

УДК 621.9.08

DOI: 10.30987/article_5cda64cc611ed4.66880449

Б.Б. Пономарев, Ш.Х. Нгуен

ВЫБОР ДИНАМОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ КОНЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

Представлены результаты сравнения динамометров трех типов, используемых для измерения составляющих силы резания в процессе чистового пятикоординатного фрезерования сфероцилиндрическими фрезами. Выявлены основные преимущества и недостатки каждого из них. Показано, что

наиболее предпочтительно использование стационарного динамометра *Kistler Type 9129AA*.

Ключевые слова: сила резания, стационарный динамометр, ротационный динамометр, пятикоординатное фрезерование, сфероцилиндрические фрезы, чистовая обработка.

B.B. Ponomaryov, Sh.H. Nguen

DYNAMOMETER CHOICE FOR CUTTING FORCE MEASUREMENT AT END MILLING

In the paper there are presented results of the comparison of dynamometers of three types with reference to measurements connected with the definition of values making cutting forces in the course of blank finish five-coordinate milling with spherical-cylindrical mill cutters with the diameter from 5 to 10 mm. At that a particular attention is paid to the protection of these devices against external influences, to the processing possibility of data obtained in measuring equipment with the use of program applications. The measurement series of cutting forces with the aid of a stationary dynamometer and a rotary one allowed revealing basic advantages and drawbacks of both of them. The as-

essment results of forces measured at tool idling and in the course of machining allowed drawing a conclusion of that the use of the stationary dynamometer of *Kistler Type 9129AA* is most preferable.

The measurement series carried out allowed confirming the results of theoretical investigations and machining dynamics modeling, and also defining the impact of a tool position regarding a normal upon measurement processes and data reliability.

Key words: cutting force, stationary dynamometer, rotary dynamometer, five-coordinate milling, spherical cylindrical mill cutters, finishing.

Введение

Динамические факторы, определяемые характером возникающих сил и положением инструмента относительно заготовки, оказывают существенное влияние на протекание любого процесса резания [1]. Силы резания влияют не только на состояние системы СПИД (станок - приспособление - инструмент - деталь), но и на температуру резания, стойкость режущего инструмента, точность обработки и требуемую мощность технологического оборудования. В процессе чистового фрезерования эти силы в значительной степени определяют качество поверхностного слоя деталей изделий, включая шероховатость, а также производительность обработки [2]. Возникающие в процессе резания силы необходимо учитывать при оптимизации технологических операций механической

обработки поверхностей деталей, в особенности поверхностей свободной формы.

Равнодействующую силу F резания можно разложить на составляющие, которые определяют процесс резания и влияют на технологические факторы. Обычно это радиальная, касательная и осевая составляющие силы резания - F_r , F_k , F_o - или проекции F_x , F_y и F_z на координатные оси системы координат, связанной с инструментом или заготовкой.

Теоретическое определение силы резания в процессе фрезерования концевым инструментом, в том числе и сфероцилиндрическим со сложной формой режущей кромки зуба, мало изучено. Разработанные методы, как правило, позволяют точно рассчитать силы резания только в сечении инструмента или при использовании фрезы с прямым зубом.

В настоящее время представляется возможным моделировать силы резания с использованием программных продуктов инженерного анализа и определять характер их изменения в зависимости от различных факторов. Конечноэлементный метод использован в работах [3; 4]. Для определения и анализа сил резания в процессе чистового фрезерования при различных значениях углов наклона и опережения, определяющих относительные положения инструмента и заготовки, использованы возможности программы *Abaqus*. Для подтверждения соответствия результатов динамического моделирования процесса обработки теоретическим данным, фактическим значениям силы резания (как по величине, так и по характеру её изменения) проведена серия экспериментов на станках с ЧПУ. Для проведения измерений потребовалось проанализировать и выбрать прибор, отвечающий предъявляемым требованиям по точности и достоверности результатов измерений, а также учитывающий конструктивные особенности станков, выбранных для выполнения исследования.

Ведущие мировые производители предлагают большое количество специальных приборов самых разнообразных конструкций, различающихся как по методу измерения сил, так и по роду станков, на которых они устанавливаются. Наиболее распространен метод непосредственного измерения сил резания при помощи динамометров. Они имеют три основные части: датчики, воспринимающие нагрузки, приемники и органы связи, соединяющие датчики и приемники. При измерении сил резания при чистовом фрезеровании рекомендуется использовать электрические динамометры, построенные на различных принципах (емкостном, индукционном, тензометрическом и др.) [2].

В настоящей работе представлены результаты сравнительного анализа при выборе подходящего типа динамометра и его параметров для измерения сил резания при чистовом фрезеровании заготовок концевыми сфероцилиндрическими фрезами диаметром от 5 до 10 мм. Наиболее часто используются с этой целью динамометры фирмы *Kistler*.

