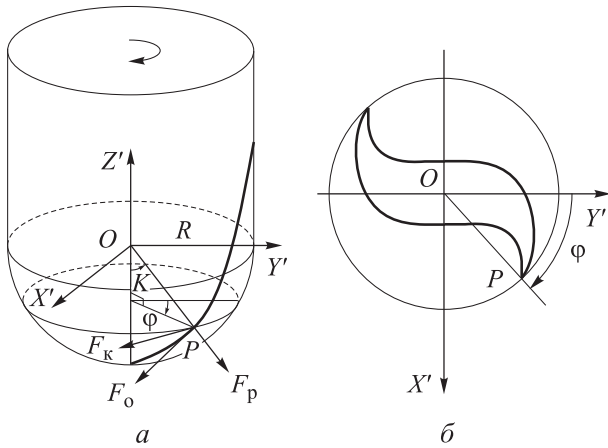


Рис. 1. Схемы сфероцилиндрической фрезы (а) и ее сечения в точке P (б)

струментом, и плоскостью, проходящей через его ось и точку P на его режущей кромке, расположенной на плоскости, ограничивающей условное погружение сферической части фрезы в заготовку при обработке на глубину резания.

Осовой угол погружения определяется углом между осью OZ' инструмента и линией, соединяющей центр его сферы с точкой P (см. рис. 1), — нормалью к ребру кромки в точке P. При необходимости преобразования проекций силы резания F_x , F_y и F_z , связанных с СКЗ, в проекции F_p , F_k и F_o сначала следует трансформировать их в СКИ, а затем использовать обратную матрицу (1) для перехода от значений проекций силы резания, определенных в СКИ, к F_p , F_k и F_o .

Элементарными преобразованиями координат можно воспользоваться при переходе от СКЗ к СКИ с учетом значений углов наклона и опережения инструмента. Угол наклона опре-

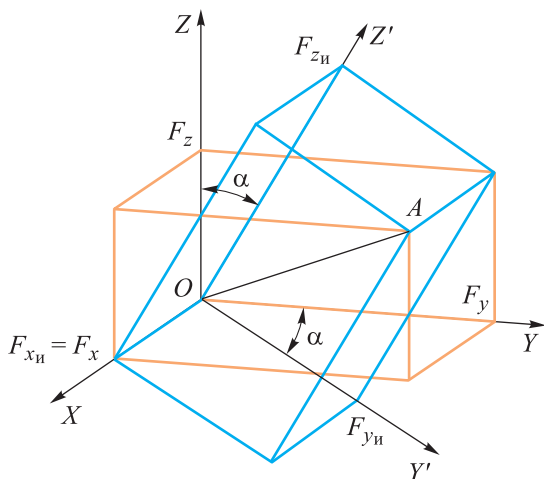


Рис. 2. Схема положения СКЗ относительно СКИ

деляет ориентацию фрезы относительно нормали к обрабатываемой поверхности в плоскости, перпендикулярной направлению продольной подачи по оси X в СКЗ (рис. 2).

СКЗ связана с системой координат станка, переход к ней из системы координат инструмента осуществляется путем условного поворота СКИ относительно оси X на угол α . При описании преобразований необходимо учитывать, что положительным углом условного поворота осей до их совмещения, определенного методикой применения элементарных преобразований, считается угол, отсчитываемый по ходу часовой стрелки, если смотреть с острия оси, вокруг которой происходит условный поворот (соответствует правилу правого винта) [15].

На рис. 2 положение СКЗ относительно СКИ определено углом наклона инструмента α (углом между его осью и нормалью к обрабатываемой поверхности в плоскости OYZ). Значения проекций сил резания с учетом трансформирования СКЗ в СКИ в матричной форме определяются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} F_{xi} \\ F_{yi} \\ F_{zi} \end{bmatrix} = T_\alpha \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где T_α — матрица для преобразования проекций сил резания из СКЗ в СКИ при ориентации инструмента по углу его наклона α .

По результатам моделирования силы резания при $\alpha = 30^\circ$ в программе ABAQUS построены графики (рис. 3), отображающие характер изменения проекций силы резания в зависимости от угла поворота инструмента вокруг оси θ в пределах $0 \dots 2\pi$.

При ориентации инструмента по углу опережения β СКИ условно поворачивается вокруг оси OY на угол β . При этом проекция силы резания F_y остается постоянной, а F_x и F_z изменяются в соответствии с преобразованием по формуле

$$\begin{bmatrix} F_{xi} \\ F_{yi} \\ F_{zi} \end{bmatrix} = T_\beta \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где T_β — матрица для преобразования проекций сил резания из СКЗ в СКИ при ориентации инструмента по углу опережения β .

