

DOI: 10.34031/article_5d35d0b677dc74.96046396

¹Пономарев Б.Б., ^{1,*}Нгуен Ши Хьен¹Иркутский национальный исследовательский технический университет

Россия, 664074, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

*E-mail: syhiendk35@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ПЯТИКОординатНОГО КОНЦЕВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований, позволивших установить степень влияния режимов обработки и условий ориентации концевой инструмента на силы резания при формообразовании поверхностей свободной формы построочным фрезерованием. На основе измерений, проведенных в процессе обработки заготовок на пятикоординатном фрезерном станке модели HSC 75 linear концевыми сфероцилиндрическими фрезами фирмы MITSUBISHI различных типоразмеров диаметром от 5 до 10 мм с двумя и четырьмя зубьями построены диаграммы и графики зависимостей сил резания и их проекций от времени при различных частотах вращения шпинделя, подачах на зуб, глубинах резания, углах наклона и опережения концевой инструмента. По результатам анализа экспериментальных данных подтверждено теоретическое заключение о возрастании сил резания при увеличении значений подачи на зуб, глубины резания, и повышении частоты вращения шпинделя применительно к процессу фрезерования сфероцилиндрическим инструментом. Выявлены критические положения инструмента относительно обрабатываемой поверхности, при которых силы резания имеют максимальные значения. Полученные результаты позволили разработать рекомендации по выбору позиции инструмента при чистовой обработке фрезерованием сложных поверхностей для исключения повышенных нагрузок на инструмент.

Ключевые слова: чистовое пятикоординатное фрезерование, поверхности свободной формы, силы резания, концевые сфероцилиндрические фрезы, ориентация инструмента, условия обработки.

Введение. В настоящее время при изготовлении деталей, содержащих поверхности свободной формы, широко используются многоцелевые пятикоординатные станки с числовым программным управлением.

Для процесса чистовой обработки сложных поверхностей чаще всего используют сфероцилиндрические концевые фрезы, которые позволяют минимизировать остаточный гребешок и избежать локальных и глобальных зарезаний в заготовке. При осевом вращении инструмента, значения скоростей точек, находящихся на режущей кромке сферической части фрезы в зоне вершины инструмента, по величине приближаются к

нулю. При стружкообразовании это приводит к увеличению нагрузки в области вершины фрезы и снижению качества обрабатываемой поверхности. Это может быть исключено путем ориентации инструмента по углам наклона (α) и опережения инструмента (β) по отношению к нормали к обрабатываемой поверхности (см. рис. 1). При этом кинематика и динамика процесса резания меняется в ходе обработки, так как само понятие сложной поверхности связано с существенным изменением значений кривизн в каждом из направлений в окрестностях всех её точек.

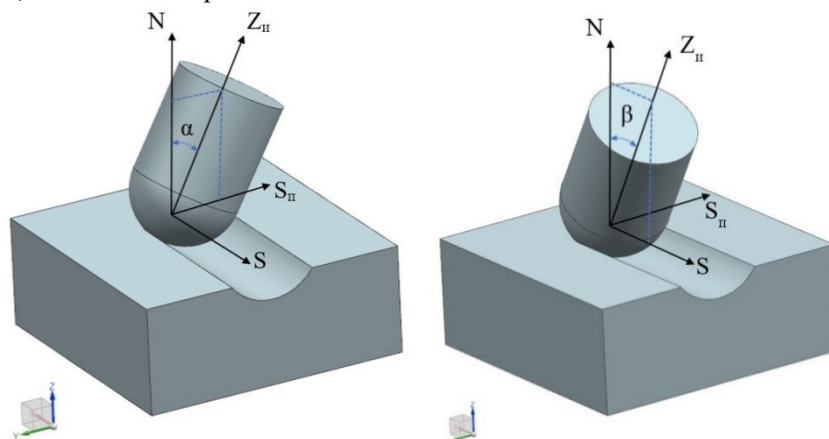


Рис. 1. Относительное положение инструмента и заготовки с – а) углом наклона б) углом опережения (N – нормаль к поверхности, S – продольная подача стола, S_{II} – поперечная подача, Z_{II} – ось инструмента)

Сила резания является одним из наиболее важных параметров, требующих отслеживания в процессе обработки, поскольку она определяет не только потребную мощность станка, напряжения в деталях станка, в обрабатываемой заготовке, но также температуру и износ режущего инструмента [1]. Сила резания занимает важное место в исследованиях процессов обработки материалов, и, в частности, в моделировании, оптимизации, мониторинге и контроле процессов фрезерования. Важно, чтобы во время обработки силы резания поддерживались близкими к оптимальным значениям. Чрезмерные силы резания вызывают большие прогибы системы, участвующей в процессе концевой фрезерования и приводят к низкому качеству продукта, в то время как малые силы резания часто указывают на низкую эффективность обработки. Следовательно, надежные количественные прогнозы сил резания и оптимизация их значений в операциях обработки необходимы для выбора условий реализации процесса и определения уровня качества обрабатываемой детали.

Динамические характеристики процесса фрезерования изучались многими отечественными и зарубежными авторами. При этом можно выделить два основных подхода, используемых исследователями: аналитический и механистический [2]. Аналитический метод обычно связан с термомеханическими явлениями, возникающими в зоне резания, и моделированием физических механизмов, сопровождающих процесс снятия стружки, например, напряжения и деформации при интенсивных пластических изменениях [3, 3]. Механистические модели предполагают, что силы резания пропорциональны площади поперечного сечения удаляемого элемента материала и определяются через удельные коэффициенты [5, 6, 7, 8]. В связи со сложностью конфигурации инструментальных поверхностей фрез, используемых при формообразовании пространственно сложных деталей, некоторые авторы определили силы резания используя методы преобразования ортогональных систем координат [9, 10, 11, 12]. При этом рассматривается только контакт части режущей кромки с обрабатываемым объектом.

В работах [13] и [14] авторами разработаны виртуальные модели фрезерования в трехмерной постановке на основе метода конечно-элементного анализа для определения влияния на силы резания величины подачи на зуб, глубины резания, углов наклона и опережения инструмента. Использование программного комплекса Abaqus позволило моделировать динамику процесса удаления материала заготовки режущими кромками сфероцилиндрических фрез при различных условиях обработки.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния на силы резания режимов обработки и ориентации инструмента относительно нормали к заготовке по углам наклона и опережения.

Условия проведения экспериментальных исследований. Для установления закономерностей, проявляющихся при чистовой обработке поверхностей концевыми сфероцилиндрическими фрезами, был проведен ряд экспериментов по обработке заготовок и измерению полученной на них шероховатости поверхностей. Обработка произведена на пятикоординатном фрезерном станке модели HSC 75 lineag концевыми сфероцилиндрическими фрезами фирмы MITSUBISHI диаметрами от 5 до 10 мм с двумя и четырьмя зубьями (рис. 2). Основные технические параметры инструментов представлены в таблице 1.



Рис. 2. Сфероцилиндрические фрезы, используемые в исследованиях

В качестве заготовки использованы пластины из стали размером 120×120×10 мм. Для подготовки управляющих программ использовался САМ модуль программы Unigraphics NX.

Для измерения сил резания в процессе фрезерования был выбран трехкомпонентный стационарный динамометрический комплекс Kistler Type 9129AA, с помощью которого определялись три компонента силы резания F_x , F_y и F_z с диапазоном измерения ± 10 кН.

Для сбора и обработки данных при силовом анализе производителями прибора предлагается использовать многоцелевое программное обеспечение DynoWare. Программное обеспечение изначально разрабатывалось с целью обеспечения работы измерительного комплекса на основе хорошо зарекомендовавшей себя линейки кварцевых динамометров фирмы Kistler и их использования совместно с современной компьютерной техникой [15]. При анализе сигнала программный комплекс DynoWare обеспечивает непрерывную визуализацию регистрируемых кривых,

а также содержит все необходимые математические и графические функции для обработки измерений. Кроме того, DynoWare позволяет документировать измерительный процесс и хранить данные о конфигурации и измерениях [16]. Относительные позиции динамометра, инструмента,

заготовки, компьютера с ПО и технологического оборудования представлены на рисунке 3.

