

УДК 621.91.01

doi: 10.18698/0536-1044-2023-6-47-57

Измерение сил резания в процессе механической обработки керамических деталей авиационного назначения

И.Ю. Тимохин^{1,2}, А.А. Анашкина², Г.А. Харахонов², Я.О. Ермолаев²

¹ ИАТЭ НИЯУ МИФИ

² АО «ОНИП «Технология» им. А.Г. Ромашина»

Cutting force measurement during machining of the ceramic parts designed for aviation purposes

I.Yu. Timokhin^{1,2}, A.A. Anashkina², G.A. Kharakhonov², Ya.O. Ermolaev²

¹ OINPE NRNU MEFPI

² ORPE Technologiya named after A.G. Romashin JSC

Сила резания является важным параметром для контроля и управления процессами обработки. Разработана, сконструирована и опробована система измерения и регистрации сил резания в процессе механической обработки сложнопрофильных керамических деталей авиационного назначения, которая позволяет проводить измерения с привязкой к высоте обрабатываемого участка (к координате Z) на существующей системе числового программного управления. В качестве датчиков деформации выбраны тензорезисторы КФ5П1-5-200 с полномостовой схемой подключения. Проведена оценка деформации корпуса шлифовального шпинделя специального станка с числовым программным управлением СА950С30Ф4К.01 под действием радиальной составляющей силы резания, и определена зона максимальных напряжений, где были установлены тензорезисторы. Выполнено тарирование системы по измерению сил резания с помощью разработанного силового каркаса и эталонного динамометра. Создано программное обеспечение, позволяющее записывать и анализировать полученные данные, а также визуализировать процесс измерения сил резания в реальном времени при механической обработке керамических деталей. По результатам опробования разработанных системы и программного обеспечения установлена возможность измерения сил резания в процессе механической обработки сложнопрофильных керамических деталей, визуализации, записи и вывода на печать результатов. Такую систему можно использовать в научно-исследовательских лабораториях и опытных производствах при механической обработке керамических деталей.

Ключевые слова: измерение сил резания, тензорезисторы КФ5П1-5-200, деформация корпуса шпинделя, тарирование системы

The cutting force is an important parameter in control and management of the machining processes. A system for measuring and registering the cutting forces in the process of machining the complex profile ceramic parts for aviation purposes was designed, developed and tested making it possible to measure with reference to the machined area height (to the Z coordinate) on the existing numerical control system. KF5P1-5-200 strain gauges with a full-bridge connection scheme were selected as the deformation sensors. Deformation of the grinding spindle body of a special machine with the SA950S30F4K.01 numerical control exposed to action of the cutting force radial component was assessed, and the zone of maxi-

imum stresses was determined, where the strain gauges were installed. The system was calibrated to measure the cutting forces using the developed power frame and the reference dynamometer. Software was created that makes it possible to register and analyze the data obtained, as well as to visualize the process of measuring the cutting forces in real time during the ceramic parts machining. Based on the results of testing the developed system and software, the possibility was established to measure the cutting forces during machining the complex profile ceramic parts, to visualize, register and print the results. Such a system could be used in the scientific research laboratories and pilot production in the ceramic parts machining.

Keywords: cutting forces measurement, KF5P1-5-200 strain gauge, spindle body deformation, system calibration

Помимо разработки и применения новых материалов важным аспектом развития современного машиностроения является их обрабатываемость. Все чаще уникальные свойства керамики используют в военной и ракетно-космической технике. Но обеспечение высокого качества поверхности наряду с высокой точностью исполнения керамической детали — сложная техническая задача [1]. Для усовершенствования существующих и разработки новых способов механической обработки керамических деталей необходимо изучить закономерности процесса обработки.

Основным видом обработки деталей из керамических материалов является шлифование. Как известно, для шлифования керамических деталей применяют алмазные шлифовальные круги различной геометрии, марки, концентрации и зернистости шлифовального порошка.

В процессе шлифования керамических деталей помимо снятия материала изменяются геометрические характеристики режущей кромки алмазного инструмента и, следовательно, площадь контакта между ним и обрабатываемой поверхностью, что приводит к изменению составляющих силы резания и повышению температуры в зоне резания. Все эти факторы негативно сказываются как на качестве обрабатываемых поверхностей, так и на конечных геометрических характеристиках полученной детали.

Важной составляющей изучения закономерностей процесса круглого шлифования сложнопрофильных керамических деталей является непрерывный контроль составляющих силы резания. Зная их, легко определить не только оптимальные режимы резания, стойкость алмазного круга и частоту правки инструмента, но и предупредить аварийные ситуации с выходом из строя дорогостоящего шлифовального оборудования.

Системы для измерения составляющих силы резания можно подразделить на использующие косвенные и прямые методы измерений. Прямые методы измерения, базирующиеся на магнитных, электрических и оптических преобразованиях [2–8], являются наиболее точными и простыми в реализации.