Основные характеристики динамометров *Kistler*

С целью определения возможности использования при измерениях и анализе сил резания, возникающих в процессе чистового фрезерования, были испытаны три типа динамометров: трехкомпонентная динамометрическая плита *Kistler Type 9253B23* (рис. 1а), ротационный четырех-

компонентный динамометр *Kistler Type 9123CQ05* (рис. 1б) и трехкомпонентный динамометрический комплекс для токарных станков *Kistler Type 9129AA* (рис. 1в), основные характеристики которых представлены в таблице.

Таблица

Основные характеристики динамометров *Kistler*

Динамометр			Диапазон измерения сил и моментов	Работоспособность при чистовом фрезеровании
Тип	Вид	Компоненты		
9253B23	Стационарный	F_x, F_y, F_z	$F_x, F_y \pm 12 \text{ кН};$ $F_z - 12...+25 \text{ кН}$	Возможно с ограничением
9123CQ05	Ротационный	F_x, F_y, F_z, M_z	$F_x, F_y \pm 5 \text{ кН};$ $F_z \pm 20 \text{ кН};$ $M_z \pm 200 \text{ Н} \cdot \text{м}$	Подходит
9129AA	Стационарный	F_x, F_y, F_z	$F_x, F_y, F_z \pm 10 \text{ кН}$	Подходит

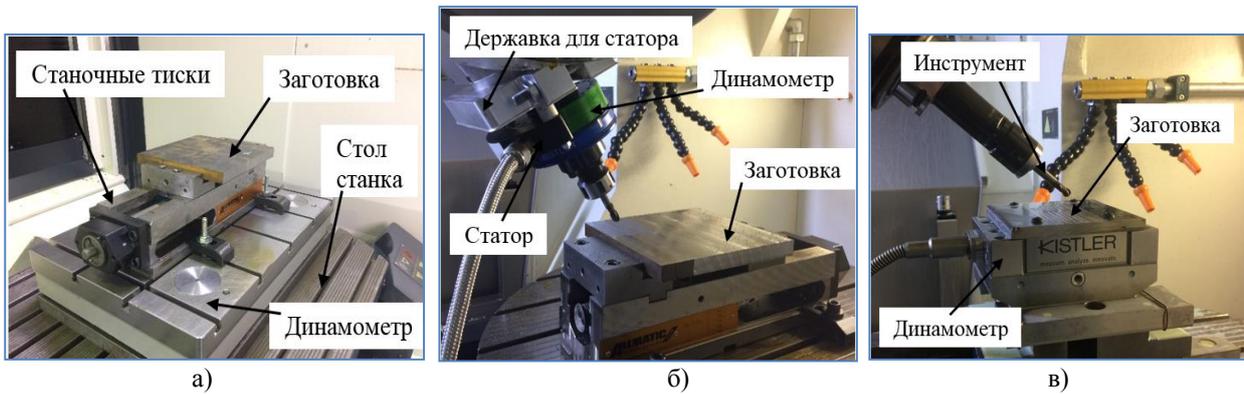


Рис. 1. Динамометры фирмы *Kistler*:
 а - стационарный динамометр 9253B23; б - ротационный динамометр 9123CQ05;
 в - динамометрический комплекс 9129AA

Схема подключения для всех типов динамометров *Kistler* одинакова и изображена на рис. 2.



Рис. 2. Общая схема подключения динамометров *Kistler*

Стационарный динамометр зачастую является соединительным элементом между столом станка и заготовкой. Заготовка фиксируется на динамометре, что позволяет измерять силы резания в производственных условиях. Результирующая сила, действующая на стационарный динамометр, пропорциональна алгебраической сумме соответствующих компонентов отдельных сил, которые образуют систему параллельных их составляющих (рис. 3). В зависимости от конструкции возникающие силы фиксируются одним или несколькими многокомпонентными датчиками силы. Проекции сил резания F_x , F_y и F_z определяются в системе координат

заготовки и рассчитываются по следующим формулам:

$$\begin{cases} F_x = F_{x1+2} + F_{x3+4} \\ F_y = F_{y1+2} + F_{y3+4} \\ F_z = F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + F_{z4} \end{cases},$$

где F_{x1+2} и F_{x3+4} - выходные сигналы датчиков, измеряющих проекции силы резания по оси Ox ; F_{y1+2} и F_{y3+4} - выходные сигналы датчиков, измеряющих проекции силы резания по оси Oy ; F_{z1} , F_{z2} , F_{z3} и F_{z4} - выходные сигналы, отражающие проекции силы, действующие на 4 датчика по оси Oz .