Зависимости проекций силы резания в СКЗ и СКИ от угла поворота инструмента при фре-

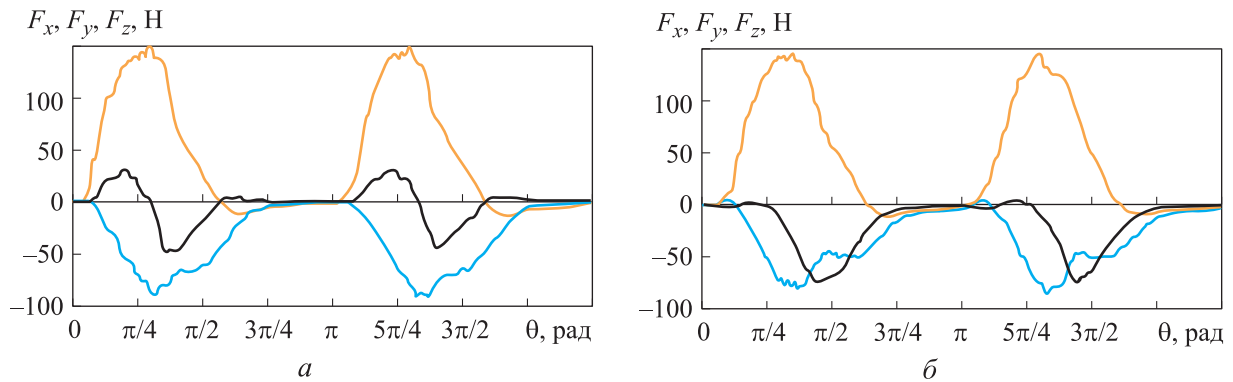


Рис. 3. Зависимости проекций силы резания F_x (—), F_y (—) и F_z (—) в СКЗ (а) и СКИ (б) от угла поворота инструмента θ при фрезеровании с углом наклона $\alpha = 30^\circ$

зеровании с углом опережения $\beta = 330^\circ$ приведены на рис. 4.

При одновременном изменении положения инструмента по углам наклона α и опережения β элементарные повороты должны выполняться в строгой последовательности: сначала условный поворот вокруг оси OX СКЗ $OXYZ$ на угол α , затем условный поворот полученной системы в $OXY'Z'$ вокруг оси OY' на угол β' .

Угол β' , являющийся углом опережения для элементарного преобразования системы коор-

динат $OXY'Z'$ в систему $OX_{ii}Y_{ii}Z_{ii}$, определяется выражением

$$\beta' = \arcsin\left(\frac{\sin \alpha \cos \beta}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \beta}}\right). \quad (4)$$

Исходя из выражений (2) и (3), можно определить матрицу \mathbf{T} для преобразования проекций сил резания из СКЗ в СКИ при одновременном повороте инструмента на углы наклона α и опережения β :

$$\begin{bmatrix} F_{x_{ii}} \\ F_{y_{ii}} \\ F_{z_{ii}} \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix}.$$

Здесь

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_{\beta'} \mathbf{T}_{\alpha} = \begin{bmatrix} \cos \beta' & \sin \alpha \sin \beta' & \cos \alpha \sin \beta' \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ -\sin \beta' & \sin \alpha \cos \beta' & \cos \alpha \cos \beta' \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{T}_{\beta'}$ — матрица для преобразования проекций сил резания из СКЗ в СКИ при ориентации инструмента по углу опережения β' .