Сигналы с датчиков динамометра передаются через усилитель и плату обработки данных на преобразование их в цифровые значения. Эти данные обрабатывались с помощью программы DynoWare.

Таблица 1

Технические параметры инструментов

№ на рис. 2	Количество зубьев	Размеры			
		Диаметр (мм)	Максимальная глубина резания (мм)	Диаметр соединения (мм)	Функциональная длина (мм)
1	2	5	5	6	50
2	2	6	9	6	80
3	4	6	12	6	80
4	2	8	14	8	90
5	4	8	14	8	90
6	2	10	18	10	100
7	4	10	18	10	100

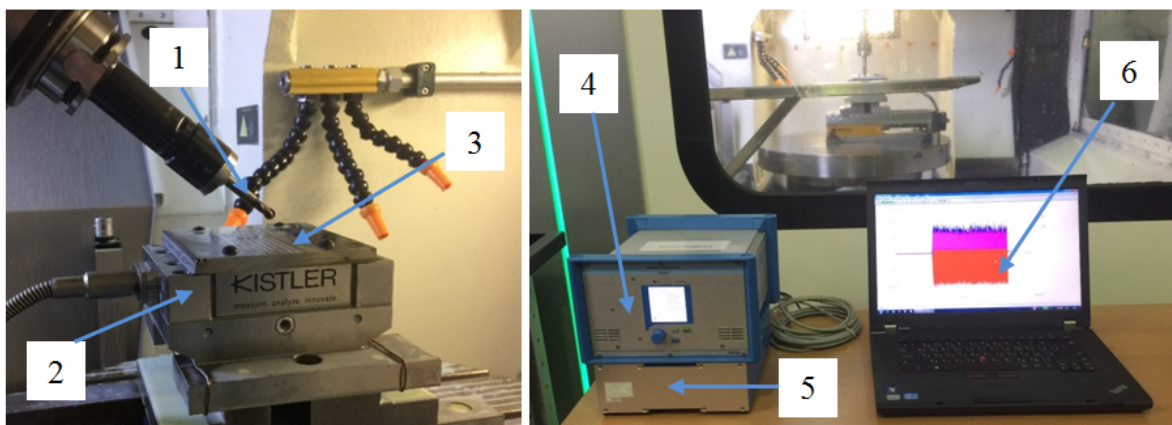


Рис. 3. Система измерения сил резания, регистрации и обработки данных:
 1 – инструмент; 2 – динамометр; 3 – заготовка; 4 – усилитель; 5 – плата обработки данных;
 6 – компьютер с ПО DynoWare

Для оценки уровня сигнала «шума», сопровождающего работу пятикоординатного станка HSC 75 linear и наводимого на датчики динамометра, измерения проводились в режиме холостых движений с вращающимся шпинделем и инструментом, установленным в станочную

оснастку при изменяемом угле наклона от 0 до 60°. На рисунке 4 представлены результаты измерения силы при этих условиях, регистрируемые с помощью стационарного динамометра типа 9129AA.

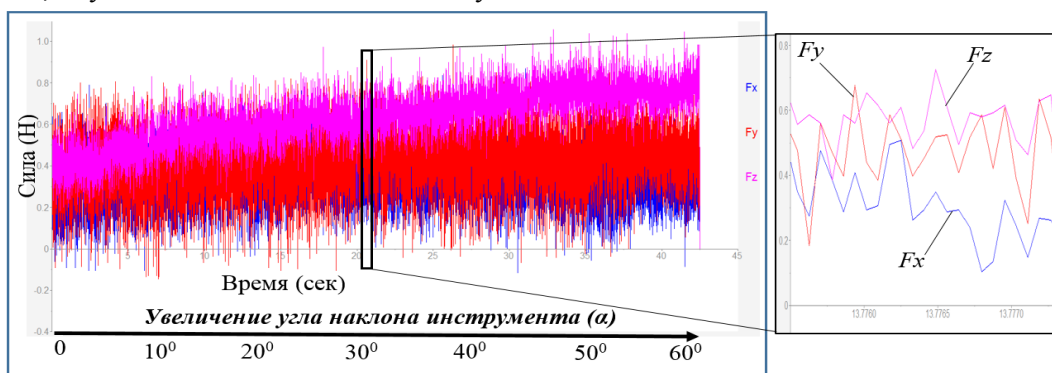


Рис. 4. Нагрузки, измеренные с использованием стационарного динамометра 9129AA при холостом движении инструмента и различных значениях угла наклона инструмента

Из диаграмм следует, что «шум» станка и другие факторы при использовании стационарного динамометра типа 9129AA незначительно влияют на результаты измерения силы резания. Уровень помех, зафиксированный с помощью стационарного динамометра 9129AA, составляет менее 1Н.

Влияние условий обработки на силы резания. При исследовании влияния условий обработки на силы резания, исходный режим резания выбран следующим образом: частота вращения

шпинделя $n = 6000 \text{ мин}^{-1}$, подача на зуб $f_z = 0,02 \text{ мм/зуб}$, глубина резания $t = 0,2 \text{ мм}$, фреза двухзубая диаметром 8 мм, угол между осью инструмента и нормалью к обрабатываемой поверхности 0° . При оценке влияния одного из этих параметров остальные параметры оставались постоянными.

Влияние подачи на зуб. Результаты измерений составляющих сил резания при значениях подачи на зуб 0,02мм; 0,025мм и 0,03мм представлены на рисунках 5, 6 и 7.

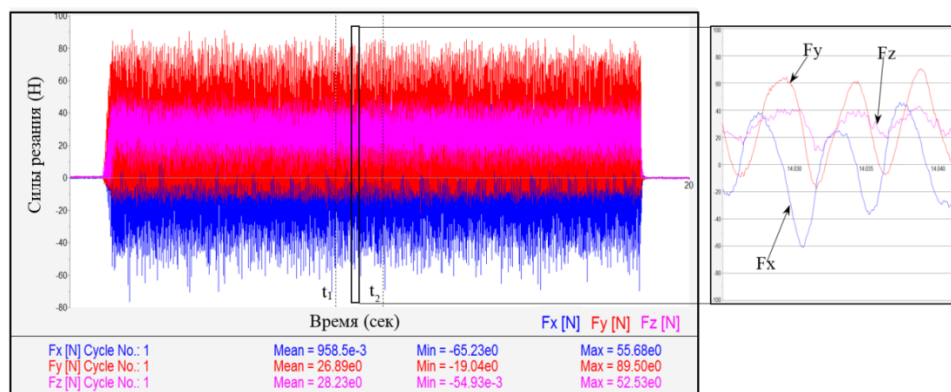


Рис. 5. Диаграмма силы резания при чистовом фрезеровании с подачей на зуб 0,02 мм

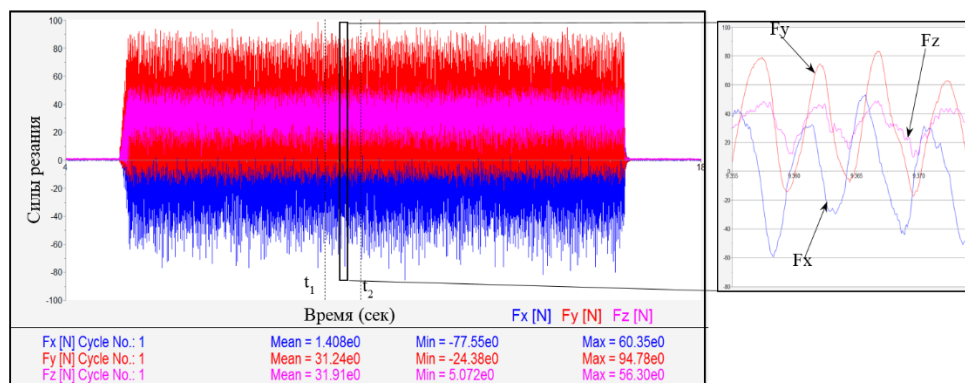


Рис. 6. Диаграмма силы резания при чистовом фрезеровании с подачей на зуб 0,025 мм

