

МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING

Саблин П. А., Жигалкин К. А.
P. A. Sablin, K. A. Zhigalkin

ДИНАМИКА СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

DYNAMICS OF CUTTING FORCES IN HIGH SPEED MILLING

Саблин Павел Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ikpmto@knastu.ru.

Mr. Pavel A. Sablin – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering Technology Federal State-financed Educational Institution of Higher Professional Learning Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: ikpmto@knastu.ru.

Жигалкин Константин Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: sapr@knastu.ru.

Mr. Konstantin A. Zhigalkin – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer-Aided Design of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: sapr@knastu.ru.

Аннотация. В статье рассматриваются исследования динамики технологических систем механической обработки. Они необходимы для дальнейшего развития машиностроительного производства. Обеспечение условий устойчивого движения заготовки и инструмента связано с динамикой процесса механической обработки и является одной из наиболее важных задач. Очень сложной динамикой обладает процесс высокоскоростного фрезерования, будучи наиболее нестационарным из процессов механической обработки. В статье рассматривается влияние оборотной подачи на толщину среза. Предлагается способ математического расчёта направления силы резания. Выявляются наиболее целесообразное направление резания и способы ориентации измерительных датчиков. Представляется зависимость толщины срезаемого слоя при высокоскоростном фрезеровании, и приводятся основные выводы. В заключении статьи содержатся рекомендации по ориентации измерительных датчиков для встречного и попутного фрезерования.

Summary. The article deals with the study of the dynamics of technological systems of machining. They are necessary for further development of machine-building production. Ensuring the conditions of stable movement of the workpiece and the tool is associated with the dynamics of the machining process and is one of the most important tasks. The high-speed milling process has a very complex dynamics, being the most unsteady of the machining processes. The article considers the influence of reverse feed on the thickness of the cut. A method of mathematical calculation of the direction of cutting force is proposed. The most expedient direction of cutting and methods of orientation of measuring sensors are revealed. The dependence of the thickness of the cut layer at high-speed milling is presented, and the main conclusions are given. In conclusion, the article contains recommendations on the orientation of the measuring sensors for oncoming and passing milling.

Ключевые слова: работоспособность инструмента, инструментальный материал.

Key words: tool performance, tool material.

УДК 621.9

Исследования динамики технологических систем механической обработки необходимы для разработки новых эффективных технологий машиностроительного производства. При проектировании, изготовлении и эксплуатации современных высокоскоростных металлорежущих станков всё чаще возникает необходимость решения задач, связанных с динамикой процесса обработки.

В первую очередь это относится к обеспечению условий устойчивого движения инструмента и заготовки [1].

Наиболее нестационарным из всех процессов механической обработки и обладающим вследствие этого наиболее сложной динамикой является процесс высокоскоростного фрезерования.

Для практического исследования динамики фрезерования достаточно часто бывает полезным знать примерное значение суммы сил $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_k$ резания, приложенных к режущим кромкам инструмента, и направление вектора \vec{F} равнодействующей этих сил в координатах станка. Данные параметры являются основополагающими как при расчётах погрешностей размерной точности обработки вследствие упругих перемещений технологической системы, так и при построении моделей процесса фрезерования (см. рис. 1).

Кроме того, заранее известные значения направления математического ожидания \vec{F} равнодействующей сил резания и телесного угла её разброса $\Delta\vec{F}$ позволят корректно, в соответствии с наиболее информативным пространственным направлением, расположить на станке систему датчиков для проведения экспериментальных исследований. В дальнейшем сигналы с этих датчиков с минимальной предобработкой могут быть использованы для исследования методами нелинейной динамики.