В работе [9] приведены основные конструкции и приспособления для измерения составляющих силы резания, основанные на различных физических принципах, проведен их сравнительный анализ. Для измерения составляющих силы резания используют различные виды датчиков: динамометрические, емкостные, тензорезисторы и др.

В настоящее время часто применяют дорогостоящие иностранные системы с динамометрическими устройствами [10–12] и тензорезисторами [13] или же системы, использующие решения, разработанные более 40 лет назад. Так, авторы статьи [14] для регистрации и оценки сил резания в процессе механической обработки разработали модернизированную систему на базе динамометров, соответствующую заявленным требованиям по технико-экономическим показателям точности и стоимости.

В работе [15] исследовано влияние составляющих сил резания при плоском шлифовании ситаллокерамики с помощью разработанной тензометрической установки. Но зачастую коммерческие системы по измерению составляющих сил резания довольно дорогие и пригодны лишь для конкретных конструкций обрабатываемых станков, а некоторые из них и вовсе устарели.

Поэтому возникла необходимость разработки недорогой альтернативы существующим измерительным системам регистрации составляющих силы резания в процессе круглого шлифования на специальном станке с числовым

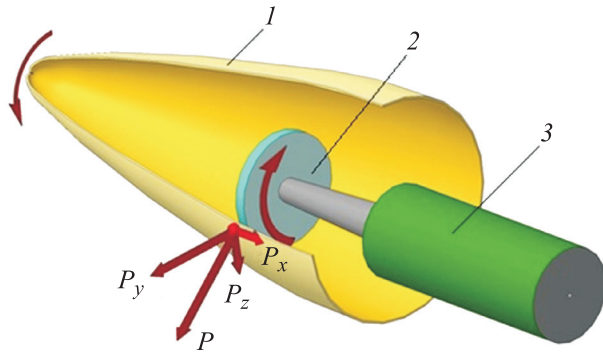


Рис. 1. Схема силового взаимодействия элементов, участвующих в процессе шлифования керамических деталей:
1 — керамическая заготовка; 2 — шпиндель;
3 — алмазный шлифовальный круг

программным управлением (ЧПУ) высокой точности.

Помимо создания системы регистрации составляющих силы резания необходимо понимать действия составляющих сил резания в процессе шлифования. Как правило, для процессов внутреннего шлифования деталей алмазным кругом тангенциальную составляющую силы резания P_z рассчитывают как векторную сумму сил резания, возникающих на отдельном зерне [16–18].

На схеме силового взаимодействия элементов, участвующих в процессе внутреннего шлифования сложнопрофильных керамических деталей авиационного назначения (рис. 1), показаны три составляющие силы резания P : тангенциальная P_z , радиальная P_y и осевая P_x .

Особенности состояния современных знаний указывают на необходимость определения составляющих силы резания. Очевидно, что требуется система регистрации составляющих силы резания в процессе продольного перемещения режущего инструмента по длине участка внутренней поверхности керамической детали с привязкой к координатам Z и Y .

Цель исследования — разработка системы измерения и регистрации радиальной составляющей силы резания P_y в процессе механической обработки сложнопрофильных керамических деталей авиационного назначения.

При разработке системы измерения тангенциальной P_z и радиальной P_y составляющих силы резания решали следующие задачи:

- измерение радиальной составляющей силы резания в процессе продольного перемещения шлифовального инструмента по длине участка внутренней поверхности детали с привязкой к

высоте обрабатываемого участка с использованием существующей системы ЧПУ;

- накопление результатов измерения в виде базы данных по идентификационным признакам (дате, условному обозначению и технологическому номеру детали, материалу заготовки, типу режущего инструмента) и режимам обработки (продольной подаче, глубине резания, частотам вращения алмазного инструмента и детали);

- визуализация и вывод результатов измерений.

Для реализации системы измерения радиальной составляющей силы резания P_y в процессе механической обработки сложнопрофильных керамических деталей выбран специальный станок с ЧПУ СА950С30Ф4К.01 и керамическая сложнопрофильная заготовка с габаритными размерами (длина×внутренний диаметр) 700×200 мм.

Механическую обработку внутренней поверхности заготовки проводили поочередно тремя разными алмазными инструментами, установленными в высокоскоростной электрошпиндель [19].

Для определения составляющих силы резания использовали метод тензометрирования. В качестве датчиков деформации выступали тензорезисторы КФ5П1-5-200 со средней чувствительностью $K_T = 2,11$. Тензорезисторы устанавливали, закрепляли и герметизировали на корпусе шпинделя.