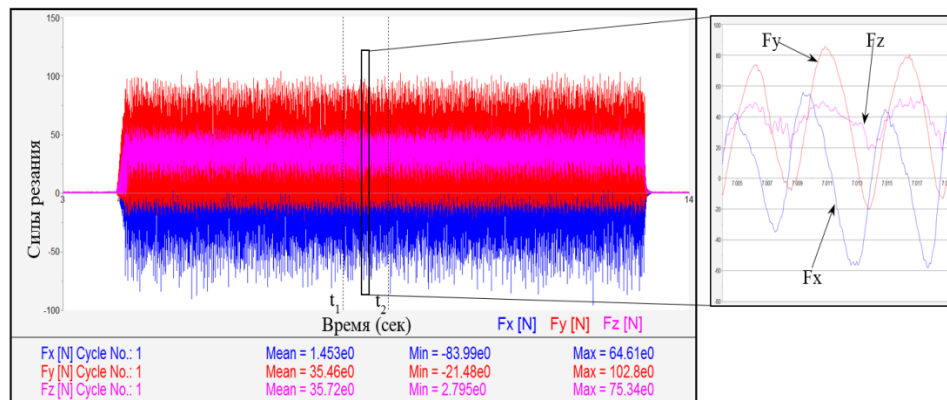


Рис. 7. Диаграмма силы резания при чистовом фрезеровании с подачей на зуб 0,03 мм

Из диаграмм (рис. 5, 6, 7) можно сделать вывод: сила резания изменяется в зависимости от времени по синусоидальным законам. Так как в

процессе обработки заготовки каждый зуб сфероцилиндрической фрезы за один оборот поочередно участвует во встречном и попутном

фрезеровании поэтому проекция силы F_x изменяет знак. Её среднее значение использовать для оценки динамических характеристик процесса не имеет смысла.

Программа DynoWare позволяет определить максимальное, минимальное и среднее значения силы резания на любом промежутке времени, например от t_1 до t_2 . Эти данные полностью характеризуют зависимость проекций силы резания от времени (см. рис. 5, 6, 7). При сравнении минимальных и максимальных значений следует, что с увеличением подачи на зуб абсолютное значение проекции силы резания F_x растет. При сравнении среднего значения составляющих силы резания F_y и F_z установлено, что их значения увеличиваются при возрастании

подачи на зуб. А именно, при подаче на зуб $f_z = 0,02$ мм

$F_{y\text{ сред}} = 26,89H$ и $F_{z\text{ сред}} = 28,23H$; при $f_z = 0,025$ мм $F_{y\text{ сред}} = 31,24H$ и $F_{z\text{ сред}} = 31,91H$; а при $f_z = 0,03$ мм $F_{y\text{ сред}} = 35,46H$ и $F_{z\text{ сред}} = 35,72H$.

Влияние глубины резания. Для исследования влияния глубины резания на силу резания заготовка обрабатывалась сфероцилиндрической фрезой при глубинах 0,2 мм; 0,25 мм и 0,3 мм. На рисунке 8 представлены диаграммы, построенные на основе результатов испытаний, из которых следует, что при увеличении глубины резания, увеличиваются проекции силы резания F_x , F_y и F_z .

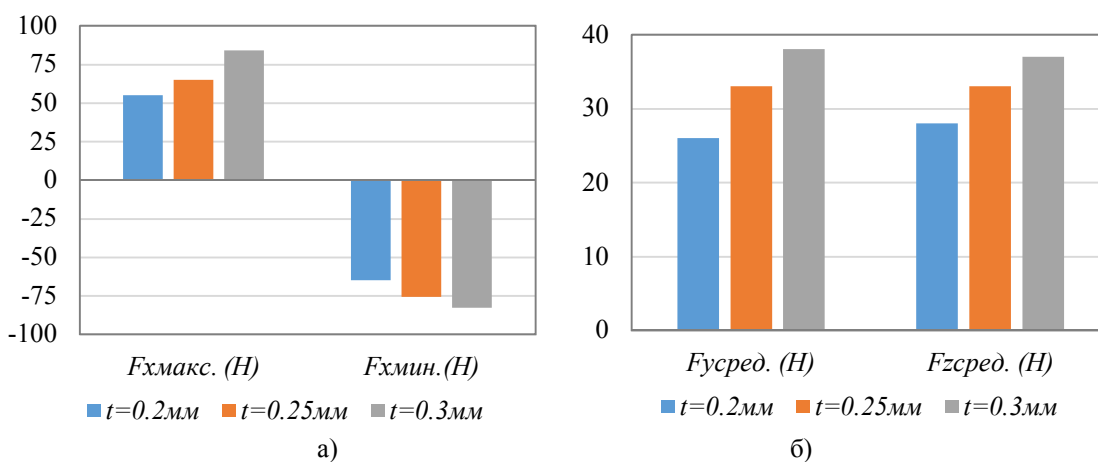


Рис. 8. Диаграммы проекций силы резания при чистовом фрезеровании при различных значениях глубин резания: а) $F_{x\text{ макс}}$ и $F_{x\text{ мин}}$ б) $F_{y\text{ сред}}$ и $F_{z\text{ сред}}$

Влияние частоты вращения шпинделя.

На рис. 9 представлены диаграммы составляющих сил резания в зависимости от частоты вращения шпинделя при значениях 5000, 6000 и 7000 об/мин.

Из диаграмм следует, что амплитуда синусоидальной линии, характеризующая проекцию

силы резания F_x увеличивается с возрастанием частоты вращения шпинделя, а проекций F_y и F_z незначительно уменьшаются. При увеличении частоты вращения шпинделя от 5000 об/мин до 7000 об/мин, сила F_x увеличивается в 1,6 раза.

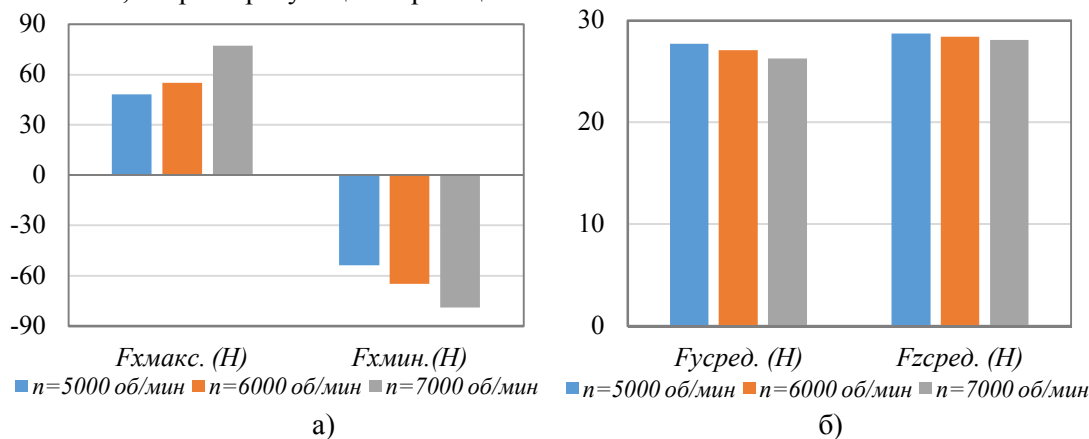


Рис. 9. Диаграммы проекций силы резания при чистовом фрезеровании при различных значениях скорости резания: а) $F_{x\text{ макс}}$ и $F_{x\text{ мин}}$ б) $F_{y\text{ сред}}$ и $F_{z\text{ сред}}$

Влияние диаметра фрезы и количества зубьев. При применении различных типовых инструментов с разным диаметром и количеством

зубьев для чистового фрезерования, изменяются эффективный диаметр инструмента, скорость резания и объем снимаемой стружки. На рис. 10

представлены результаты измерения составляющих силы резания при фрезеровании различными фрезами. При этом другие параметры, характеризующие условия обработки, оставались неизменными ($n = 6000 \text{ мин}^{-1}$, $f_z = 0,02 \text{ мм/зуб}$, $t = 0,2 \text{ мм}$, $\alpha = \beta = 0^\circ$).