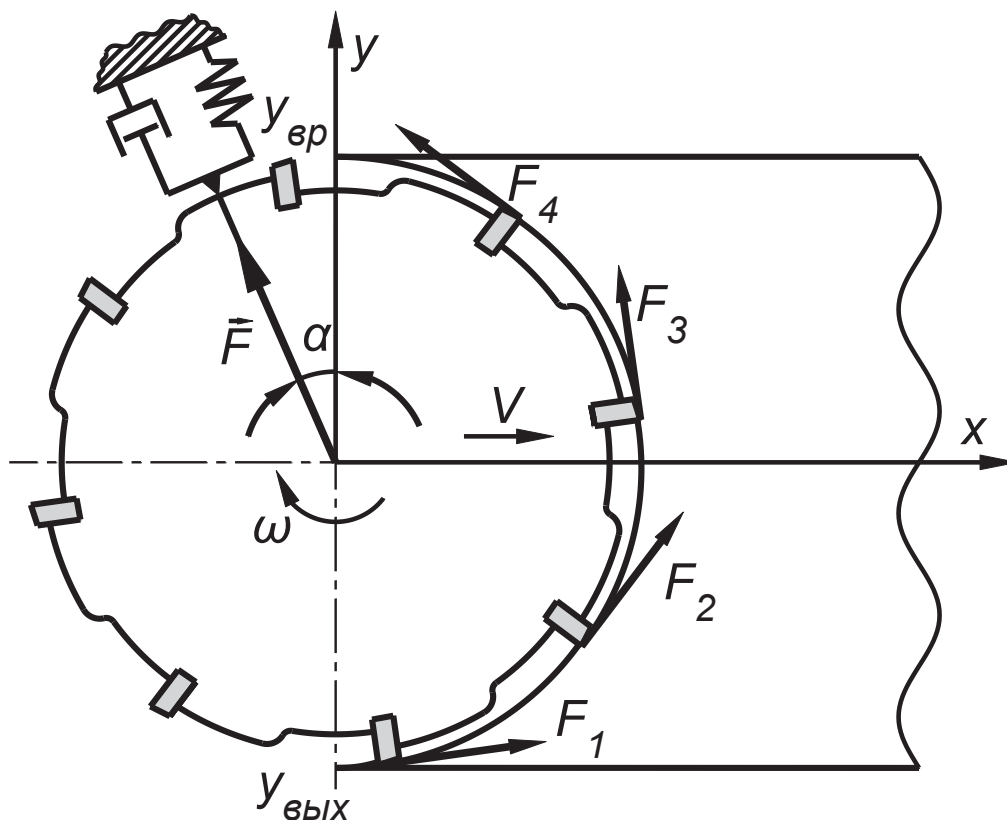


Рис. 1. Силовая схема процесса высокоскоростного фрезерования

Как известно [2], при фрезеровании траекторией относительного рабочего движения любой точки режущего лезвия является удлинённая циклоида – трохоида (см. рис. 2). Высота трохоиды равна диаметру D фрезы, а расстояние между её петлями равно величине подачи S_0 на один оборот фрезы. Траектории движения лезвий отдельных зубьев сдвинуты относительно друг друга на величину подачи S_z на один зуб фрезы, равную S_0/z , где z – количество зубьев фрезы.

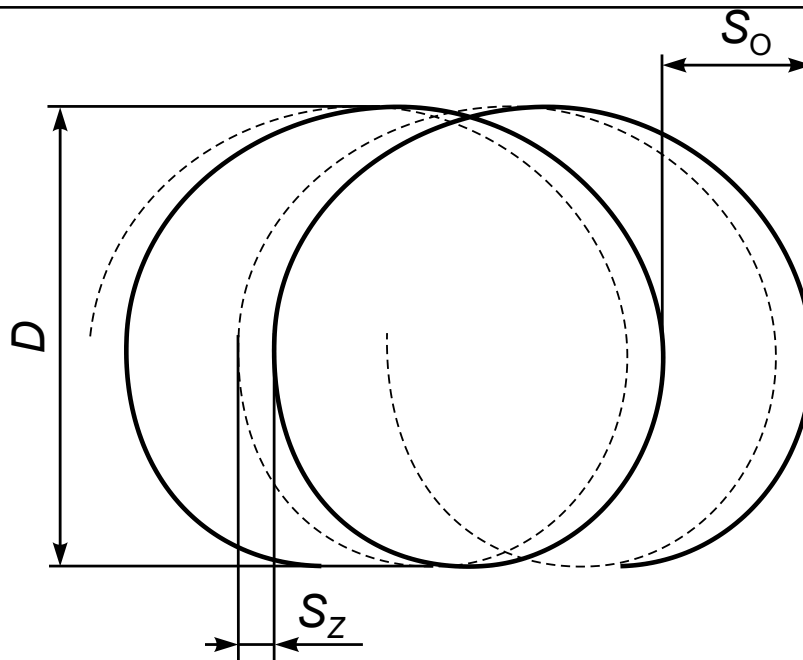


Рис. 2. Траектории рабочих движений двух смежных зубьев осевой цилиндрической фрезы (для $z = 4$ и $S_o = 0,32 D$)