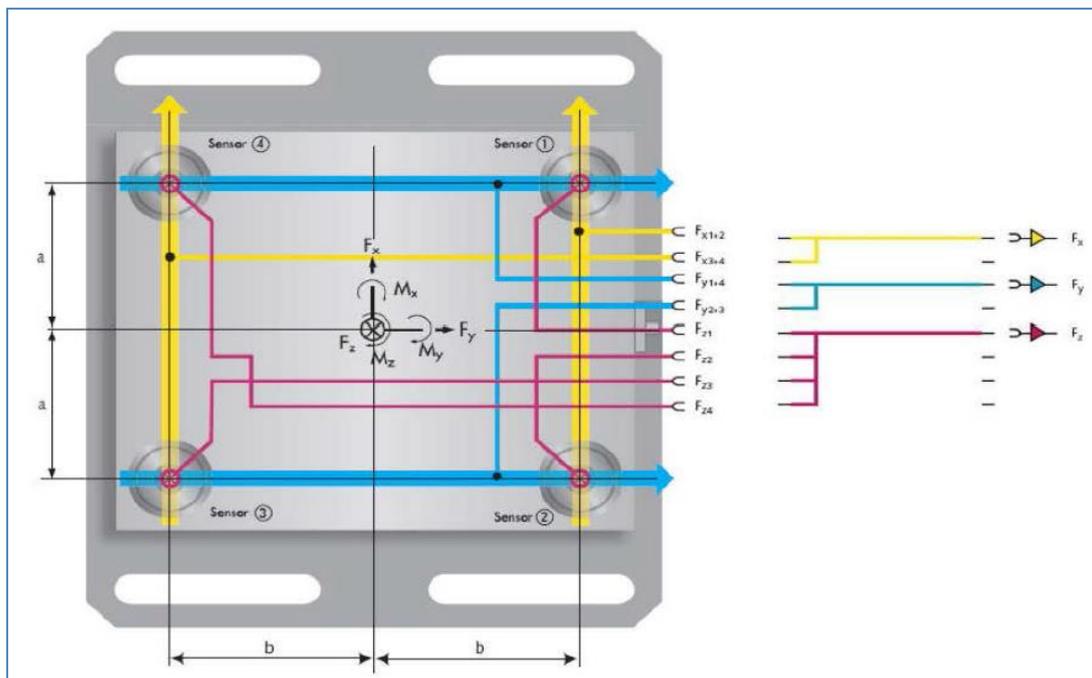


Рис. 3. Структура датчиков стационарного динамометра

Ротационные динамометры устанавливаются в шпиндель станка, статор крепится к корпусу шпинделя через державку и болты, расстояние между статором и динамометром должно быть в пределах 1-2 мм (рис. 1б). Инструмент устанавливается в ротационный динамометр с помощью держателя инструмента. В динамометре используется только один многокомпонентный датчик для измерения сил и момента непосредственно на инструменте. Помимо датчика на роторе установлены усилитель заряда и телеметрическая электроника. Телеметрия используется для передачи данных измерений в стационарную часть измерительной цепи (статор), где сила представляется в виде аналоговых сигналов напряжения. При измерении сил резания с помощью ротационного динамометра силы определяются в системе координат инструмента, которая вращается вокруг оси Oz со скоростью вращения шпинделя. Средняя сила резания на зуб может быть определена по формуле [6]

$$F_{cmz} = bh_m k_c K_{\gamma_0} K_v K_{ver},$$

где $b = \frac{a}{\sin \chi}$ - длина резания для каждого зуба; h_m - средняя толщина стружки; a -

глубина резания; $\chi = 45^\circ$ (при обработке стали и отливок); k_c - средние удельные силы резания при механической обработке; $K_{\gamma_0} \approx 1$; K_v - поправочный коэффициент для скорости резания, взятый из справочника; $K_{ver} = 1, 2 \dots 1, 4$.

Для сбора и анализа данных при силовом анализе производителями приборов предлагается использовать многоцелевое программное обеспечение *DynoWare*. Программное обеспечение разработано с целью создания измерительного комплекса на основе хорошо зарекомендовавшей себя линейки кварцевых динамометров фирмы *Kistler* и их использования совместно с современной компьютерной техникой [5]. При анализе сигнала программный комплекс *DynoWare* (рис. 4) 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 [7].