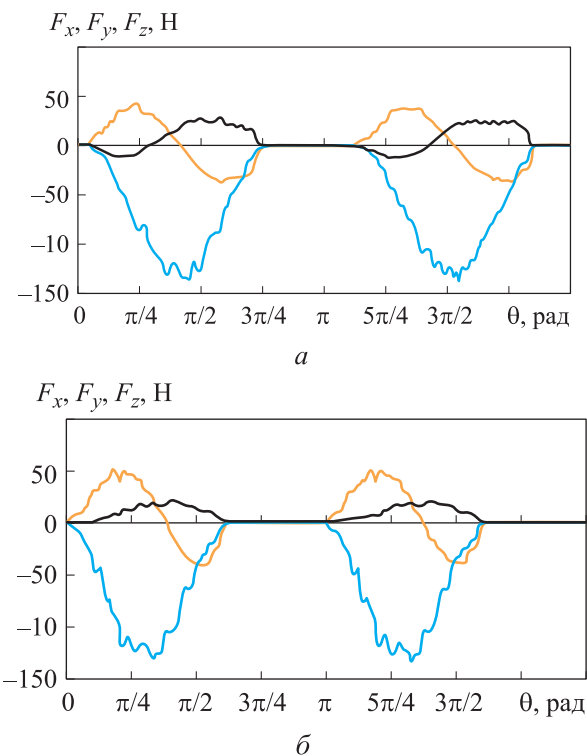


Рис. 4. Зависимости проекций силы резания F_x (—), F_y (—) и F_z (—) в СКЗ (а) и СКИ (б) от угла поворота инструмента θ при фрезеровании с углом опережения $\beta = 330^\circ$

Геометрический анализ. Следует иметь в виду, что при ориентации инструмента под углом опережения β и осуществлении резания с постоянной глубиной t форма следа, образуемого режущей частью концевой фрезы (в том числе и сфероцилиндрической) остается постоянной, а при наклоне α она может изменяться. Это происходит, когда цилиндрическая часть инструмента входит в зону снятия стружки с заготовки. Области контакта между заготовкой и сфероцилиндрической фрезой радиусом R , вид винтовой линии его следа и нагрузки на инструмент резко изменяются, когда его точка A

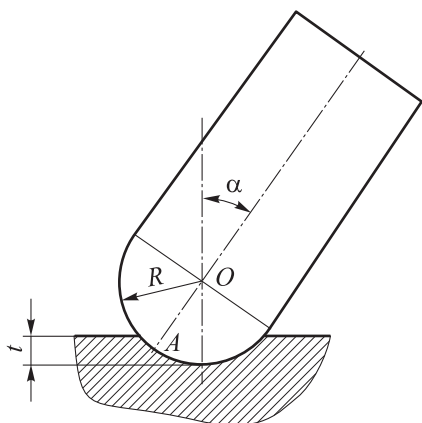


Рис. 5. Схема относительного положения инструмента и заготовки

(рис. 5), имеющая скорость резания, равную нулю, выходит из зоны обработки.

Анализ позиций точки A инструмента позволил выявить условия ее нахождения и выхода из зоны резания при изменении угла α от 0 до 90°:

- если

$$\alpha \leq \arccos \frac{R-t}{R}, \quad (5)$$

то точка A находится в зоне обработки;

- если

$$\alpha > \arccos \frac{R-t}{R}, \quad (6)$$

то точка A вышла из зоны обработки.

При выходе точки A с нулевой скоростью резания из зоны контакта с заготовкой средняя скорость резания кромки зуба сфероцилиндрической фрезы возрастает вследствие увеличения эффективного диаметра инструмента, что позволяет повысить подачу на зуб без потери качества поверхностного слоя в зоне снятия стружки, а также производительность процесса и качество, исключив остаточный след этой точки в строке траектории движения инструмента.

При $270^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ условия (5) и (6) изменяются следующим образом:

- если

$$\alpha \leq \arccos \frac{R-t}{R},$$

то точка A вышла из зоны обработки;

- если

$$\alpha > \arccos \frac{R-t}{R},$$

то точка A находится в зоне обработки.

Например, при резании плоской поверхности сфероцилиндрической фрезой диаметром 2 мм с глубиной резания $t = 0,22$ мм нулевая точка начинает выходить из зоны контакта с заготовкой при $\alpha = 38,74^\circ$ или $\alpha = 321,26^\circ$.

При ориентации инструмента по углу опережения β , который изменяется от 0 до 90°, точка A фрезы прекращает участвовать в процессе снятия стружки с заготовки при условиях (5) и (6). При изменении β в диапазоне 270...360° точка A всегда находится вне зоны контакта с заготовкой.

Кроме того, ориентация инструмента относительно нормали к обрабатываемой поверхности определяет форму области условных поверхностей касания инструмента с заготовкой и контакта с ней его режущей части. Изменение положения инструмента по углам α и β приводит к изменению скорости резания в различных точках режущего зуба сфероцилиндрической фрезы [11]. На рис. 6 показаны виды условной поверхности контакта инструмента с заготовкой в разных его положениях, где S — подача.

Влияние угла наклона на силы резания. На рис. 7 приведены результаты моделирования процесса фрезерования заготовки и определения проекций сил резания F_x , F_y и F_z в СКЗ при различных углах наклона инструмента. Положительным принят угол наклона инструмента, отсчитываемый против часовой стрелки от нормали (см. рис. 2). Значения угла находятся в интервалах 0...90° и 270...360°.