Для упрощения расчёта сил резания и вычисления размеров срезаемого слоя при фрезеровании трохоиду нередко заменяют окружностью. При этом предполагается [2], что ошибка от указанной замены не будет превышать 1 %. Однако в условиях высокоскоростной обработки (ВСО) даже такая незначительная погрешность может иметь существенное значение. Зачастую высокая скорость процессов пластической деформации при ВСО в совокупности с существенной нелинейностью зависимости силы резания от толщины среза и скорости резания приводит к возникновению особого типа поведения динамической системы – детерминированному хаосу, в результате чего динамическая система станка становится очень чувствительной даже к незначительным возмущениям [3; 4]. В режиме детерминированного хаоса любая погрешность, проявляющаяся вследствие какого-либо неучтённого фактора или неточности расчётов, подвергается экспоненциальному усилению, в итоге динамика реальной динамической системы сильно отличается от расчётных данных.

Таким образом, для условий высокоскоростного фрезерования следует использовать более тонкие расчёты силы резания. Для этого представим траекторию рабочего движения режущего лезвия при фрезеровании в виде кривой, описываемой точкой $A(x, y)$, отстоящей на фиксированном расстоянии $R = D/2$ от центра $O(x_0, y_0)$ круга, причём круг вращается по часовой стрелке с угловой скоростью $\omega = V_p / (2\pi \cdot D)$, где V_p – скорость резания, а центр круга перемещается по оси абсцисс с линейной скоростью $v = S_o \cdot \omega / (2\pi)$. Тогда запишем траекторию движения зуба фрезы (на рис. 3 она обозначена сплошной линией) в виде системы параметрических уравнений:

$$\begin{cases} x = x_0 + R \cdot \cos(\varphi_0 - \omega\tau) \\ y = y_0 + R \cdot \sin(\varphi_0 - \omega\tau) \\ x_0 = S_o \cdot \frac{\omega}{2\pi} \cdot \tau \\ y_0 = 0 \end{cases},$$

где $\varphi_0 = \pi$ – начальный угол поворота фрезы; τ – параметр времени.

Теперь рассмотрим траекторию движения предыдущего зуба фрезы (на рис. 3 она обозначена штриховой линией).

Отложим отрезок от центра O фрезы до точки A текущего положения режущего лезвия. Очевидно, что мгновенное значение толщины h_z срезаемого слоя равно расстоянию от точки A до точки A_1 пересечения отрезка OA и траектории движения предыдущего зуба. Найдём координаты x_2 и y_2 этой точки.

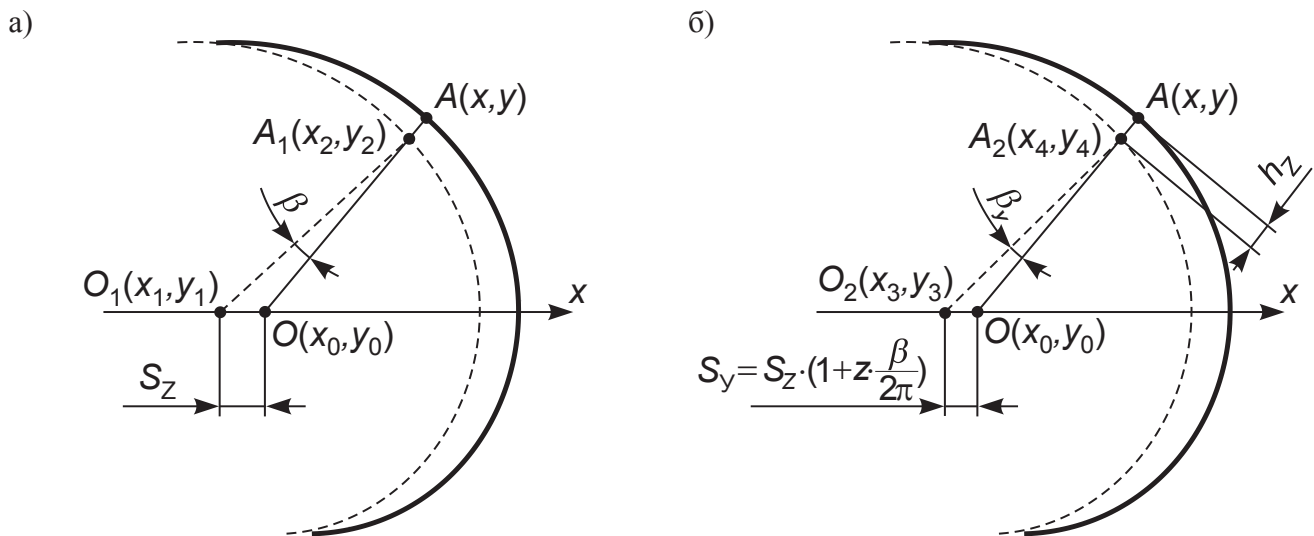


Рис. 3. Схема расчёта мгновенного значения толщины h_z срезаемого слоя:
а – предварительный расчёт; б – уточнённый расчёт