Проанализировав полученные результаты, можно сделать заключение, что при использовании сфероцилиндрических фрез с одинаковым

количеством зубьев, при повышении диаметра инструмента увеличиваются значения проекций силы резания. При обработке заготовки четырехзубой сфероцилиндрической фрезой, при прочих одинаковых условиях, проекция силы резания F_x уменьшается, а F_y и F_z увеличиваются.

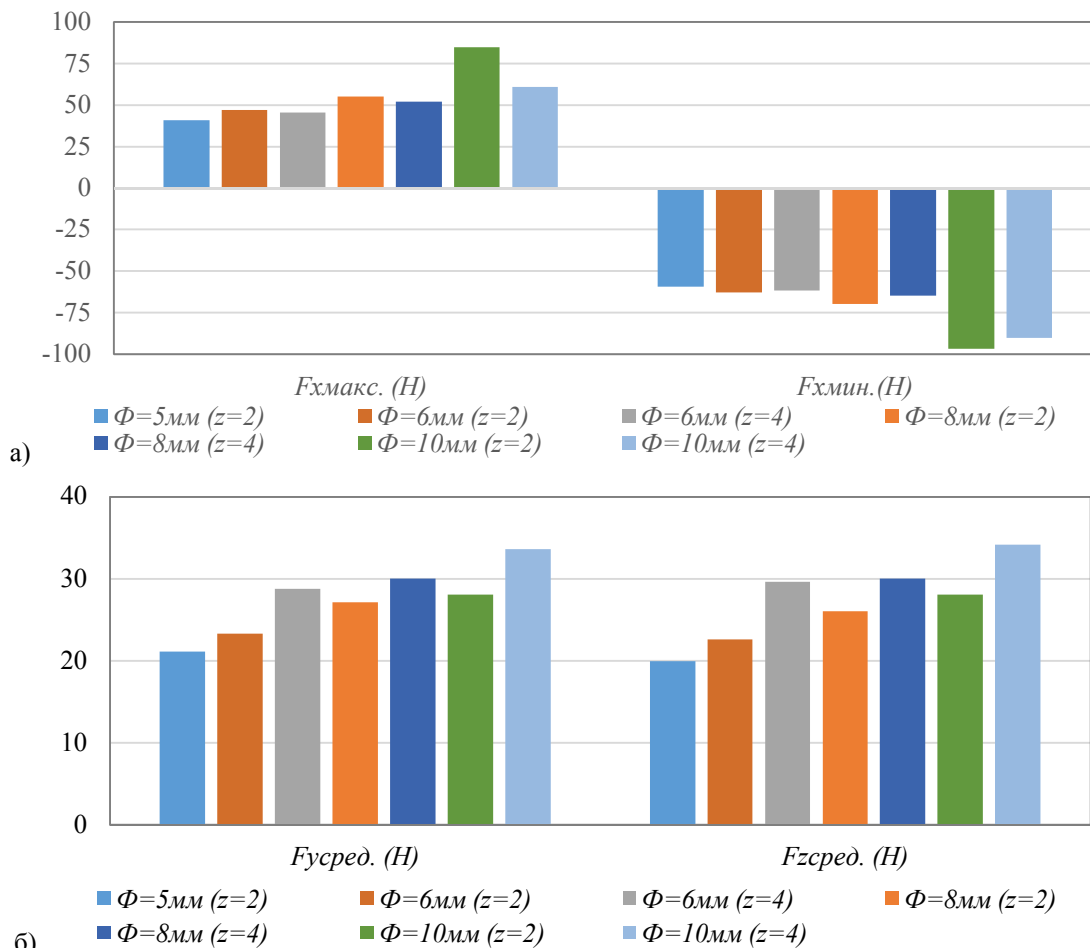


Рис. 10. Диаграммы проекций силы резания при чистовом фрезеровании при использовании различных фрез: а) $F_{x\text{ макс}}$ и $F_{x\text{ мин}}$ б) $F_{y\text{ сред}}$ и $F_{z\text{ сред}}$ (z – количество зубьев)

Влияние ориентации инструмента на силы резания. С целью определения влияния положения инструмента по отношению к поверхности заготовки на силу резания в точке их касания была проведена серия экспериментов, режимы резания при выполнении которых (табл. 2) не изменялись.

Таблица 2

Режимы резания

Глубина резания, t	0,2 мм
Частота вращения шпинделя, n	6000 мин^{-1}
Подача на зуб, f_z	0,02 мм/зуб

При обработке сложной поверхности заготовки сфероцилиндрическими фрезами на трехкоординатных станках с ЧПУ ось инструмента по

отношению к общей нормали в точке касания обрабатываемой и инструментальной поверхностей в каждый момент времени оказывается под различными углами. При пятикоординатной обработке относительное положение инструмента для различных областей поверхности может регулироваться. При этом наблюдается изменение кинематики процесса. В зависимости от глубины резания и диаметра инструмента, при определенных углах наклона и опережения, режущий зуб фрезы за полный оборот инструмента, при контакте его с заготовкой и формировании строки, участвует во встречном и попутном фрезеровании, вследствие чего проекции силы резания F_y и F_z изменяют знак. Для оценки влияния ориентации инструмента на силы резания потребовалось

провести анализ всех диаграмм проекций сил резания. Для оценки направления изменения силы резания использовались максимальные и минимальные значения проекций силы резания $F_{x_{макс}}$, $F_{x_{мин}}$, $F_{y_{макс}}$, $F_{y_{мин}}$, $F_{z_{макс}}$ и $F_{z_{мин}}$, а для ее оценки – величина результирующей (1):

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

Для определения силы F в программе Du-noWare использован модуль «Манипуляция данными» (Data Manipulation), который позволяет производить оценку в режиме «online» или в режиме «offline» – при обработке данных после измерения (рис. 11).

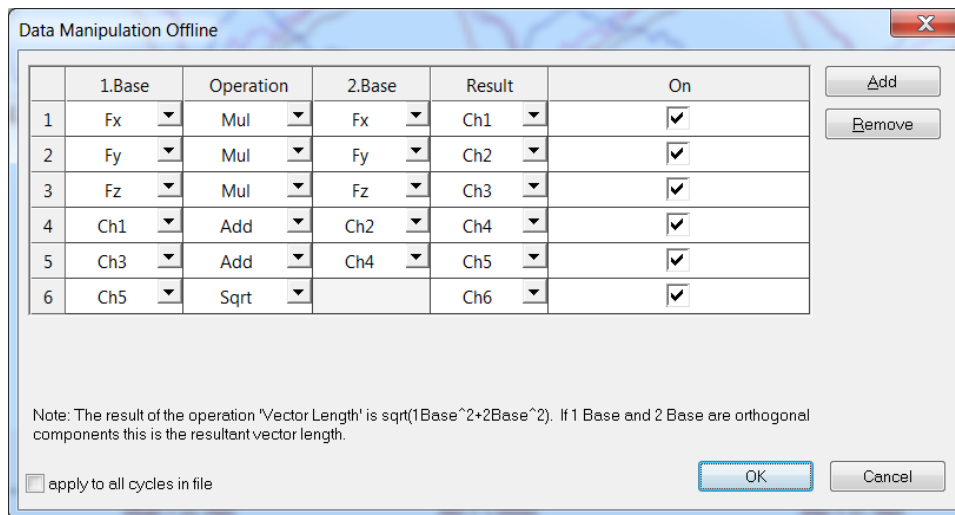


Рис. 11. Интерфейс модуля «Data Manipulation»

Каналы Ch1-Ch6 использовались как переменные для определения необходимых значений по следующим формулам (2):

$$\begin{aligned} Ch1 &= F_x^2 \\ Ch2 &= F_y^2 \\ Ch3 &= F_z^2 \\ Ch5 &= Ch1 + Ch2 + Ch3 = Ch4 + Ch3 = F_x^2 + F_y^2 + F_z^2 \\ Ch6 &= \sqrt{Ch5} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} = F \end{aligned} \quad (2)$$

На рис. 12 представлены кривые установившихся значений проекций силы резания в пределах времени t_1 и t_2 . В инструменте «Edit View»

выбрано отображение только Ch6, результат представлен на рис. 13.