При угле наклона $\alpha = 30$ и 330° точка A сфероцилиндрической фрезы диаметром $D = 2$ мм при $t = 0,22$ мм еще находится в зоне контакта с заготовкой. При этом инструмент с четным количеством зубьев одновременно участвует и в попутном, и во встречном фрезеровании. Когда же угол наклона составляет 60° (300° при противоположном направлении наклона), нулевая точка выходит из зоны резания, и происходит процесс снятия стружки либо во встречном направлении, либо в попутном.

Из рис. 7 следует, что при встречном фрезеровании силы резания, действующие на зуб, плавно увеличиваются и резко уменьшаются по значению, а при попутном фрезеровании они резко повышаются, а затем снижаются, что соответствует теоретическим заключениям, сделанным в работах [16, 17].

Можно сделать вывод, что при изменении угла наклона от 30 до 60° проекция силы реза-

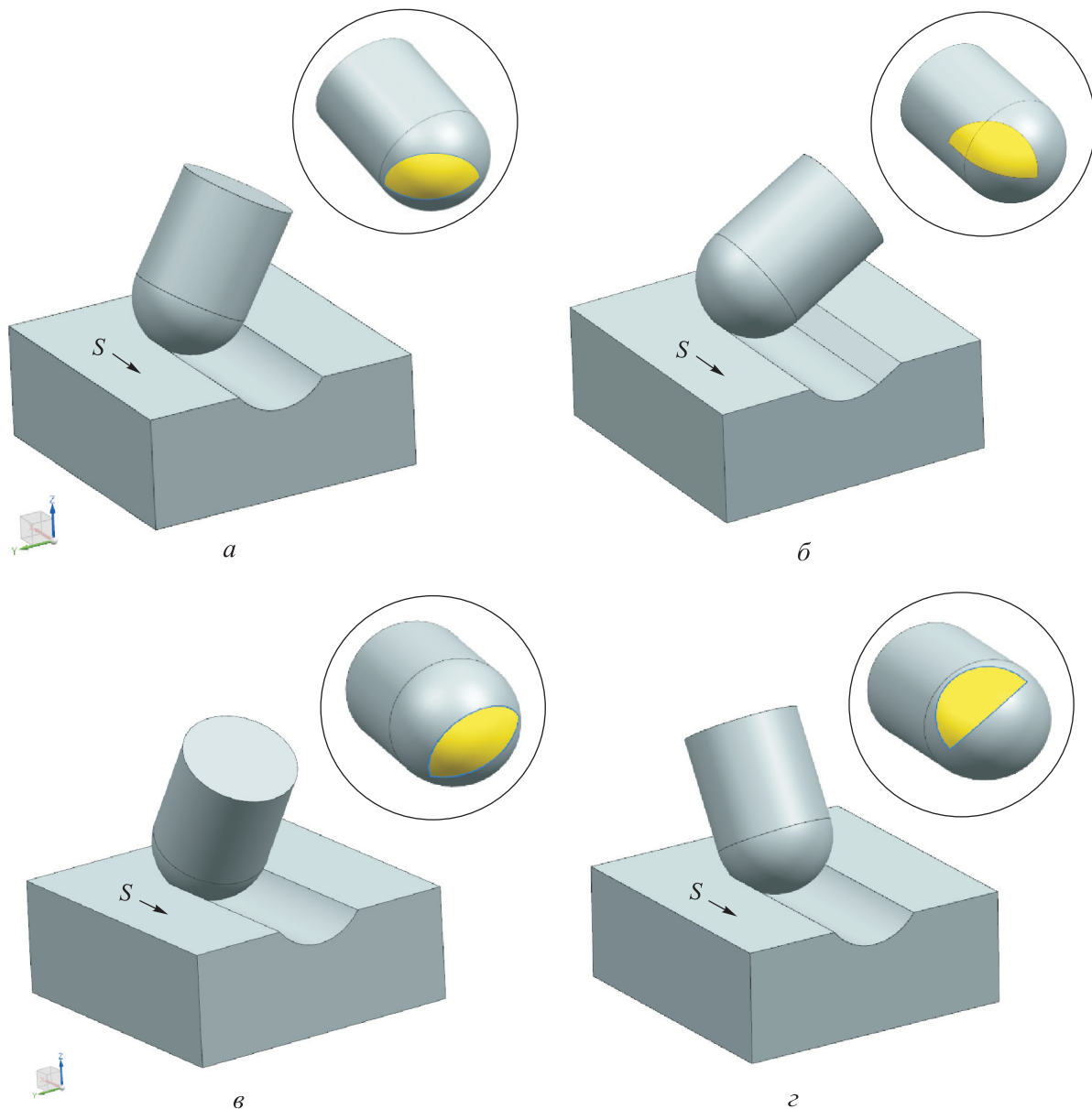


Рис. 6. Виды условной поверхности контакта заготовки и инструмента при различных значениях углов наклона и опережения:
 $a - \alpha = 30^\circ$; $б - \alpha = 60^\circ$; $в - \beta = 30^\circ$; $г - \beta = 330^\circ$

ния F_x увеличивается почти в 2 раза, F_y остается постоянной, а F_z изменяется и по значению, и по направлению.

Влияние угла опережения на силы резания. Результаты моделирования фрезерования и определения проекций сил резания при изменении угла опережения инструмента в СКЗ приведены на рис. 8. Угол опережения изменялся в интервалах $0...90^\circ$ и $270...360^\circ$.

При изменении угла опережения в пределах $270...360^\circ$ нулевая точка инструмента находится вне зоны касания с обрабатываемой заготов-

кой. Снятие стружки происходит с прерыванием, что оказывает неблагоприятное воздействие на процесс резания и инструмент, который одновременно участвует и во встречном, и в попутном фрезеровании.

В случае полного поворота инструмента на 360° знак проекций силы резания F_x и F_z изменяется на противоположный. При смене угла опережения с 330 на 300° проекция силы резания F_x уменьшается, а F_y и F_z резко возрастают. При угле опережения инструмента $\beta = 0$ и 90 значения проекций силы резания F_x , F_y и F_z меньше, чем в предыдущем случае (см. рис. 8).