Предположим, что центр фрезы в момент прохождения предыдущим зубом точки A_1 находился в точке $O_1(x_1, y_1)$ (см. рис. 3, а), отстоящей от текущего центра фрезы O на расстояние, равное подаче на зуб S_z , то есть

$$\begin{cases} x_1 = x_0 - S_z \\ y_1 = y_0 \end{cases} \quad (1)$$

Теперь о точке A_1 нам известно, что она принадлежит отрезку OA :

$$\begin{cases} x_2 = x_0 + t \cdot (x - x_0) \\ y_2 = y_0 + t \cdot (y - y_0) \end{cases}, \quad (2)$$

$$0 \leq t \leq 1, \quad (3)$$

где t – параметр принадлежности отрезку, а во-вторых, что она удалена от точки O_1 на расстояние, равное радиусу R фрезы:

$$\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} = R. \quad (4)$$

Подставляя формулы (1) и (2) в (4), получим следующее выражение:

$$(x_0 + t \cdot (x - x_0) - (x_0 - S_z))^2 + (y_0 + t \cdot (y - y_0) - y_0)^2 = R^2,$$

которое после преобразований обращается в квадратное уравнение

$$t^2 \cdot R^2 + t \cdot (2 \cdot (x - x_0) \cdot S_z) + (S_z^2 - R^2) = 0. \quad (5)$$

Решим уравнение (5) относительно t по формуле

$$t_{1,2} = \frac{-2 \cdot (x - x_0) \cdot S_z \pm \sqrt{(2 \cdot (x - x_0) S_z)^2 - 4 \cdot R^2 \cdot (S_z^2 - R^2)}}{2 \cdot R^2},$$

что в конечном итоге приводит к появлению выражения

$$t_{1,2} = -\frac{S_z \cdot (x - x_0)}{R^2} \pm \sqrt{1 - \left(\frac{S_z \cdot (y - y_0)}{R^2}\right)^2}. \quad (6)$$

Так как по условию (3) параметр t неотрицателен, то один из корней t_2 уравнения (6), являющийся суммой двух отрицательных чисел и явно приводящий к отрицательному результату,

можно отбросить, то есть получим $t = \sqrt{1 - \left(\frac{S_z \cdot (y - y_0)}{R^2}\right)^2} - \frac{S_z \cdot (x - x_0)}{R^2}$.

Зная параметр t , из (2) найдём точку $A_1(x_2, y_2)$. Однако при анализе рис. 3, *a* выявляется некоторая неточность – отрезки OA и O_1A_1 расположены относительно друг друга под углом β . А это значит, что точкам A и A_1 соответствуют разные фазы поворота зубьев фрезы и, следовательно, действительное расстояние между точками центров вращения не равно величине подачи S_z на зуб. Вычислим уточнённое расстояние между точками центров вращения фрезы:

$$S_y = S_z + \frac{\beta}{2\pi} \cdot S_o = S_z \cdot \left(1 + z \cdot \frac{\beta}{2\pi}\right).$$

Для этого воспользуемся одним из свойств векторного произведения и вычислим значение

угла β по формуле $\beta = \arcsin \frac{\begin{vmatrix} (x_2 - x_0) & (y_2 - y_0) \\ (x_2 - x_1) & (y_2 - y_1) \end{vmatrix}}{\sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2} \cdot \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}$, которая после упрощения сводится к выражению

$$\beta = \arcsin \frac{S_z \cdot (y_0 - y)}{R^2} = \arcsin \frac{-S_z \cdot y}{R^2}. \quad (7)$$

Нетрудно заметить, что своего максимального абсолютного значения угол β достигает при условии $|y| = R$, когда он становится равным $\pm \arcsin(S_z/R)$. Таким образом, для условий фрезерования, соответствующих траекториям, отображённым на рис. 2 и 3, получим $S_z = 0,08D = 0,16R$, $\beta_{\max} = \pm 9,2^\circ$, то есть погрешность наших вычислений может достигать величины $\pm 9,2^\circ / 360^\circ = \pm 2,6$.