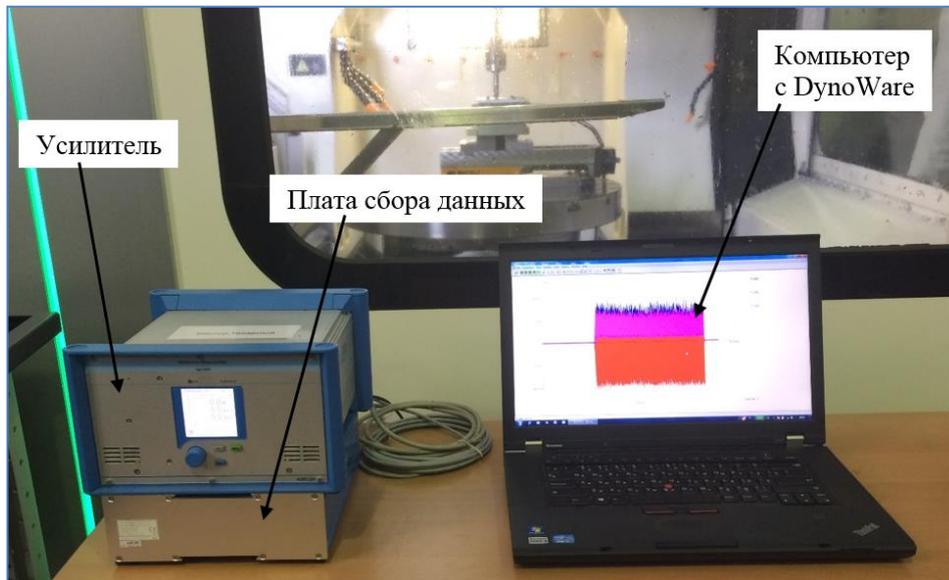


Рис. 4. Система измерения сил резания, регистрации и обработки данных

Погрешности при измерении силы резания

На результаты измерения силы резания с помощью динамометра оказывают влияние различные факторы, такие как «шум» станка, дисбаланс системы измерения, неточность совпадения позиции динамометра по отношению к осям станка, механическое воздействие СОЖ, сдвиг динамометра во время измерения и т.д. Эти факторы порождают дополнительные погрешности при определении сил.

Для оценки уровня сигнала от «шума» станка, наводимого при его работе на датчики динамометра, измерения проводились в режиме холостых движений с вращающимся шпинделем и инструментом, установленным в станочную оснастку. На

рис. 5 представлены результаты измерения силы, полученные с помощью стационарного динамометра 9253B23 при фрезеровании детали на пятикоординатном станке DMU 80P duoBLOCK. Ниже приведены диаграммы и графики проекций сил, полученные в процессе испытаний на пятикоординатном станке HSC 75 linear и построенные измерительной системой на основе их значений, зарегистрированных с использованием ротационного динамометра типа 9123CQ05 (рис. 6) и стационарного динамометра 9129AA (рис. 7). Испытания проводились при частоте вращения шпинделя 6000 об/мин.

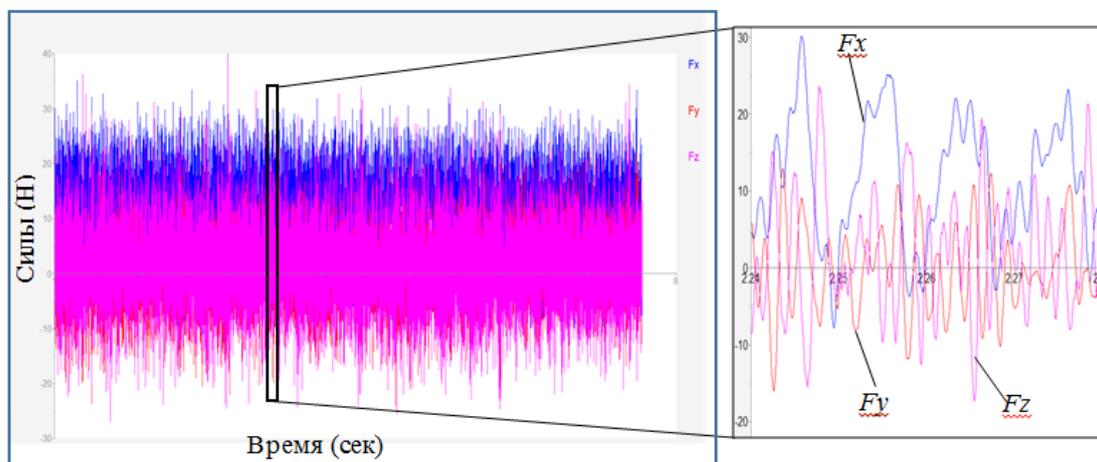


Рис. 5. Нагрузки, измеренные с помощью стационарного динамометра 9253B23 при холостом движении инструмента