Схема расположения тензорезисторов на корпусе шпинделя приведена на рис. 2. Для увеличения коэффициента тензочувствитель-

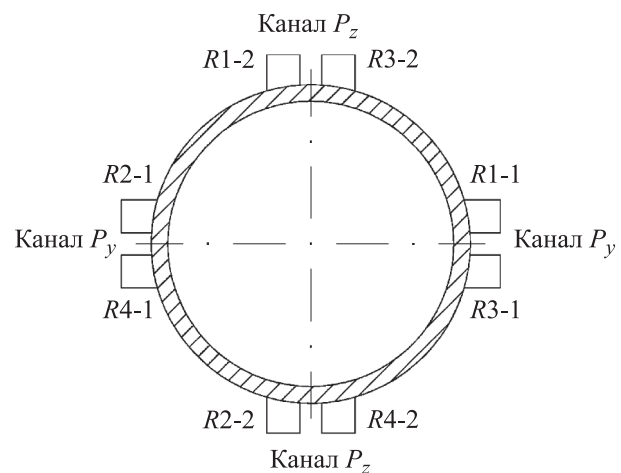


Рис. 2. Схема расположения тензорезисторов на корпусе шпинделя

ности в 4 раза относительно коэффициента тензорезистора и для уменьшения влияния температуры на стабильность измерения выбрана полномостовая схема подключения тензорезисторов.

Пары тензорезисторов R1-1, R3-1 и R2-1, R4-1 для измерения составляющей силы резания P_y и R1-2, R3-2 и R2-2, R4-2 для измерения P_z наклеивали на противоположных сторонах корпуса привода каждой из осей Y и Z и собирали в полный измерительный мост.

Затем проводили монтаж и наладку аппаратной части системы, структурная схема которой приведена на рис. 3. Все комплектующие и измерительные блоки размещали в боксе размером 300×400 мм

Как показано на рис. 3, сигналы с тензорезисторов поступают на входы модуля ввода сигналов тензорезисторов MB110-4Т. Для синхронизации процесса регистрации информации с сигналами ЧПУ использован модуль дискретного ввода-вывода МК 110-224.8Д.4Р. Программа ЧПУ в нужный момент устанавливает единичное значение определенного дискретного входа модуля МК 110-224.8Д.4Р.

Состояние этого входа непрерывно анализирует программа персонального компьютера (ПК). В случае единичного состояния входа происходит считывание сигнала тензорезистора и его регистрация. Для уменьшения влияния

помех от сети питания использован сетевой фильтр БСФ-ДЗ-1.2, а для накопления базы данных, регистрации и визуализации полученных измерений — ПК.

Оценка деформации корпуса шлифовального шпинделя под действием радиальной составляющей силы резания P_y . Вследствие конструктивной особенности привода режущего инструмента станка с ЧПУ для обработки керамических сложнопрофильных заготовок авиационного назначения, заключающейся в наличии защитного полого цилиндрического корпуса вала привода, жестко закрепленного с одного конца около шпинделя на суппорте станка, а с другого через подшипник вращения опирающегося на вал привода в процессе шлифования, из-за изгиба вала в защитном корпусе возникают деформации, соответствующие консольному приложению нагрузки.

Эти деформации можно разложить на горизонтальную и вертикальную составляющие, характеризующие деформациями изгиба по образующей защитного корпуса, предположив, что их наибольшие значения находятся в зоне жесткого крепления. Для проверки этого утверждения и получения оценочных значений деформаций выполнен расчет напряженно-деформированного состояния корпуса шлифовального шпинделя с приложением силы по оси Y, равной 250 Н.