Чтобы скомпенсировать данную погрешность, найдём уточнённую точку $O_2(x_3, y_3)$ (см. рис. 3, *б*), в которой находился центр вращения фрезы в момент пересечения предыдущим зубом отрезка OA :

$$\begin{cases} x_3 = x_0 - S_y \\ y_3 = y \end{cases} \quad (8)$$

Тогда в соответствии с вышеописанным алгоритмом найдём уточнённую точку $A_2(x_4, y_4)$, которая принадлежит отрезку OA

$$\begin{cases} x_4 = x_0 + t_y \cdot (x - x_0) \\ y_4 = y_0 + t_y \cdot (y - y_0) \end{cases} \quad (9)$$

$$0 \leq t_y \leq 1, \quad (10)$$

где t_y – уточнённое значение параметра и находится на расстоянии R от точки O_2 :

$$\sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2} = R. \quad (11)$$

С учётом (7), (8) и (11) получим следующее выражение для t_y :

$$t_y = \sqrt{1 - \left(\frac{S_y \cdot (y - y_0)}{R^2} \right)^2} - \frac{S_y \cdot (x - x_0)}{R^2}.$$

Отсюда исходя из того, что толщина срезаемого слоя $h_z = |A_2A|$, где $|A_2A|$ – длина отрезка A_2A (см. рис. 3, б), отношение длин отрезков $|O_2A_2|/|OA| = t_y$ и значение $|OA| = R$, получим формулу для вычисления мгновенного значения h_z , которая с учётом (10) приобретёт вид разрывной функции

$$h_z(\tau) = \begin{cases} R \cdot (1 - t_y(\tau)) & \text{при } 0 \leq t_y(\tau) \leq 1 \\ 0 & \text{при } t_y(\tau) < 0 \text{ или } t_y(\tau) > 1 \end{cases} \quad (12)$$

Следует отметить, что для расчёта S_y мы использовали значение угла β , вычисленное по формуле (7). Поэтому для оценки погрешности вычислений необходимо выяснить, насколько реальное значение угла β_y между отрезками OA и O_2A_2 в наших уточнённых расчётах отличается от значения β , взятого за исходное. Величину β_y рассчитаем по формуле, аналогичной (7), но с учётом зависимости параметров S_y и y от параметра времени τ : $\beta_y = \arcsin \frac{S_y(\tau) \cdot y(\tau)}{R^2}$.

Численная проверка с помощью компьютерных расчётов показала, что расхождение между β_y и β составляет $\pm 0,05^\circ$, то есть погрешность вычислений равна $\pm 0,015\%$.

Зная значение $h_z(\tau)$ толщины срезаемого слоя, согласно методике [5] найдём величину силы резания, приложенной к одному зубу:

$$F_z(\tau) = h_z(\tau) \cdot t_\Phi \cdot K_C, \quad (13)$$

где t_Φ – глубина фрезерования; K_C – удельная сила резания, приходящаяся на единицу площади срезаемого слоя.

Величина K_C различна для разных обрабатываемых материалов и определяется по формуле

$$K_C = K_{C1} \cdot h_z^{-m_c}, \quad (14)$$

где K_{C1} – удельная сила резания (для конкретного обрабатываемого материала) при толщине стружки 1 мм; m_c – степенной показатель зависимости удельной силы резания от толщины стружки. Исходя из (13) и (14), получим $F_z(\tau) = h_z(\tau)^{1-m_c} \cdot t_\phi \cdot K_{C1}$.

Значения параметров K_{C1} и m_c для различных материалов приведены в табл. 1 [5].

Таблица 1

Значения параметров K_{C1} и m_c

| Материал | K_{C1} | m_c | Материал | K_{C1} | m_c |
|----------------------------|----------|-------|-----------------------|----------|-------|
| Сталь (HB125) | 1500 | 0,25 | Сплав жаропрочный | 2900 | 0,25 |
| Сталь (HB150) | 1600 | 0,25 | Титановый сплав | 1400 | 0,23 |
| Сталь легированная (HB175) | 1700 | 0,25 | Сталь калёная (HRC55) | 4200 | 0,25 |
| Сталь легированная (HB330) | 2300 | 0,25 | Сталь калёная (HRC63) | 4250 | 0,25 |
| Сталь нержавеющая (HB200) | 2000 | 0,21 | Чугун | 900 | 0,28 |
| Сталь нержавеющая (HB230) | 2000 | 0,21 | Алюминиевый сплав | 700 | 0,25 |

Согласно предложенной методике, рассчитаем ширину срезаемого слоя и силу резания для алюминиевого сплава (см. рис. 4). Для иллюстрации используем фрезы с числом зубьев z , равным 1,8 и 300, а величину подачи S_z на зуб примем постоянной, равной 1 мм.