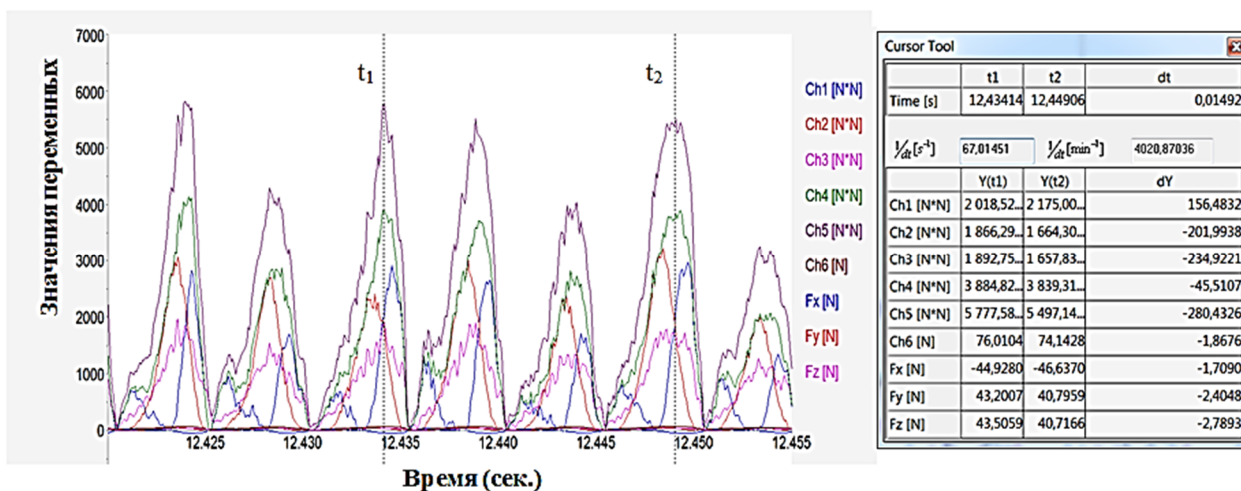


Рис. 12. График изменения значений проекций силы резания

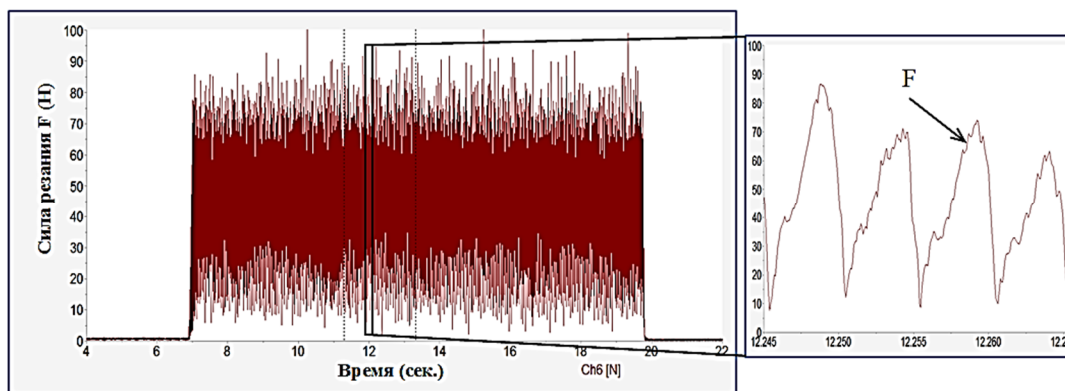


Рис. 13. Зависимость суммарной силы резания F от времени

Величина результирующей силы резания в процессе чистового фрезерования оценивалась по двум параметрам F_{\max} и $F_{\text{сред}}$. F_{\max} характеризует максимальную нагрузку, действующую на инструмент и учитывается при расчете на прочность инструмента. $F_{\text{сред}}$ может быть принята во внимание при определении стойкости инструмента.

Влияние угла наклона инструмента на силы резания. Для анализа влияния угла наклона инструмента на силы резания проведен

ряд испытаний, при выполнении которых измерялись силы резания при различных значениях угла наклона в интервале $(-50...50^\circ)$. При $\alpha = \pm 18,2^\circ$ – углы, при которых, точка с нулевой скоростью резания выходит из зоны контакта с обрабатываемой поверхностью.

На рисунках 14 и 15 изображены диаграммы зависимости максимальных и минимальных значений проекций силы от угла наклона инструмента при обработке двухзубой и четырехзубой фрезами.

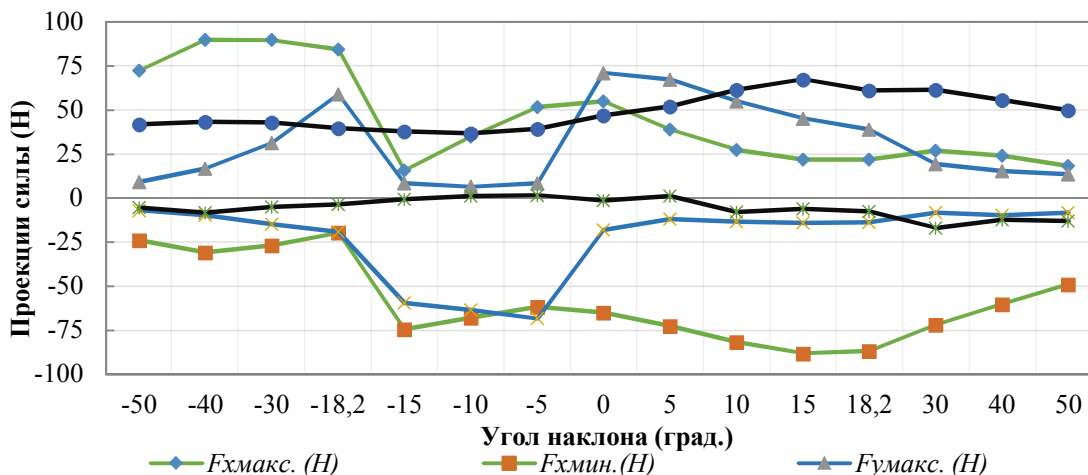


Рис. 14. Зависимость максимальных и минимальных значений проекций силы от угла наклона инструмента при фрезеровании двухзубой фрезой

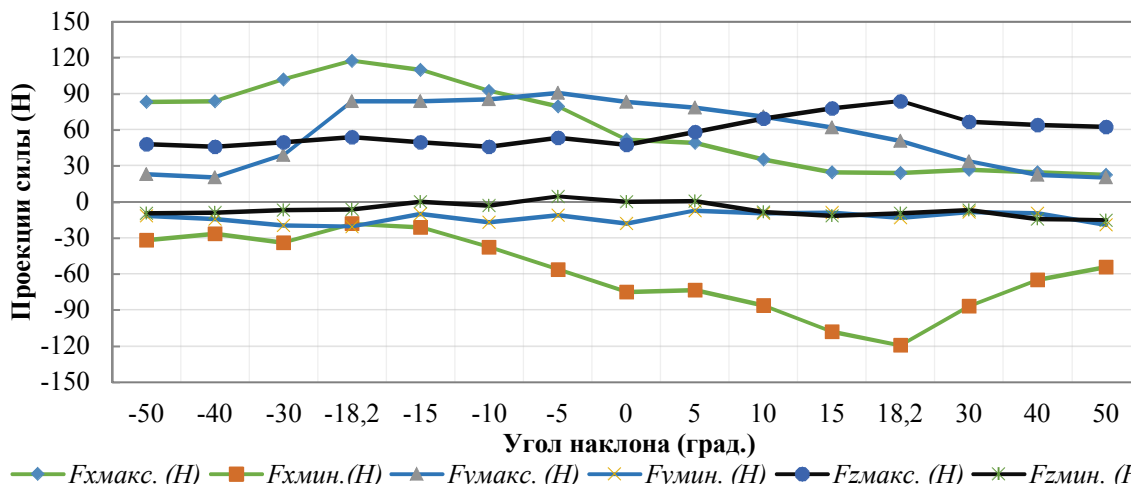


Рис. 15. Зависимость максимальных и минимальных значений проекций силы от угла наклона инструмента при фрезеровании четырехзубой фрезой

Зависимость максимальных и средних значений результирующей силы резания $F_{\text{макс}}$ и $F_{\text{сред}}$ представлена на рис. 16. Можно констатировать, что при постоянных режимах резания сила, действующая на четырехзубую фрезу больше, чем на двухзубую. Критическое значение нагрузки возникает при выходе точки инструментальной поверхности с нулевой скоростью резания из процесса обработки. Среднее значение силы резания достигает максимума при нулевом угле наклона инструмента.