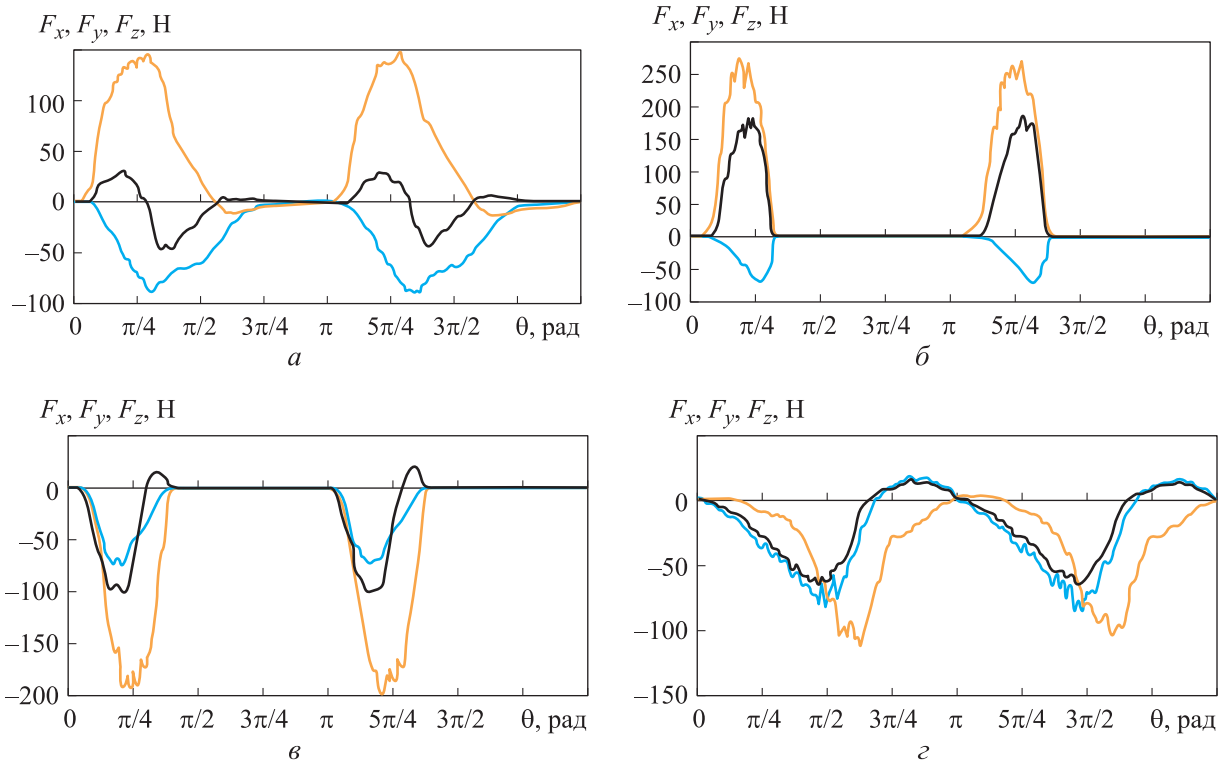


Рис. 7. Зависимости проекций силы резания F_x (—), F_y (—) и F_z (—) от угла поворота инструмента θ при фрезеровании с углом наклона $\alpha = 30$ (а), 60 (б), 300 (в) и 330° (г)

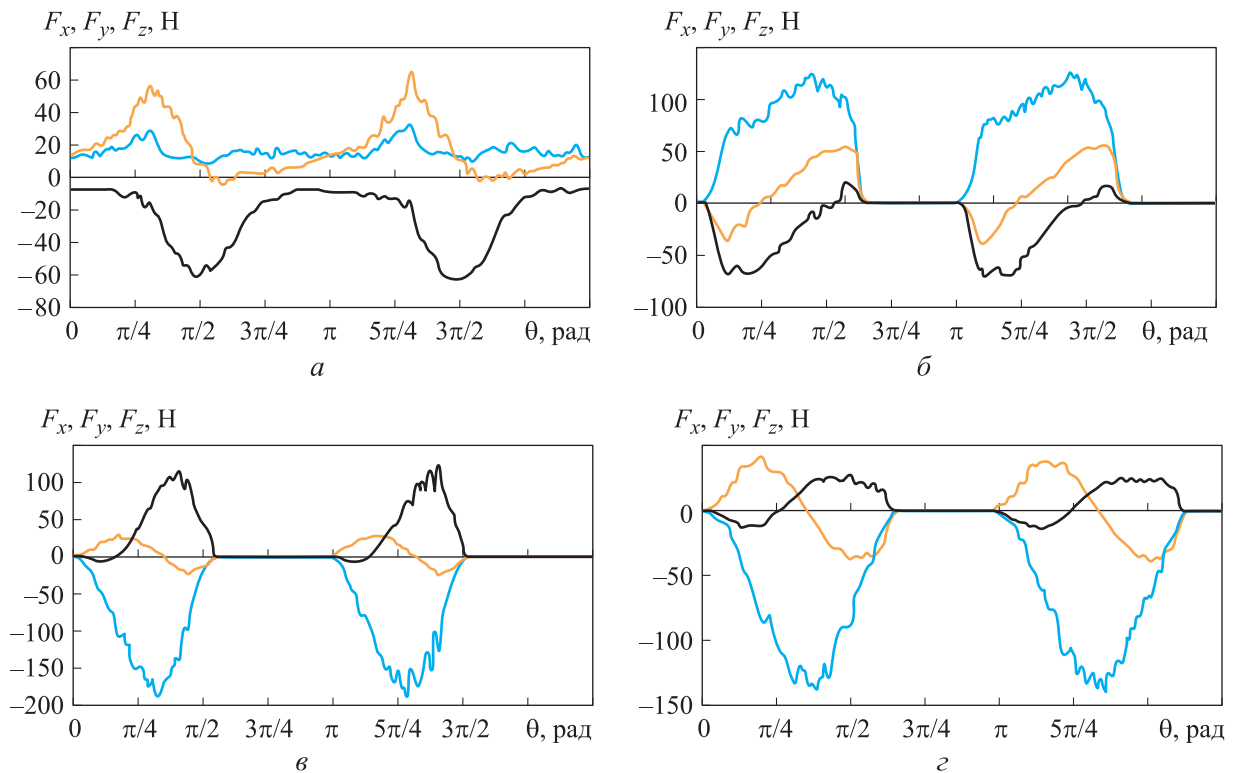


Рис. 8. Зависимости проекций силы резания F_x (—), F_y (—) и F_z (—) от угла поворота инструмента θ при фрезеровании с углом опережения $\beta = 30$ (а), 60 (б), 300 (в) и 330° (г)

При угле опережения, равном 60, проекция силы резания F_y значительно увеличивается.