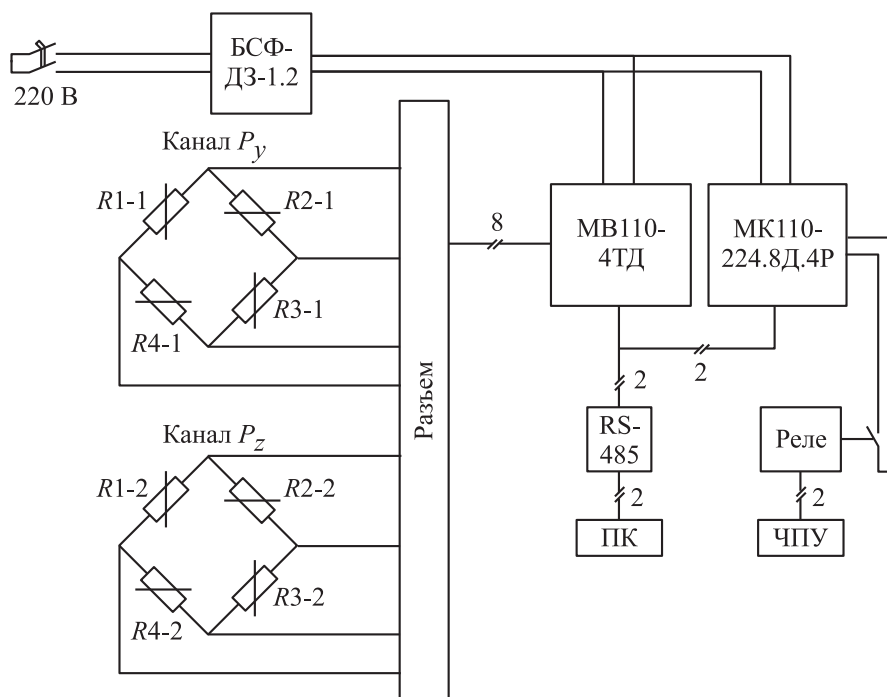


Рис. 3. Структурная схема системы регистрации составляющих силы резания

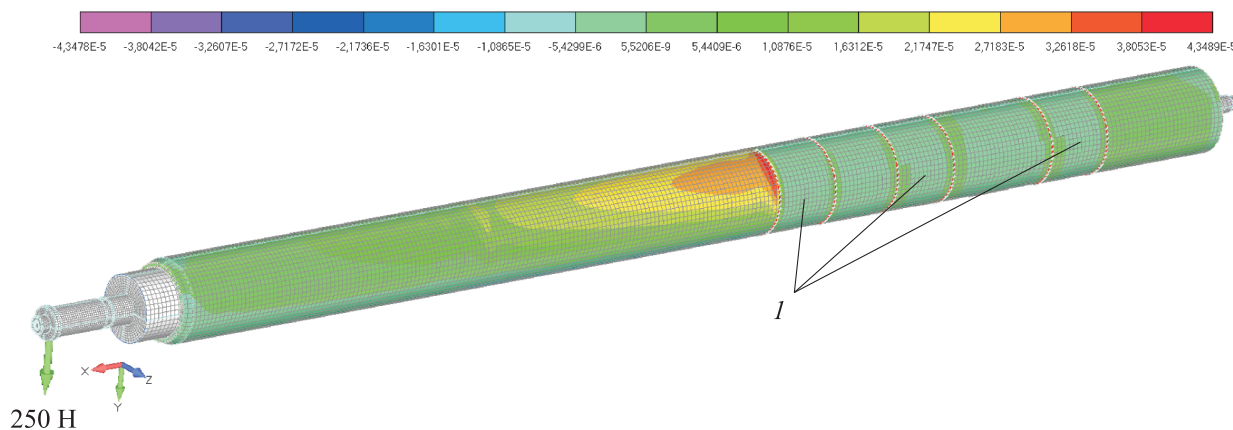


Рис. 4. Распределение деформаций в корпусе шпинделя станка (I — узлы крепления)

Анализ расчетных данных показал (рис. 4), что максимальные деформации исследуемой конструкции возникают в месте крепления корпуса шлифовальной головки к суппорту станка и не превышают в радиальном направлении в зоне сжатия $\epsilon_{сж} = 4,35 \cdot 10^{-5}$ (0,00435 %).

По результатам расчетов принято решение установить тензорезисторы в зоне максимальных напряжений — на расстоянии 10 мм от места крепления корпуса шлифовальной головки к суппорту станка.

В качестве методики оценки погрешности системы использован подход, изложенный в работе [20]. Схема экспериментальной установки для оценки погрешности системы измерения составляющих силы резания и дальнейшего тарирования, включающая в себя эталонный динамометр Extech 475044, тензорезисторы и модуль ввода их сигналов MB110-4ТД, приведена на рис. 5.

Таким образом, относительную погрешность системы измерения составляющих силы реза-

ния можно представить как сумму относительных погрешностей ее звеньев:

$$\delta_c = \delta_d + \delta_t + \delta_m,$$

где δ_d , δ_t и δ_m — погрешность динамометра, тензорезисторов и модуля ввода сигналов MB110-4ТД соответственно.

С учетом базовых погрешностей относительная погрешность системы

$$\delta_c = 0,5 + 0,05 + 0,05 = 0,6 \text{ \%}.$$

Расчет относительной погрешности системы измерения составляющих силы резания показал высокую точность и возможность ее применения.

После установки, закрепления, герметизации и подключения тензорезисторов к аппаратной части проведено тарирование системы измерения составляющих силы резания.

На направляющие станка с ЧПУ устанавливали разработанный силовой каркас, на кото-

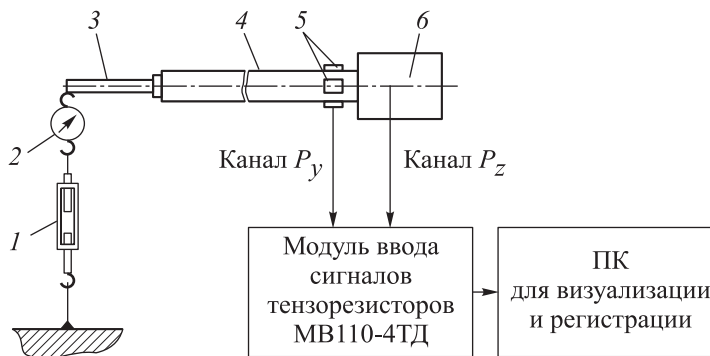


Рис. 5. Схема экспериментальной установки для оценки погрешности системы измерения составляющих силы резания и дальнейшего тарирования:

- 1 — талреп; 2 — эталонный динамометр Extech 475044; 3 — оправка; 4 — шпиндель;
- 5 — тензорезисторы; 6 — каретка суппорта станка CA950