Необходимо отметить, что при положениях, когда точка инструмента с нулевой скоростью резания не контактирует с заготовкой, наблюдается перерыв в процессе образования стружки режущей кромкой фрезы, то есть в некоторые моменты времени сила резания приближается к нулю. При таких позициях инструмента разница между максимальным значением и средним значением силы резания значительна (см. рис. 16).

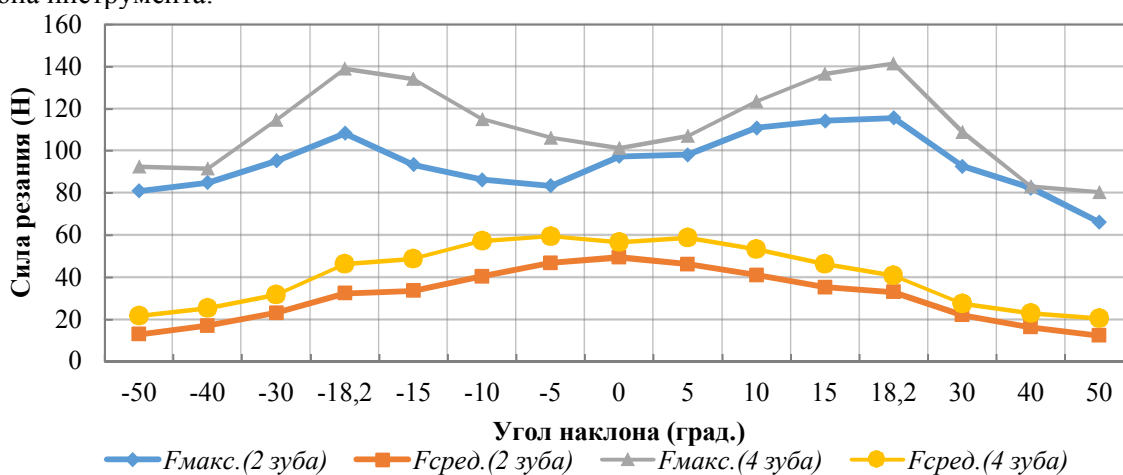


Рис. 16. Зависимость максимальных и средних значений силы резания от угла наклона

Влияние угла опережения инструмента на силы резания. Аналогично предыдущему оценивалось влияние угла опережения инструмента на силу резания. Инструмент при испытаниях ориентировался под углом в интервале:

-50...50°. Для инструмента, использовавшегося при проведении обработки на выбранных режимах (табл. 2), точка с нулевой скоростью резания находилась в зоне контакта с заготовкой при изменении угла опережения от 0 до 18,2°.

На рисунках 17, 18 и 19 представлены диаграммы изменения проекций силы и результирующей силы резания при различных значениях угла опережения инструмента.

Из диаграмм следует, что в интервале изменения угла опережения, при котором точка инструмента с нулевой скоростью резания еще находится в зоне обработки, сила резания значительно увеличивается и достигает максимума при 10°.

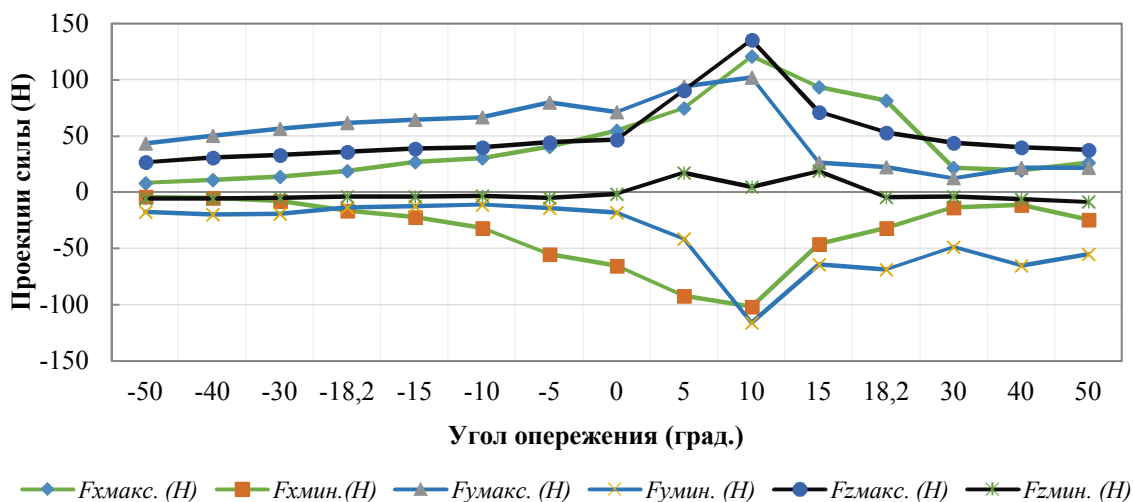


Рис. 17. Диаграммы максимальных и минимальных значений проекций силы резания при различных углах опережения инструмента при фрезеровании двухзубой фрезой

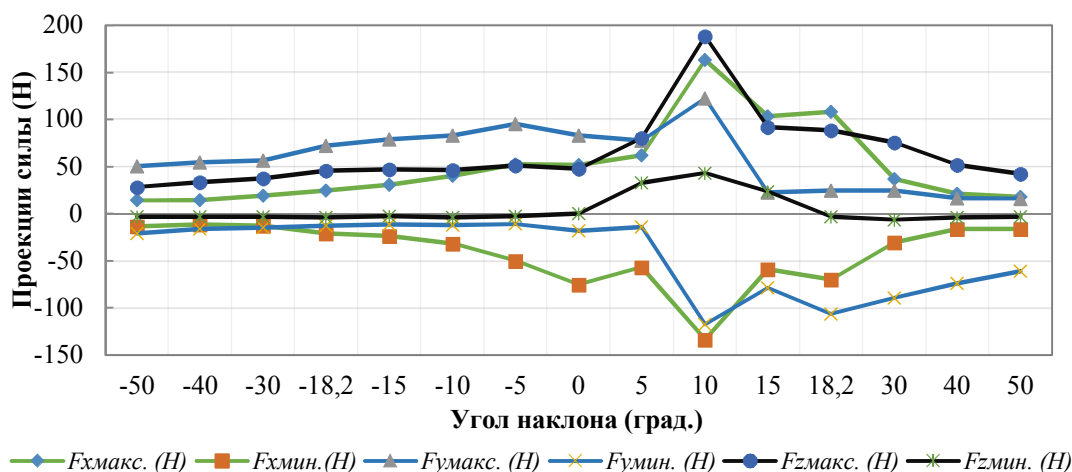


Рис. 18. Диаграммы максимальных и минимальных значений проекций силы резания при различных углах опережения инструмента при фрезеровании четырехзубой фрезой

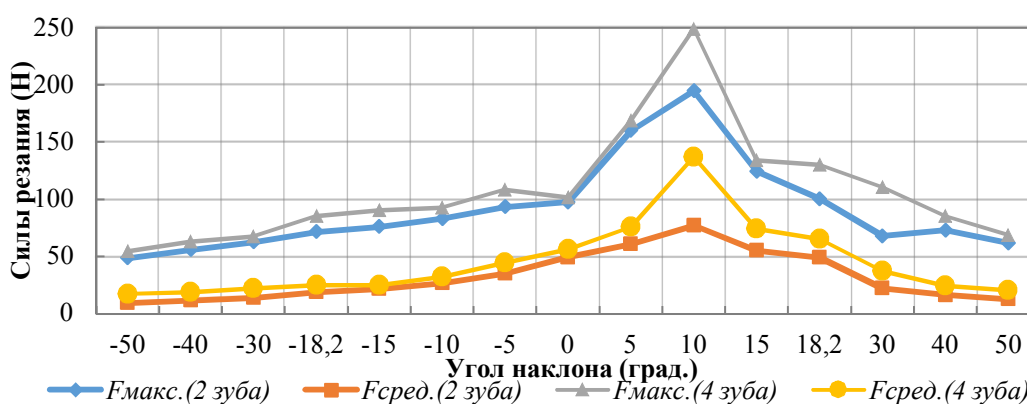


Рис. 19. Диаграммы максимальных и средних значений силы резания при различных углах опережения