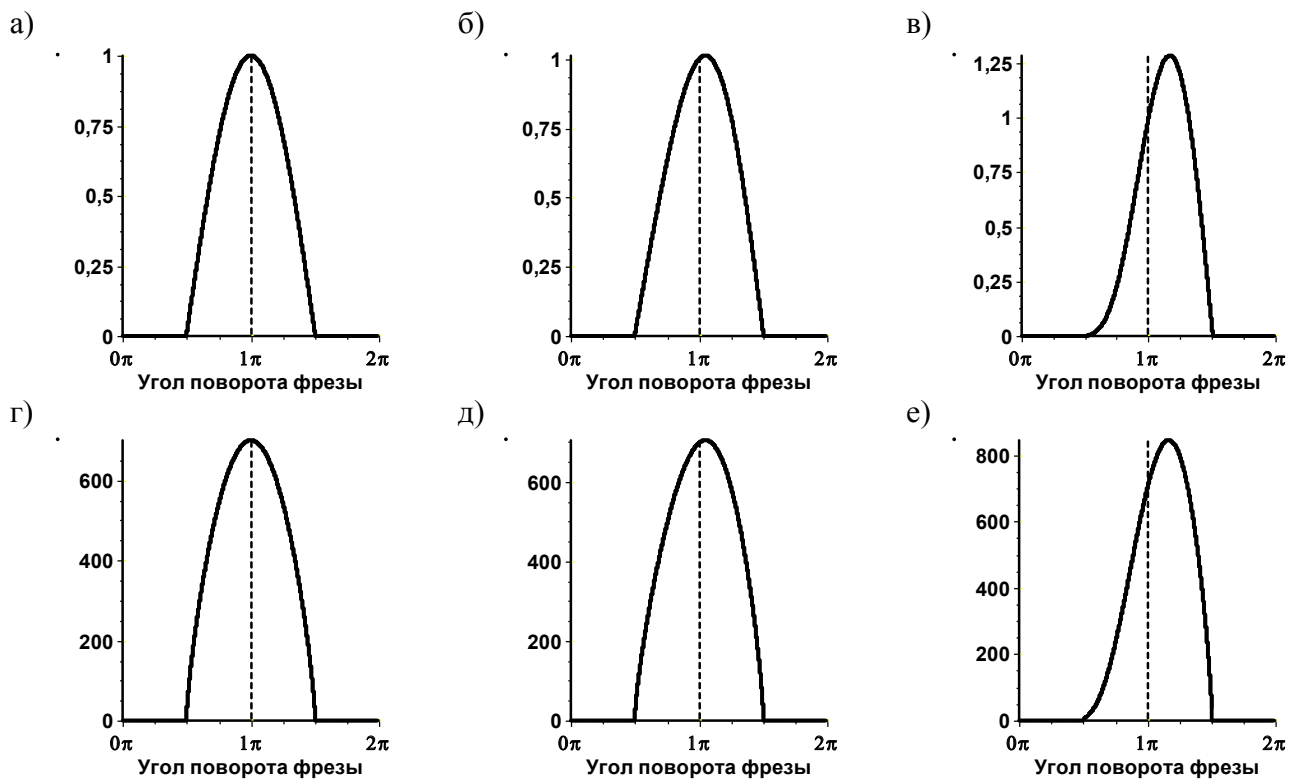


Рис. 4. Графики зависимостей ширины срезаемого слоя h_z и силы F_z резания, приложенной к одному зубу, при обработке алюминиевого сплава цилиндрической фрезой $D = 100$ мм с различным количеством зубьев: а, г – $z = 1$; б, д – $z = 8$; в, е – $z = 300$ ($S_z = 1$ мм, $t_\phi = 1$ мм, ширина фрезерования $B = D$)

На графиках хорошо видно, что чем больше оборотная подача S_z (зависит от z при $S_z = \text{const}$), тем более асимметрично выглядят графики толщин h_z и, следовательно, тем сильнее реальные значения h_z отличаются от тех значений, которые мы получили бы аппроксимацией трохоидальных траекторий режущих лезвий участками окружностей.