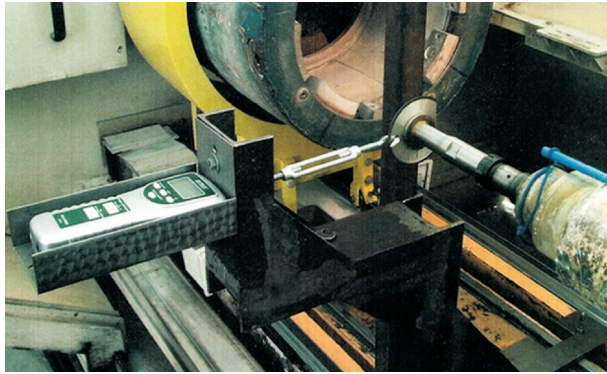


Рис. 6. Внешний вид устройства для тарирования каналов P_y и P_z

ром закрепляли эталонный динамометр, связанный с оправкой посредством талрепа, как показано на рис. 6. С помощью талрепа задавали нагрузку в диапазоне $0 \dots 200$ Н. Тарирование системы проводили путем циклического нагружения через равные промежутки, фиксируя значения нагружения по цифровому динамометру Extech 475044.

Проведенная тарировка позволила определить зависимость между задаваемой нагрузкой на привод узла резания и выходным сигналом измерительного комплекса.

Средние значения статистических параметров, полученные после тарирования каналов P_y и P_z , приведены в табл. 1, где U_y и U_z — показания тензодатчиков.

Из табл. 1 следует, что тарировочное отношение можно довольно точно описать линейной функцией во всем диапазоне измерения

Таблица 1

Средние значения статистических параметров

P_y , Н	U_y , мВ	P_z , Н	U_z , мВ
199,6/200,1	0,5237	201,1/200,8	0,5231
150,5/150,9	0,5082	150,8/150,2	0,4554
100,6/100,8	0,4928	100,4/99,8	0,4410
50,5/51,0	0,4762	50,8/47,0	0,4251
0,6/0,9	0,4615	0,7/-0,4	0,4075
50,5/50,5	0,4772	50,6/49,5	0,4263
100,3/100,5	0,4927	100,8/99,8	0,4423
150,4/150,8	0,5082	151,2/150,2	0,4570
200,4/201,0	0,5238	201,1/200,3	0,4730

Примечание. В числителе дроби указаны показания динамометра, в знаменателе — тензодатчиков.

силы резания, при этом линии нагрузки и разгрузки системы совпадают.

Помимо аппаратной части системы измерения и регистрации составляющих силы резания разработано программное обеспечение (ПО) для получения и обработки информации с тензорезисторов, позволяющее фиксировать реальное положение оси Z станка в процессе измерения составляющих силы резания P_y и P_z . Фиксация значения положения оси начинается с момента старта управляющей программы.

Кроме того, разработана и протестирована функция для добавления (редактирования) шлифовального инструмента при механической обработке (рис. 7). Эта функция позволяет

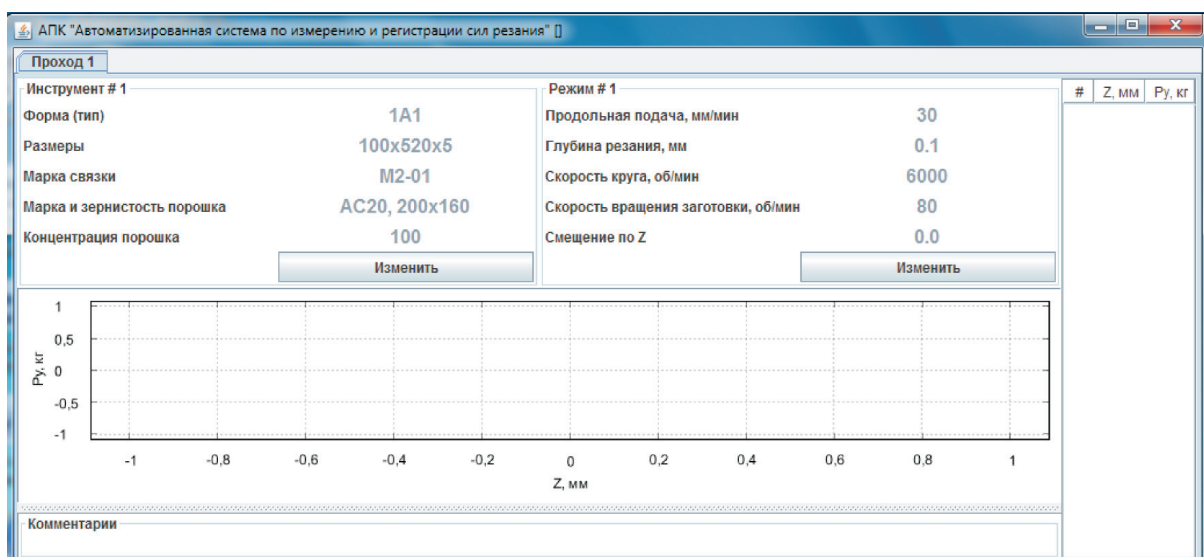


Рис. 7. Окно ПО «Выбор параметров шлифовального инструмента и режимов обработки»