Влияния комбинации двух углов на силы резания. Для двухфакторного анализа влияния ориентации инструмента на силы резания с изменением углов наклона и опережения проведены испытания, при которых углы α и β изменялись в интервалах $-30 \dots 30^\circ$. В этих пределах инструмент ориентировался относительно нормали к обрабатываемой поверхности. Для каждого типа фрез проведено 49 испытаний. При этом угол между осью инструмента и нормалью к поверхности в точке касания определялся по формуле:

$$\gamma = \arctg\left(\sqrt{tg^2\alpha + tg^2\beta}\right) \quad (3)$$

Результаты измерения силы резания при ориентации инструмента с двумя и четырьмя режущими зубьями представлены на рисунках 20, 21.

Экспериментальные исследования и графическое отображение их результатов позволяют сделать вывод, что сила резания значительно увеличивается, когда инструмент находится в таком положении, при котором точка инструмента с нулевой скоростью резания оказывается в зоне снятия стружки и участвует в процессе обработки. Для фрез, используемых в эксперименте, при

глубине резания 0,2 мм такие положения определяются интервалом изменения угла наклона относительно нормали к поверхности в точке касания инструмента с заготовкой $-10^\circ \dots 10^\circ$ и угла опережения $0 \dots 20^\circ$. При угле наклона $\alpha = 0^\circ$ и угле опережения $\beta = 10^\circ$ значения силы резания могут достигать критических величин. Малые значения сила резания имеет при угле опережения $\beta = -30^\circ$.

Заключение. Результаты измерения и анализа силы резания при концевом фрезеровании заготовки сфероцилиндрическим инструментом позволили оценить влияние углов наклона и опережения инструмента на динамические характеристики процесса и сделать следующие выводы:

- условия обработки существенно влияют на силу резания. Нашло подтверждение теоретического заключения о том, что при увеличении подачи на зуб и глубины резания, а также с повышением частоты вращения шпинделя, увеличивается сила резания.
- при использовании сфероцилиндрических фрез различных диаметров с одинаковым количеством зубьев проекция силы резания растёт с увеличением диаметра сферической части

инструмента. При обработке поверхности четырехзубой фрезой проекция силы резания F_x

уменьшается, а F_y и F_z - увеличиваются по сравнению с обработкой двухзубой фрезой.

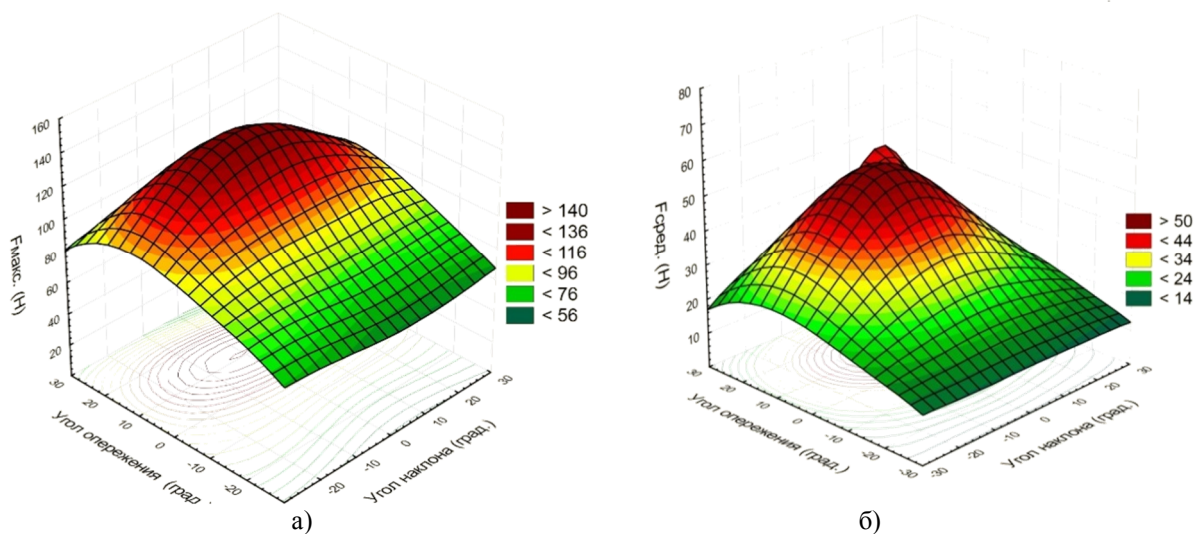


Рис. 20. Зависимость максимальных (а) и средних значений (б) силы резания от углов наклона и опережения инструмента при фрезеровании двухзубой фрезой

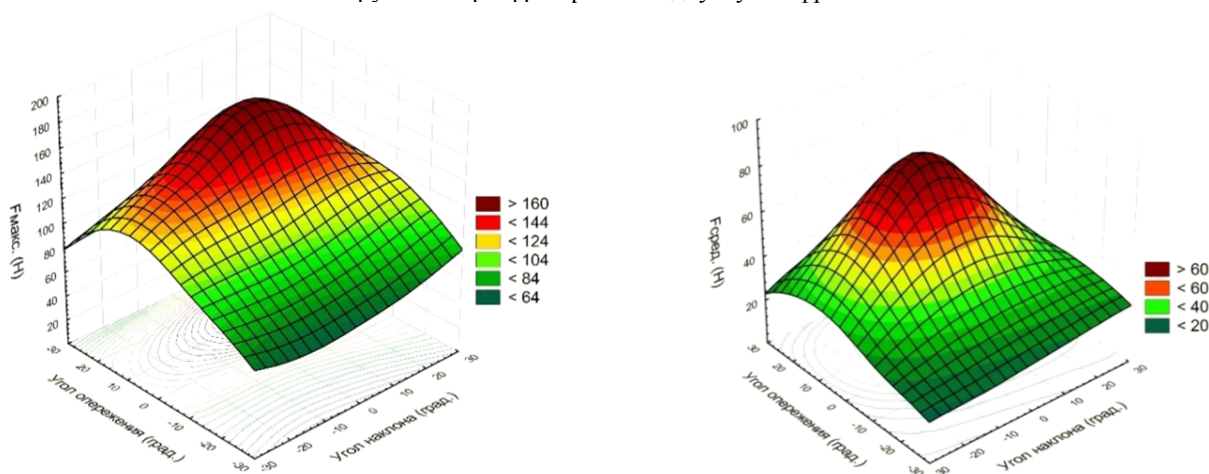


Рис. 21. Зависимость максимальных (а) и средних значений (б) силы резания от углов наклона и опережения инструмента при фрезеровании четырехзубой фрезой

- при нахождении точки сферической части инструмента с нулевой скоростью резания, в зоне удаления сегмента стружки сила резания значительно возрастает, так для сфероцилиндрической фрезы диаметром 8мм это происходит при изменении угла наклона α от -10 до 10° и угла опережения β от 0 до 20° .