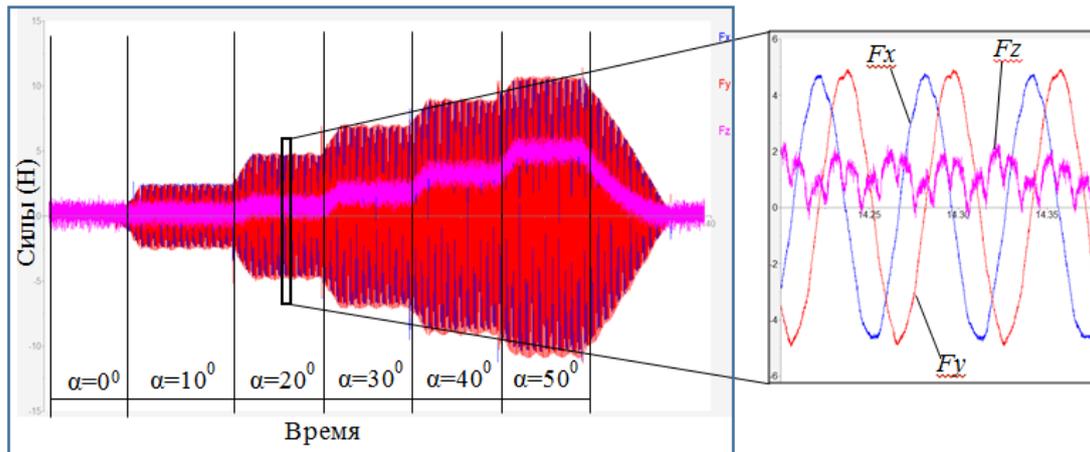


Рис. 6. Нагрузки, измеренные с помощью ротационного динамометра 9123CQ05 при холостом движении инструмента и различных значениях угла наклона инструмента

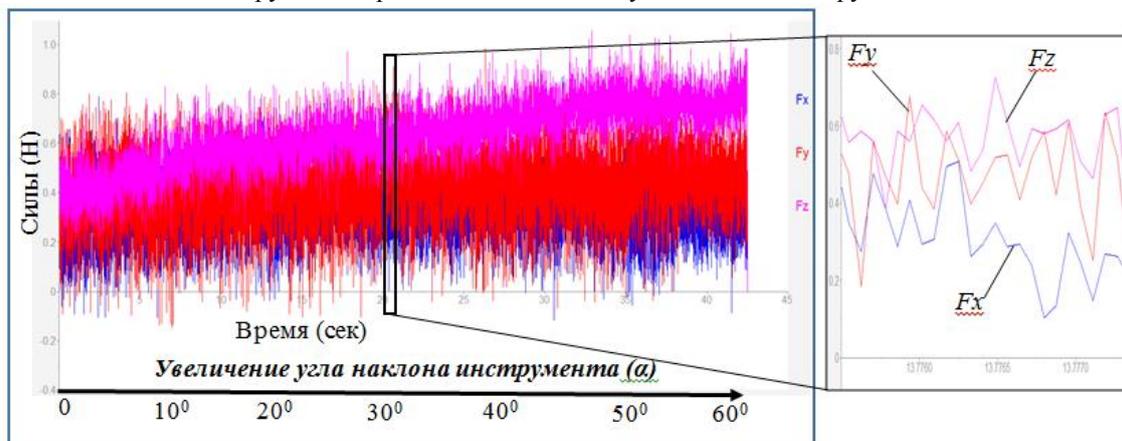


Рис. 7. Нагрузки, измеренные с использованием стационарного динамометра 9129AA при холостом движении инструмента и различных значениях угла наклона инструмента

Из диаграммы измерения сил (рис. 5) на стационарном динамометре типа 9253B23 следует, что регистрируемые нагрузки при холостом движении инструмента значительны: $F_{xmax} = 30$ Н, $F_{ymax} = 13$ Н, $F_{zmax} = 24$ Н. Повышенная чувствительность динамометра и шум, фиксируемый измерительной системой, не позволяют выделить собственно силу резания. Поэтому такой динамометр не мог быть использован для измерения сил резания при чистовой обработке деталей концевыми фрезами при малых глубинах резания и подачах на зуб.

Как показали испытания, применение ротационного динамометра при условии отклонения оси инструмента и ротора от вертикального положения сопряжено с повышением влияния дисбаланса на результаты измерения. Незначительное несовпадение центральной осевой линии массы комплекса динамометра и инструмента с

осью вращения инструмента проявляется в форме дополнительных ошибок при регистрации измеряемых сил. Поэтому он должен быть сбалансирован с особой тщательностью по достижимому классу в соответствии с ГОСТ ИСО 1940-1-2007. В работе [8] автор обоснованно предложил считать значение допустимого остаточного дисбаланса ротора для высокоскоростного динамометра равным 2,5 гмм. На рис. 6 представлены результаты регистрации значений сил при холостом движении инструмента при изменении угла наклона его оси от 0 до 50°, полученные измерительной системой с ротационным динамометром типа 9123CQ05. Дополнительная нестабильность в измерениях может привести к получению недостоверных данных при проведении экспериментов, что ставит под сомнение возможность использования такого динамометра в дальнейших исследованиях.