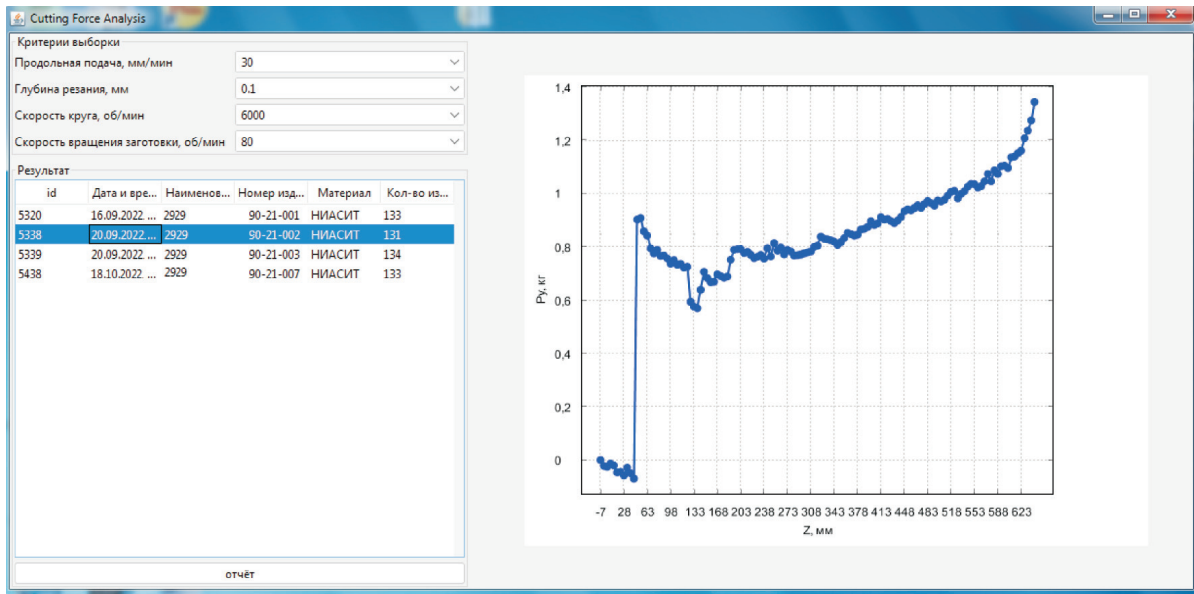


Рис. 8. Окно ПО «База данных по измерению составляющей силы резания»

Таблица 2

Режимы механической обработки

Параметр	Значение
Глубина резания, мм	1
Подача круга, мм/мин	30
Частота вращения заготовки, мин ⁻¹	80
Частота вращения круга, мин ⁻¹	6000

изменять тип и марку связки шлифовального инструмента, марку, концентрацию и зернистость алмазного порошка.

Для добавления, хранения и обработки полученной информации создана база данных

(рис. 8). Протестированы механизмы работы с данными (запись, удаление, чтение для построения и сравнения графиков).

На каждом проходе алмазного инструмента автоматически формируется электронная таб-

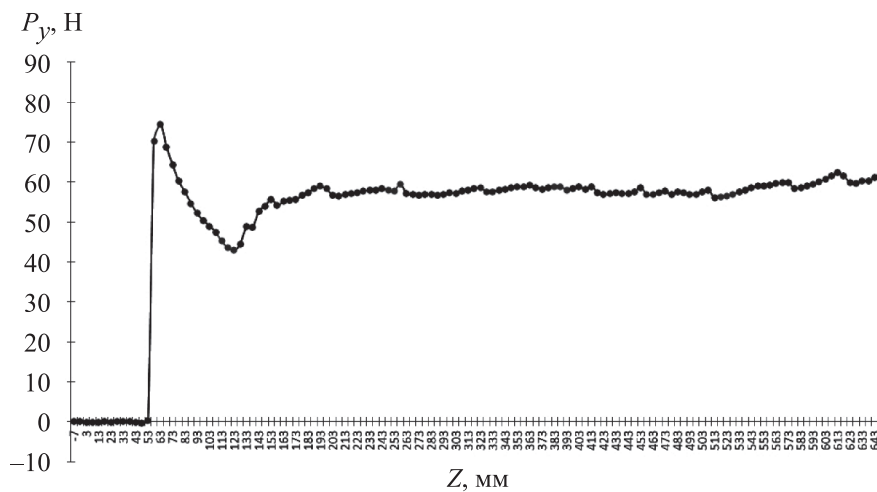


Рис. 9. Зависимость радиальной составляющей силы резания F_y от координаты Z

лица и запоминается в базе данных. На основе полученных данных, зафиксированных в таблице, строятся графики, которые впоследствии анализируются и сравниваются.