Выводы

1. В программе NX 10 созданы модели для геометрического анализа положения инструмента относительно нормали к заготовке и для построения поверхности условного касания фрезы в зоне контакта заготовки с формообразующей частью инструмента при пятикоординатном фрезеровании. По результатам анализа определены условия, при которых исключается контакт с заготовкой точки инструмента, имеющей нулевую скорость резания в процессе фрезерования, что позволяет повысить качество обработанной поверхности.

2. Результаты численного расчета в программном комплексе ABAQUS позволили оценить влияние углов наклона и опережения инструмента на силы резания и сделать следующие заключения:

- при смене угла наклона с 30 на 60° (или с 330 на 300°) проекция силы резания F_x на ось,

совпадающую с направлением подачи стола, увеличивается в 2 раза, проекция F_y остается постоянной, а проекция силы резания на нормаль к заготовке F_z изменяется как по значению, так и по направлению;

- при углах опережения, обеспечивающих попутное фрезерование, значения проекций силы резания меньше, чем при углах, порождающих встречное фрезерование. При возрастании угла опережения резко увеличивается проекция силы резания F_y ;

- при нахождении точки инструмента, имеющей скорость резания, равную нулю, в зоне удаления стружки проекции силы резания в процессе снятия стружки за один оборот изменяются без резких скачков как по значению, так и по направлению.

3. Результаты моделирования являются основой для создания моделей и исследования двухфакторной зависимости при различных комбинациях углов наклона и опережения, а также для оптимизации углов позиционирования инструмента при концевом фрезеровании поверхностей на пятикоординатных станках с ЧПУ.

Литература

- [1] Prat D., Fromentin G., Poulachon G., Duc E. Experimental Analysis and Geometrical Modeling of Cutting Conditions Effect in 5 Axis Milling with Ti6Al4V Alloy. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1, pp. 84–89, doi: 10.1016/j.procir.2012.04.013
- [2] Jensen C.G., Red W.E., Pi J. Tool selection for five-axis curvature matched machining. *Computer-Aided Design*, 2002, vol. 34, pp. 251–266, doi: 10.1016/S0010-4485(01)00086-0
- [3] Ozturk E., Tunc L.T., Budak E. Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, vol. 49, pp. 1053–1062, doi: 10.1016/j.ijmactools.2009.07.013
- [4] Min L., Dong S., Li D. Tool Orientation Planning Method Based on Divided Surface. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 174, pp. 878–884, doi: 10.1016/j.proeng.2017.01.236
- [5] Mi Z., Yuan C., Ma X., Shen L. Tool orientation optimization for 5-axis machining with C-space method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 88, pp. 1243–1255, doi: 10.1007/s00170-016-8849-0
- [6] Sun C., Altintas Y. Chatter free tool orientations in 5-axis ball-end milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2016, vol. 106, pp. 89–97, doi: 10.1016/j.ijmactools.2016.04.007
- [7] Ozturk E., Budak E. Modeling of 5-axis milling processes. *Machining Science and Technology*, 2007, vol. 11, iss. 3, pp. 287–311.
- [8] Boz Y., Erdim H., Lazoglu I. Modeling Cutting Forces for Five axis Milling of Sculptured Surfaces. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 223, pp. 701–712, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.223.701
- [9] Пономарев Б.Б., Нгуен Ш.Х. Алгоритм разбиения поверхностей свободной формы по значениям кривизны при подготовке управляющих программ для станков с ЧПУ. *Вестник ИрГТУ*, 2018, т. 22, № 4, с. 62–72, doi: 10.21285/1814-3520-2018-4-62-72
- [10] Ponomarev B.B., Hien N.S. Finish milling dynamics simulation considering changing tool angles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327, iss. 2, art. no. 022083, doi: 10.1088/1757-899X/327/2/022083

- [11] Пономарев Б.Б., Нгуен Ш.Х. Моделирование и анализ влияния условий обработки на силы резания при концевом фрезеровании. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*, 2018, т. 59, № 3, с. 8–16, doi: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).8-16
- [12] Johnson G.R., Cook W.H. Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain rates, Temperatures and Pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, vol. 21, no. 1, pp. 31–48, doi: 10.1016/0013-7944(85)90052-9
- [13] Ozturk E., Ozlu E., Budak E. Modeling Dynamics and Stability of 5-axis Milling Processes. *Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations*, Reggio Calabria, Italy, 2007, pp. 469–476.
- [14] Lee P., Altintas Y. Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1996, vol. 36, pp. 1059–1072, doi: 10.1016/0890-6955(95)00081-X
- [15] Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике (для научных работников и инженеров)*. Москва, Мир, 1982. 680 с.
- [16] Вульф А.М. *Резание металлов*. Ленинград, Машиностроение, 1973. 496 с.
- [17] Резников Н.И. *Учение о резании металлов*. Москва, Машгиз, 1947. 588 с.