Из рис. 7 следует, что «шум» станка и другие факторы при использовании стационарного динамометра типа 9129АА незначительно влияют на результаты измерения сил резания. Уровень помех, зафиксированный с помощью стационарного

динамометра типа 9129АА, составляет менее 1Н. При увеличении угла наклона инструмента проекция силы F_z изменяется, но это не влияет на результаты измерения силы резания.

Результаты измерения силы резания

С целью принятия окончательного решения по выбору динамометра для проведения экспериментальных исследований по измерению сил резания, возникающих в процессе чистовой обработки заготовок с использованием сфероцилиндрических фрез, были проведены испытания упомянутых выше динамометров.

На рис. 8 представлены диаграммы проекций силы резания F_x , F_y и F_z в системе координат заготовки, измеренных с использованием динамометра типа 9253В23. Значительный «шум» станка, фиксируе-

мый измерительной системой, приводит при обработке сигналов к резонансным значениям силы резания, что не позволяет объективно оценить характер её изменения. Применение фильтров для уменьшения влияния «шума» станка, реализованных в таких приложениях, как *MatLab*, не позволяет достичь желаемого результата. Вместе с тем создает ряд осложнений, связанных с необходимостью пользователю иметь дополнительные ресурсы на передачу, обработку и преобразование сигналов датчиков динамометра.

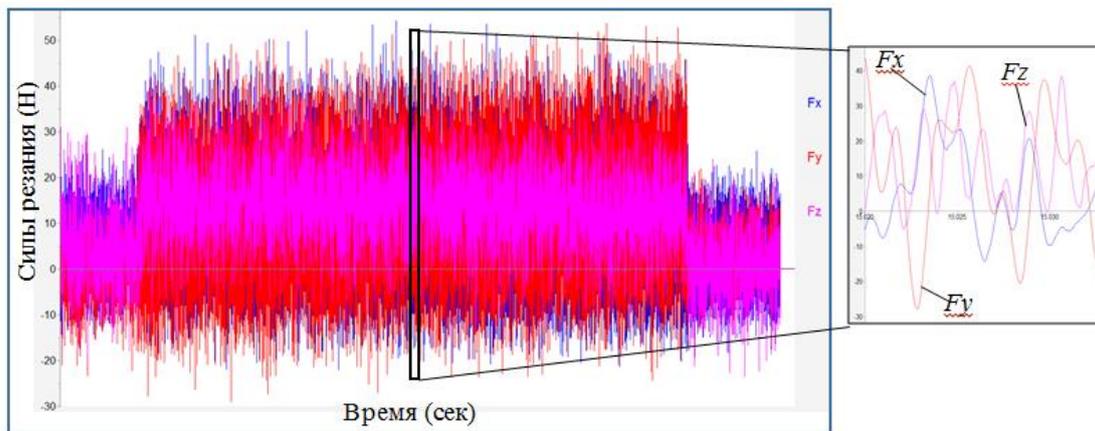


Рис. 8. Диаграмма проекций силы резания, полученная с помощью динамометра типа 9253В23 в процессе обработки при условиях: диаметр инструмента - 10 мм, материал заготовки - сталь 30ХГСА, частота вращения шпинделя $n=6000$ об/мин, глубина резания $t=0,3$ мм, подача на зуб $f_z=0,02$ мм

Диаграмма сил резания, полученная с помощью ротационного динамометра 9123СQ05, представлена на рис. 9.

При использовании ротационного динамометра инструментальная система координат вращается вокруг оси Oz со скоростью вращения шпинделя. Для оценки силы резания при фрезеровании заготовки с заданным углом наклона инструмента необходимо преобразовать проекции силы резания на координатные оси системы координат, связанной с инструментом, в проекции силы на оси системы координат заготовки.

На рис. 10 представлена диаграмма проекций силы резания, полученная с помощью динамометра типа 9129АА. Характеристики диаграмм сил резания отвечают результатам теоретических исследований и моделирования с применением программных средств инженерного анализа. Приведенные на рис. 10 диаграммы достаточно точно соответствуют выкладкам, представленным авторами работ [2; 10], и результатам моделирования, изложенным ранее в других работах [3; 4; 11; 12].