Результаты оценки влияния ориентации сфероцилиндрических фрез на силу резания позволяют определить оптимальные углы позиционирования инструмента при фрезеровании поверхностей на пятикоординатных станках с ЧПУ, обеспечить его устойчивую работу и высокое качество получаемой поверхности, а также добиться повышения производительности в виде повышения минутного объема снимаемой стружки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абдразаков Ф.К., Поваров А.В. Вульф, А.М. Резание металлов. Л.: Машиностроение. 1973. 496 с.
2. Wojciechowski S., Twardowski P., Pelic M. Cutting forces and vibrations during ball end milling of inclined surfaces // Procedia CIRP. 2014. № 14. Pp. 113–118.
3. Moufki A., Devillez A., Dudzinski D., Molinari A. Thermomechanical modelling of oblique cutting and experimental validation // Int. J. Mach. Tools Manuf. 2004. № 44. Pp. 971–989.
4. Shatla M., Altan T. Analytical modeling of drilling and ball end milling // Journal of Materials Processing Technology. 2000. № 98(1). Pp. 125–133.
5. Budak E., Altintas Y., Armarego E. J. A. Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 1996. № 118(2). Pp. 216–224.

6. Lee P., Altintaş Y. Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1996. № 36(9). Pp. 1059–1072.

7. Yang M., Park H. The prediction of cutting force in ball-end milling // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1991. № 31(1). Pp. 45–54.

8. Subrahmanyam K.V.R., San W.Y., Soon H.G., Sheng H. Cutting force prediction for ball nose milling of inclined surface // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 48. Iss. 1-4. Pp. 23–32

9. Parihar V., Saloda M.A., Nandwana B.P., Khidiya M. S. Effects of cutting parameters on cutting forces: An experimental study and numerical modeling of turning operation by finite element analysis // Journal of Environmental Science, Computer Science and Engineering & Technology. 2015. Vol. 4. № 4. Pp. 532-544.

10. Jin X., Altintas Y. Prediction of micro-milling forces with finite element method // Journal of Materials Processing Technology. 2012. № 212(3). Pp. 542–552.

11. Mohammadpour M., Razfar M. R., Jalili Safar R. Numerical investigating the effect of machining parameters on residual stresses in orthogonal cutting // Simulation Modelling Practice and Theory. 2010. № 18(3). Pp. 378–389.

12. Shams A., Mashayekhi M. Improvement of orthogonal cutting simulation with a nonlocal damage model // International Journal of Mechanical Sciences. 2012. № 61(1). Pp. 88–96.

13. 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.

14. Пономарев Б.Б., Нгуен Ши Хьен. Влияние ориентации инструмента на силы резания при концевом фрезеровании // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019. Т. 708. № 3. С. 11–20.

15. Руководство по эксплуатации - Программное обеспечение DYNOWARE.

16. Утенков В.М., Быков П.А. Возможности использования динамометра Kistler для испытания металлорежущих станков // Инженерный Вестник. 2012. № 10. С. 1–9.

Информация об авторах

Пономарев Борис Борисович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств». E-mail: pusw@istu.edu. Иркутский национальный исследовательский технический университет. Россия, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Нгуен Ши Хьен, аспирант кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств». E-mail: syhiendk35@gmail.com. Иркутский национальный исследовательский технический университет. Россия, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Поступила в мае 2019 г.

© Пономарев Б.Б., Нгуен Ши Хьен, 2019

¹*Ponomarev B.B., ^{1,*}Nguyen Sy Hien*

¹*Irkutsk National Research Technical University
Russia, 664074, Irkutsk, st. Lermontova, 83.*

**E-mail: syhiendk35@gmail.com*

DYNAMICS OF FIVE-AXIS END MILLING PROCESS

Abstract. *The article presents the experimental results of the influences of machining conditions and tool orientation on cutting forces during the end milling of free-form surfaces. A series of experiments are carried out on the machining of steel 3 blanks on a five-axis milling machine model HSC 75 linear using 2-flute and 4-flute ball end mills from MITSUBISHI with diameters from 5 mm to 10 mm. The dependency diagrams and graphs of cutting forces and their projections on cutting time are given at different spindle speeds, feeds per tooth, depths of cut, tilt angles and lead angle when using different ball end mills. Based on the results of the analysis of experimental data, the theoretical conclusion about the increase in cutting forces with increasing feed per tooth, cutting depth and spindle speed in relation to the ball end milling process is confirmed. The critical tool positions with respect to the surface, at which cutting forces have maximum values, are revealed. The obtained results allow developing recommendations for the choice of the tool position during end milling of free-form surfaces to reduce loads on the tool.*

Keywords: *five-axis end milling, free-form surfaces, cutting forces, ball end mills, tool orientation, machining conditions.*

REFERENCES

1. Vul'f A.M. Metal cutting [*Rezaniye metallov*]. Leningrad, Mashinostroyeniye publ., 1973. 496p. (rus)
2. Wojciechowski S., Twardowski P., Pelic M. Cutting forces and vibrations during ball end milling of inclined surfaces. *Procedia CIRP*. 2014. No. 14. Pp. 113–118.
3. Moufki A., Devillez A., Dudzinski D., Molinari A. Thermomechanical modelling of oblique cutting and experimental validation. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2004. No. 44. Pp. 971–989.
4. Shatla M., Altan T. Analytical modeling of drilling and ball end milling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000. No. 98(1). Pp. 125–133.
5. Budak E., Altintaş Y., Armarego E.J. A. Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1996. No. 118(2). Pp. 216–224.
6. Lee P., Altintaş Y. Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1996. No. 36(9). Pp. 1059–1072.
7. Yang M., Park H. The prediction of cutting force in ball-end milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1991. No. 31(1). Pp. 45–54.
8. Subrahmanyam K.V.R., San W.Y., Soon H.G., Sheng H. Cutting force prediction for ball nose milling of inclined surface // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 48. Iss. 1-4. Pp. 23–32
9. Nandwana B.P., Khidiya M. S. Effects of cutting parameters on cutting forces: An experimental study and numerical modeling of turning operation by finite element analysis. *Journal of Environmental Science, Computer Science and Engineering & Technology*. 2015. Vol. 4. No. 4. Pp. 532–544.
10. Jin X., Altintas Y. Prediction of micro-milling forces with finite element method. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012. No. 212(3). Pp. 542–552.
11. Mohammadpour M., Razfar M. R., Jalili Safar R. Numerical investigating the effect of machining parameters on residual stresses in orthogonal cutting. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2010. No. 18(3). Pp. 378–389.
12. Shams A., Mashayekhi M. Improvement of orthogonal cutting simulation with a nonlocal damage model. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2012. No. 61(1). Pp. 88–96.
13. Ponomarev B.B., Nguyen S.H. Modeling and analysis of influence of process conditions on cutting forces during end milling [*Modelirovaniye i analiz vliyaniya usloviy obrabotki na sily rezaniya pri kontsevom frezerovanii*]. *Modern technologies, system analysis, modeling*. 2018. No. 3, Pp. 8–16. (rus)
14. Ponomarev B.B., Nguyen S.H. The influence of tool orientation on cutting forces during end milling [*Vliyaniye oriyentatsii instrumenta na sily rezaniya pri kontsevom frezerovanii*]. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 2019. No. 3. Pp. 11–20. (rus)
15. Instruction Manual - DYNOWARE Software [*Rukovodstvo po ekspluatatsii - Programmnoye obespecheniye DYNOWARE*]. (rus)
16. Utenkov V.M., Bykov P.A. Possibilities of using a dynamometer Kistler for testing metal-cutting machines [*Vozmozhnosti ispol'zovaniya dinamometra Kistler dlya ispytaniya metallovezhushchikh stankov*]. *Engineering Herald*. 2012. No. 10. Pp. 1–9. (rus)

Information about the authors

Ponomarev Boris Borisovich. DSc (Eng.), Professor. E-mail: pusw@istu.edu. Irkutsk National Research Technical University. Russia, 664074, Irkutsk, Lermontov St., Bldg. 83.

Nguyen Sy Hien. Postgraduate student. E-mail: syhiendk35@gmail.com. Irkutsk National Research Technical University. Russia, 664074, Irkutsk, Lermontov St., Bldg. 83.

Received in May 2019

Для цитирования:

Пономарев Б.Б., Нгуен Ши Хьен. Исследования динамики процесса пятикоординатного концевоего фрезерования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 7. С. 108–120. DOI: 10.34031/article_5d35d0b677dc74.96046396

For citation:

Ponomarev B.B., Nguyen Sy Hien. Dynamics of five-axis end milling process. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 7. Pp. 108–120. DOI: 10.34031/article_5d35d0b677dc74.96046396