На практике при высокоскоростном фрезеровании режимов резания полным диаметром фрезы ($B = D$) стараются избегать, так как такой режим обработки сильно нагружает инструмент и катастрофически сокращает его ресурс. Для каждого высокоскоростного инструмента существуют рекомендуемые значения ширины B фрезерования при обработке различных материалов, превышение которых ведёт к изменению теплового режима и, как следствие, к усиленному износу инструмента. Так, для инструментов фирмы *Sandvik Coromant* при обработке алюминиевых сплавов рекомендуется выбирать $B = 0,6D$, при обработке закалённых сталей – $B = 0,2D$ [4].

Добавим условие обработки неполным диаметром фрезы в выражение (12) в виде дополнительных разрывных зависимостей. Тогда функция мгновенного значения толщины срезаемого слоя при фрезеровании приобретёт вид

$$h_z(\tau) = \begin{cases} R \cdot (1 - t_y(\tau)) & \text{при } (0 \leq t_y(\tau) \leq 1) \wedge (y_{\text{вых}} \leq y(\tau) \leq y_{\text{вр}}) \\ 0 & \text{при } (t_y(\tau) < 0) \vee (t_y(\tau) > 1) \vee (y(\tau) > y_{\text{вр}}) \vee (y(\tau) < y_{\text{вых}}) \end{cases}$$

где $y_{\text{вр}}$ и $y_{\text{вых}}$ – ординаты врезания и выхода соответственно, определяемые в зависимости от способа обработки: для симметричного фрезерования (см. рис. 1) $y_{\text{вр}} = B/2$, $y_{\text{вых}} = -B/2$; встречного фрезерования $y_{\text{вр}} = D/2$, $y_{\text{вых}} = y_{\text{вр}} - B$; попутного фрезерования $y_{\text{вых}} = -D/2$, $y_{\text{вр}} = y_{\text{вых}} + B$.

Используем полученные математические зависимости для расчёта силы резания при высокоскоростном фрезеровании. Первоначально определим, как изменяется суммарная сила \vec{F} резания всех режущих лезвий фрезы в течение одного оборота инструмента. Проведённые компьютерные расчёты (см. рис. 5) показывают, что направление математического ожидания \vec{F} силы резания сильно зависит от способа обработки. Так, при симметричном фрезеровании (см. рис. 5, а) математическое ожидание \vec{F} направлено строго в направлении оси Y , при встречном фрезеровании (см. рис. 5, б) \vec{F} составляет с осью Y положительный угол, а при попутном (см. рис. 5, в) – отрицательный.

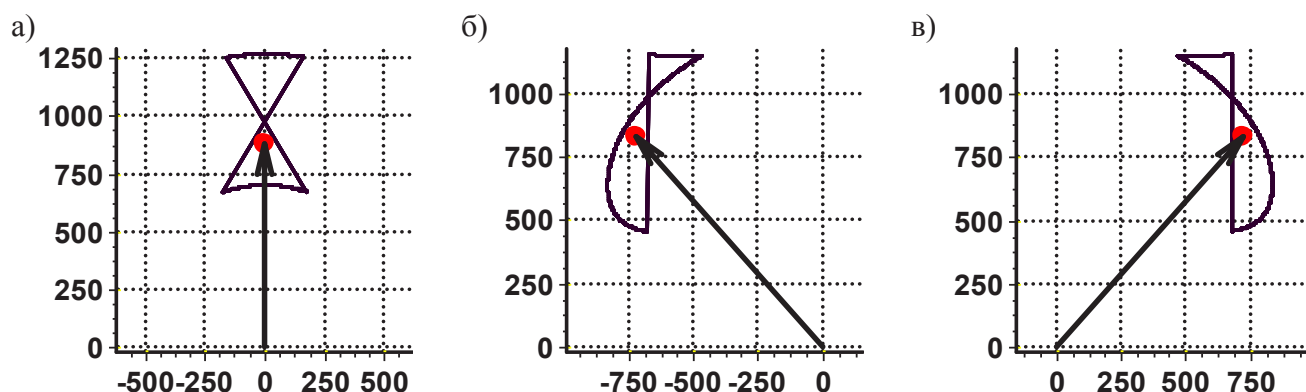


Рис. 5. Графики изменения проекций вектора \vec{F} результирующей силы резания всех зубьев цилиндрической фрезы за один её оборот: а – симметричное фрезерование; б – встречное; в – попутное. По осям абсцисс отложены проекции \vec{F} на ось X (в Ньютонах), по осям ординат – проекции на ось Y (в тех же ед.), стрелкой показано математическое ожидание \vec{F} ($D = 100$ мм; $z = 8$ мм; $S_z = 1$ мм; $B = 0,5D$, алюминиевый сплав)