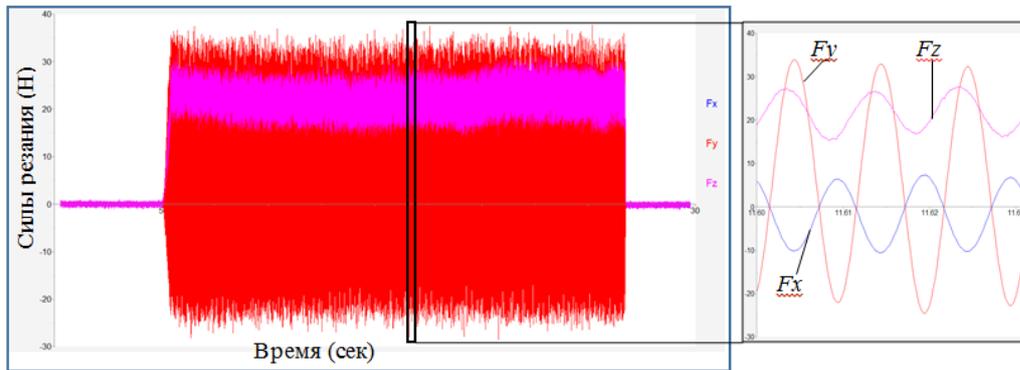


Рис. 9. Диаграмма проекций силы резания, полученная с помощью ротационного динамометра типа 9123CQ05 при условиях обработки: диаметр инструмента - 10 мм, материал заготовки - сталь 30ХГСА, частота вращения шпинделя $n=6000$ об/мин, глубина резания $t=0,3$ мм, подача на зуб $f_z=0,02$ мм

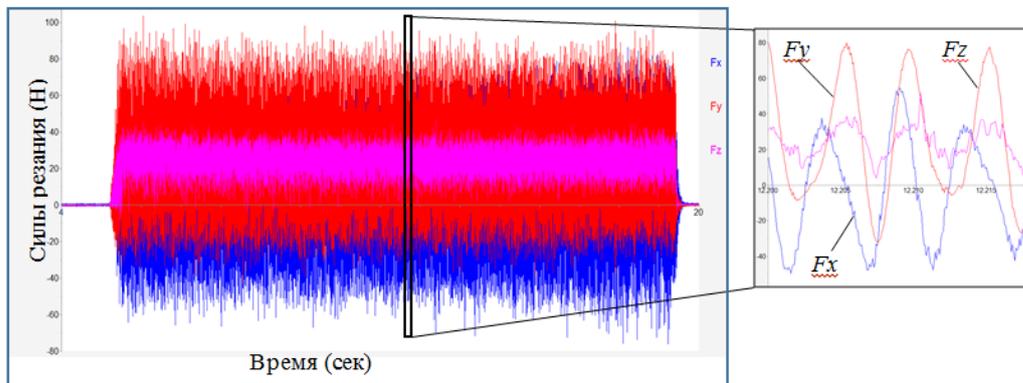


Рис. 10. Диаграмма проекций силы резания, полученная на стационарном динамометре типа 9129AA при условиях обработки: диаметр инструмента - 8 мм, материал заготовки - Ст 3, частота вращения шпинделя $n=6000$ об/мин, глубина резания $t=0,2$ мм, подача на зуб $f_z=0,02$ мм

Выводы

По представленным результатам измерения величин нагрузок, возникающих в процессе чистовой обработки заготовок сфероцилиндрическими фрезами, полученным с помощью различных типов динамометрических комплексов, можно отметить их достоинства и недостатки.

Стационарный динамометр типа 9253B23 имеет значительные габариты рабочей зоны (что не ограничивает исследователя в размерах и массе заготовки), высокую чувствительность и большой диапазон измерений. В то же время он не может быть использован в технологических процессах с малым уровнем нагрузок от сил резания и соизмеримыми с ними нагрузками, порождаемыми «шумом» станка.

Ротационный динамометр типа 9123CQ05, включенный в измерительную систему, позволяет кроме силы измерять момент M_z , причем силы и момент определяются в зоне режущей кромки, что дает

возможность определять составляющие силы резания: радиальную F_p , касательную F_k и осевую F_o . Но при этом результаты испытаний показали, что при фрезеровании заготовки с углом наклона инструмента более 5° значительно возрастает погрешность. Также в процессе эксплуатации державки для установки статора должны находиться на расстоянии 1-2 мм от ротора динамометра, что накладывает ограничения в проведении экспериментальных исследований. Для определения значений проекций силы резания в системе координат заготовки необходимо осуществлять преобразование из системы координат динамометра.

Результаты испытаний позволяют сделать вывод, что стационарный динамометр типа 9129AA обладает высокой точностью при любой позиции инструмента относительно заготовки и достаточной чувствительностью. При малых размерах

рабочей площадки он позволяет проводить исследования с применением сфероцилин-

Заключение

С целью измерения сил резания, возникающих в процессе чистового фрезерования заготовок на пятикоординатном станке сфероцилиндрической фрезой, были проведены испытания с использованием измерительной системы с тремя различными моделями динамометров. На основании полученных результатов и их сравнения выбран динамометр типа

дрических концевых фрез на пятикоординатных станках.