References

- [1] Prat D., Fromentin G., Poulachon G., Duc E. Experimental Analysis and Geometrical Modeling of Cutting Conditions Effect in 5 Axis Milling with Ti6Al4V Alloy. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1, pp. 84–89, doi: 10.1016/j.procir.2012.04.013
- [2] Jensen C.G., Red W.E., Pi J. Tool selection for five-axis curvature matched machining. *Computer-Aided Design*, 2002, vol. 34, pp. 251–266, doi: 10.1016/S0010-4485(01)00086-0
- [3] Ozturk E., Tunc L.T., Budak E. Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, vol. 49, pp. 1053–1062, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.07.013
- [4] Mina L., Donga S., Lia D. Tool Orientation Planning Method Based on Divided Surface. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 174, pp. 878–884.
- [5] Mi Z., Yuan C., Ma X., Shen L. Tool orientation optimization for 5-axis machining with C-space method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 88, pp. 1243–1255.
- [6] Sun C., Altintas Y. Chatter free tool orientations in 5-axis ball-end milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2016, vol. 106, pp. 89–97, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2016.04.007
- [7] Ozturk E., Budak E. Modeling of 5-axis milling processes. *Machining Science and Technology*, 2007, vol. 11, iss. 3, pp. 287–311, doi: 10.1080/10910340701554808
- [8] Boz Y., Erdim H., Lazoglu I. Modeling Cutting Forces for Five axis Milling of Sculptured Surfaces. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 223, pp. 701–712, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.223.701
- [9] Ponomarev B.B., Nguyen Sh.Kh. An algorithm for free form surface partitioning based on surface curvature values under control program development for CNC machine-tools. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2018, vol. 22, no. 4, pp. 62–72 (in Russ.), doi: 10.21285/1814-3520-2018-4-62-72
- [10] Ponomarev B.B., Hien N.S. Finish milling dynamics simulation considering changing tool angles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327, iss. 2, art. no. 022083, doi: 10.1088/1757-899X/327/2/022083
- [11] Ponomarev B.B., Nguyen Sh.Kh. Modeling and analysis of influence of process conditions on cutting forces during end milling. *Modern technologies, system analysis, modeling*, 2018, vol. 59, no. 3, pp. 8–16, doi: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).8-16
- [12] Johnson G.R., Cook W.H. Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain rates, Temperatures and Pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, vol. 21, no. 1, pp. 31–48, doi: 10.1016/0013-7944(85)90052-9
- [13] Ozturk E., Ozlu E., Budak E. Modeling Dynamics and Stability of 5-axis Milling Processes. *Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations*, Reggio Calabria, Italy, 2007, pp. 469–476.

- [14] Lee P., Altintas Y. Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1996, vol. 36, pp. 1059–1072, doi: 10.1016/0890-6955(95)00081-X
- [15] Korn G.A., Korn T.M. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*. McGraw-Hill Companies, 1961. (Russ. ed.: Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov)*. Moscow, Mir publ., 1982. 680 p.)
- [16] Vul'f A.M. *Rezaniye metallov* [Metal cutting]. Leningrad, Mashinostroyeniye publ., 1973. 496 p.
- [17] Reznikov N.I. *Ucheniye o rezanii metallov* [Theory of metal cutting]. Moscow, Mashgiz publ., 1947. 588 p.

Статья поступила в редакцию 18.01.2019

Информация об авторах

ПОНОМАРЕВ Борис Борисович — доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: pusw@istu.edu).

НГУЕН Ши Хьен — аспирант кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: syhiendk35@gmail.com).

Information about the authors

PONOMAREV Boris Borisovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technology and Equipment for Mechanical Manufacturing. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: pusw@istu.edu).

NGUYEN Sy Hien — Postgraduate, Department of Technology and Equipment for Mechanical Manufacturing. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: syhiendk35@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Пономарев Б.Б., Нгуен Ши Хьен. Влияние ориентации инструмента на силы резания при концевом фрезеровании. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 3, с. 11–20, doi: 10.18698/0536-1044-2019-3-11-20

Please cite this article in English as:

Ponomarev B.B., Nguyen Sy Hien. The Influence of Tool Orientation on Cutting Forces during End Milling. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 3, pp. 11–20, doi: 10.18698/0536-1044-2019-3-11-20