Рассмотрим, в какой степени на направление математического ожидания силы резания влияет величина ширины B фрезерования. Результаты произведённых численных расчётов представлены на рис. 6.

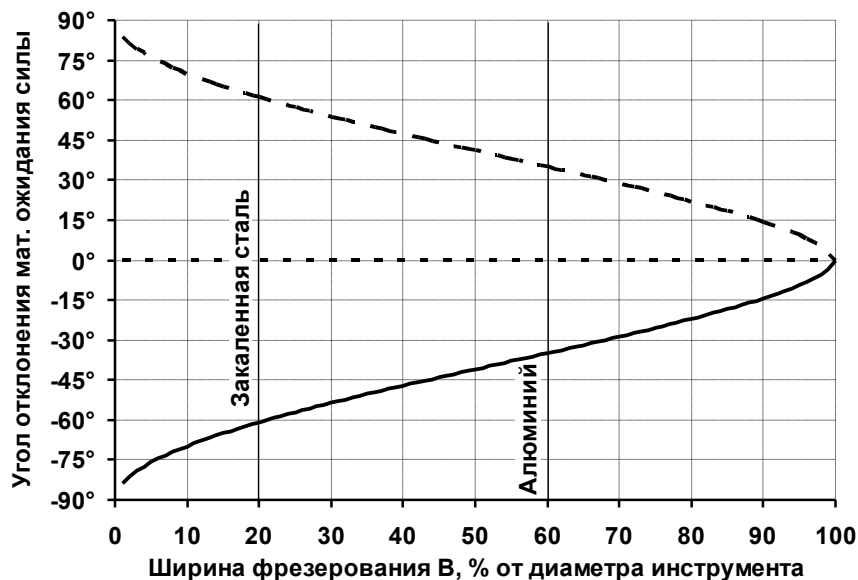


Рис. 6. Графики зависимости угла α наклона (относительно оси Y) математического ожидания \vec{F} равнодействующей силы резания от ширины B фрезерования: встречное фрезерование (сплошная линия), попутное (штриховая линия), симметричное (пунктирная линия)

В соответствии с полученными графиками можно сделать вывод о том, что для проведения экспериментальных исследований динамики сил резания при высокоскоростном фрезеровании целесообразно придерживаться симметричного направления резания, так как в этом случае математическое ожидание \vec{F} всегда будет направлено вдоль оси Y и, следовательно, систему динамометрических датчиков также следует ориентировать строго вдоль оси Y , что в технологическом плане достаточно удобно. Кроме того, при симметричном фрезеровании угол наклона \vec{F} не зависит от ширины B обработки, поэтому нет необходимости менять ориентацию системы датчиков при смене обрабатываемого материала.

При необходимости экспериментальные исследования можно проводить также для встречного и попутного фрезерования, но в этом случае систему измерительных датчиков необходимо будет ориентировать под существенным углом относительно оси Y , а именно под углом, равным 37° , для алюминия (рекомендованное значение $B = 0,6D$) и 61° – для закалённых сталей (рекомендованное значение $B = 0,2D$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с.
2. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М., 1975. – 344 с.
3. Кабалдин, Ю. Г. Исследование детерминированного хаоса в динамике процессов механообработки методом реконструкции аттрактора / Ю. Г. Кабалдин, С. В. Биленко, С. В. Серый // Вестник машиностроения. – 2003. – № 1. – С. 50-56.
4. Кабалдин, Ю. Г. Математическое моделирование динамической устойчивости процесса резания в виде нелинейного осциллятора с разрывными характеристиками / Ю. Г. Кабалдин, С. В. Биленко, П. А. Саблин // Вестник машиностроения. – 2006. – № 10. – С. 35-43.
5. Материалы компании Sandvik Coromant [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.coromant.sandvik.com> (дата обращения: 20.12.2017).