9129AA, отвечающий требованиям для проведения дальнейших экспериментальных исследований, которые направлены на подтверждение результатов теоретического определения и моделирования динамики процесса обработки, а также на определение оптимальной позиции инструмента относительно нормали к заготовке для повышения производительности процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
2. Вульф, А.М. Резание металлов / А.М. Вульф. – Л.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
3. Пономарев, Б.Б. Моделирование и анализ влияния условий обработки на силы резания при концевом фрезеровании / Б.Б. Пономарев, Ш.Х. Нгуен // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – Т. 59 – № 3. – С. 8-16.
4. Пономарев, Б.Б. Моделирование процесса концевое фрезерования в среде SIMULIA ABAQUS / Б.Б. Пономарев, Ш.Х. Нгуен // III международная научно-практическая конференция WORLD SCIENCE. – М., 2018. – С. 116-123.
5. Программное обеспечение DYNOWARE. Руководство по эксплуатации.
6. Ротационный динамометр для измерения сил резания типа 9123С. Руководство по эксплуатации.
7. Утенков, В.М. Возможности использования динамометра Kistler для испытания металлорежущих станков / В.М. Утенков, П.А. Быков // Инженерный вестник. – 2012. – № 10. – С. 9.
8. Smith, G.T. Cutting Tool Technology Industrial Handbook / G.T. Smith. – London: Springer, 2008. – 605 p.
9. Резников, Н.И. Учение о резании металлов / Н.И. Резников. – М.: Машгиз, 1947. – 588 с.
10. Altintas, Y. Mechanics and Dynamics of Ball End Milling / Y. Altintas, P. Lee // ASME J. Manufact. Science and Eng. – 1998. - Vol. 120. – P. 684-691.
11. Ozturk, E. Modeling of 5-axis milling forces / E. Ozturk, E. Budak // Proceedings of the 8th CIRP International Workshop Model Machining Operations. - Chemnitz, Germany, 2005. – P. 319-332.
1. Bobrov, V.F. Theory Fundamentals of Metal Cutting / V.F. Bobrov. – M.: Mechanical Engineering, 1975. – pp. 344.
2. Wolf, A.M. Metal Cutting / A.M. Wolf. – L.: Mechanical Engineering, 1973. – pp. 496.
3. Ponomaryov, B.B. Modeling and analysis of machining conditions impact upon cutting forces at end milling / B.B. Ponomaryov, Sh.H. Nguen // Modern Technologies. System Analysis. Modeling. – 2018. – Vol. 59 – No.3. – pp. 8-16.
4. Ponomaryov, B.B. End milling process modeling in SIMULIA ABAQUS environment / B.B. Ponomaryov, Sh.H. Nguen // The III-d Inter. Scientif.-Pract. Conf. WORLD SCIENCE. – M., 2018. – pp. 116-123.
5. DYNOWARE Software. Operating manual.
6. Rotary Dynamometer 9123C for Cutting Force Measurements. Operating manual.
7. Utyonkov, V.M. Potentialities of Kistler dynamometer use for machine-tool tests / V.M. Utyonkov, P.A. Bykov // Engineering Bulletin. – 2012. – No.10. – pp. 9.
8. Smith, G.T. Cutting Tool Technology Industrial Handbook / G.T. Smith. – London: Springer, 2008. – 605 p.
9. Reznikov, N.I. Metal Cutting Teaching / N.I. Reznikov. – M.: Machgiz, 1947. – pp. 588.
10. Altintas, Y. Mechanics and Dynamics of Ball End Milling / Y. Altintas, P. Lee // ASME J. Manufact. Science and Eng. – 1998. - Vol. 120. – P. 684-691.
11. Ozturk, E. Modeling of 5-axis milling forces / E. Ozturk, E. Budak // Proceedings of the 8th CIRP International Workshop Model Machining Operations. - Chemnitz, Germany, 2005. – P. 319-332.

*Статья поступила в редакцию 7.03.19
Рецензент: д.т.н., профессор Тихоокеанского
государственного университета
Давыдов В.М.
Статья принята к публикации 23. 04. 19.*

Сведения об авторах:

Пономарев Борис Борисович, д.т.н., профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств» Иркутского национального исследовательского технического университета, e-mail: pusw@istu.edu.

Ponomarev Boris Borisovich, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. "Technology and Equipment of Engineering Enterpriss", Irkutsk National Research Technical University, e-mail: pusw@istu.edu.

Нгуен Ши Хьен, аспирант Иркутского национального исследовательского технического университета, e-mail: syhiendk35@gmail.com.

Nguen Shee Hien, Post graduate student, Irkutsk National Research Technical University, e-mail: syhiendk35@gmail.com.