После проведенной тарировки система измерения сил резания опробована при механической обработке внутренней поверхности керамической сложнопрофильной заготовки с выбранными габаритными размерами.

Обработку внутренней поверхности заготовки проводили алмазным шлифовальным кругом 1A1 100×6×20×5 AC65 315/250 100 M2-01 по управляющей программе на специальном станке с ЧПУ СА950С30Ф4К.01 с направлением подачи от торца заготовки к носку на режимах, указанных в табл. 2.

По окончании механической обработки получена зависимость измеренной радиальной составляющей силы резания P_y от координаты Z (рис. 9).

Как видно из рис. 9, шлифование начинается с координаты $Z = 60$ мм (алмазный круг врезается в заготовку), при этом радиальная составляющая силы резания резко возрастает, достигая $P_y = 74$ Н, далее она перестает расти и в среднем составляет 52 Н. Разброс значений радиальной составляющей силы резания возникающей при обработке внутренней поверхности детали, варьируется в диапазоне $P_y = 43...74$ Н.

На основании полученных результатов можно заключить, что разработанная система позволяет регистрировать и измерять радиальную P_y и тангенциальную P_z составляющие силы резания при механической обработке внут-

ренней поверхности сложнопрофильных керамических деталей.

Выводы

1. Для измерения и регистрации радиальной и тангенциальной составляющих силы резания в процессе механической обработки внутренней поверхности сложнопрофильных керамических деталей авиационного назначения предложена низкобюджетная система, позволяющая проводить измерения с привязкой к высоте обрабатываемого участка (координате Z) с использованием существующей системы ЧПУ.

2. Для добавления, хранения и обработки информации разработана база данных, протестированы механизмы работы с данными (запись, удаление, чтение для построения графиков и отчетов).

3. Разработано ПО, обеспечивающее обработку информации о радиальной и тангенциальной составляющих силы резания в реальном времени и визуализацию на экране монитора в виде графиков и таблиц.

4. Предложенная система регистрации и измерения составляющих сил резания прошла апробацию на опытном производстве АО «ОНПП «Технология им. А.Г. Ромашина», подтвердив работоспособность. В дальнейшем запланированы отладка и накопление полученных данных с помощью системы для оптимального выбора шлифовального инструмента, режимов резания, а также анализ влияния составляющих силы резания на качество обработанной поверхности.

Литература

- [1] Душко О.В. Пути снижения толщины дефектного слоя на поверхности высокотвердых керамических материалов. *Вестник ВолгГАСУ. Сер. Строительство и архитектура*, 2011, № 25, с. 163–170.
- [2] Liang Q., Zhang D., Wu W. et al. Methods and research for multi-component cutting force sensing devices and approaches in machining. *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 11, art. 1926. URL: <https://doi.org/10.3390/s16111926>
- [3] Jin W.L., Venuvinod P.K., Wang X. An optical fibre sensor based cutting force measuring device. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 1995, vol. 35, no. 6, pp. 877–883. URL: [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(94\)E0025-E](https://doi.org/10.1016/0890-6955(94)E0025-E)
- [4] Liang Q., Zhang D., Ge Y. et al. A novel miniature four-dimensional force/torque sensor with overload protection mechanism. *IEEE Sens. J.*, 2009, vol. 9, no. 12, pp. 1741–1747. URL: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2009.2030975>
- [5] Liang Q., Zhang D., Coppola G. et al. Multi-dimensional mems/micro sensor for force and moment sensing: a review. *IEEE Sens. J.*, 2014, 14, pp. 2643–2657. URL: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2313860>

- [6] Park S.S. *High frequency bandwidth cutting force measurements in milling using the spindle integrated force sensor system*. Ph.D. Thesis. University of British Columbia, 2003.
- [7] Jantunen E. A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2002, vol. 42, no. 9, pp. 997–1010. URL: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00040-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00040-8)
- [8] Bayo E., Stubbe J.R. Six-axis force sensor evaluation and a new type of optimal frame truss design for robotic applications. *J. Robot. Syst.*, 1989, vol. 6, no. 2, pp. 191–208. URL: <https://doi.org/10.1002/rob.4620060206>
- [9] Svinin M.M., Uchiyama M. Optimal geometric structures of force/torque sensors. *Int. J. Robot. Res.*, 1995, vol. 14, no. 6, pp. 560–573. URL: <https://doi.org/10.1177/027836499501400603>
- [10] Полетика М.Ф. *Приборы для измерения сил резания и крутящих моментов*. Москва, Машгиз, 1963. 108 с.
- [11] Gomez M.F., Schmitz T.L. Displacement-based dynamometer for milling force measurement. *Procedia Manuf.*, 2019, vol. 34, pp. 867–875. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.161>
- [12] Sandwell A., Park C., Park S. Development of multi-degrees of freedom optical table dynamometer. *Procedia Manuf.*, 2016, vol. 5, pp. 75–89. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.009>
- [13] Transchel R., Stirnimann J., Blattner M. et al. Effective dynamometer for measuring high dynamic process force signals in micro machining operations. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1, pp. 558–562. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.099>
- [14] Zhao Y., Zhao Y., Wang C. et al. Design and development of a cutting force sensor based on semi-conductive strain gauge. *Sens. Actuators A Phys.*, 2016, vol. 237, pp. 119–127. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.11.017>
- [15] Суздальцев Е.И., Эпов А.Г., Хамицаев А.С. и др. Исследование влияния режимов механической обработки ситаллокерамических изделий в системе: станок — изделие — инструмент — схема. *Огнеупоры и техническая керамика*, 2003, № 7, с. 23–31.
- [16] Самойлов В.Б. Модернизация системы для измерения сил резания на базе динамометров серии УДМ. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 5, с. 91–103, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2019-5-91-103>
- [17] Rowe W.B. *Principles of modern grinding technology*. Elsevier, 2009. 480 p.
- [18] Klocke F. *Manufacturing processes 2*. Springer, 2009. 433 p.
- [19] Суздальцев Е.И., Харитонов Д.В., Харахонов Г.А. и др. Перспективы повышения производительности механической обработки крупногабаритных керамических изделий радиотехнического назначения. *Новые огнеупоры*, 2011, № 12, с. 17–24.
- [20] Павлов И.О., Ушаков М.В., Воробьев И.А. Система для измерения сил резания. Компонировка, тарирование и оценка погрешности. *Известия ТулГУ, Технические науки*, 2013, № 10, с. 159–168.

References

- [1] Dushko O.V. Reduction methods of defective layer depth on highly rigid ceramic materials surface. *Vestnik VolgGASU. Ser. Stroitelstvo i arkhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Ser. Construction and Architecture], 2011, no. 25, pp. 163–170. (In Russ.).
- [2] Liang Q., Zhang D., Wu W. et al. Methods and research for multi-component cutting force sensing devices and approaches in machining. *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 11, art. 1926. URL: <https://doi.org/10.3390/s16111926>
- [3] Jin W.L., Venuvinod P.K., Wang X. An optical fibre sensor based cutting force measuring device. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 1995, vol. 35, no. 6, pp. 877–883. URL: [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(94\)E0025-E](https://doi.org/10.1016/0890-6955(94)E0025-E)
- [4] Liang Q., Zhang D., Ge Y. et al. A novel miniature four-dimensional force/torque sensor with overload protection mechanism. *IEEE Sens. J.*, 2009, vol. 9, no. 12, pp. 1741–1747. URL: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2009.2030975>

- [5] Liang Q., Zhang D., Coppola G. et al. Multi-dimensional mems/micro sensor for force and moment sensing: a review. *IEEE Sens. J.*, 2014, 14, pp. 2643–2657. URL: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2313860>
- [6] Park S.S. *High frequency bandwidth cutting force measurements in milling using the spindle integrated force sensor system*. Ph.D. Thesis. University of British Columbia, 2003.
- [7] Jantunen E. A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2002, vol. 42, no. 9, pp. 997–1010. URL: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00040-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00040-8)
- [8] Bayo E., Stubbe J.R. Six-axis force sensor evaluation and a new type of optimal frame truss design for robotic applications. *J. Robot. Syst.*, 1989, vol. 6, no. 2, pp. 191–208. URL: <https://doi.org/10.1002/rob.4620060206>
- [9] Svinin M.M., Uchiyama M. Optimal geometric structures of force/torque sensors. *Int. J. Robot. Res.*, 1995, vol. 14, no. 6, pp. 560–573. URL: <https://doi.org/10.1177/027836499501400603>
- [10] Poletika M.F. *Pribory dlya izmereniya sil rezaniya i krutyashchikh momentov* [Devices for measuring cutting forces and torques]. Moscow, Mashgiz Publ., 1963. 108 p. (In Russ.).
- [11] Gomez M.F., Schmitz T.L. Displacement-based dynamometer for milling force measurement. *Procedia Manuf.*, 2019, vol. 34, pp. 867–875. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.161>
- [12] Sandwell A., Park C., Park S. Development of multi-degrees of freedom optical table dynamometer. *Procedia Manuf.*, 2016, vol. 5, pp. 75–89. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.009>
- [13] Transchel R., Stirnimann J., Blattner M. et al. Effective dynamometer for measuring high dynamic process force signals in micro machining operations. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1, pp. 558–562. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.099>
- [14] Zhao Y., Zhao Y., Wang C. et al. Design and development of a cutting force sensor based on semi-conductive strain gauge. *Sens. Actuators A Phys.*, 2016, vol. 237, pp. 119–127. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.11.017>
- [15] Suzdaltsev E.I., Epov A.G., Khamitsaev A.S. et al. Regimes of mechanical grinding of pyroceramic components in the system machine — workpiece — tool — scheme. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2003, no. 7, pp. 23–31. (In Russ.). (Eng. version: *Refract. Ind. Ceram.*, 2004, vol. 45, no. 1, pp. 10–15, doi: <https://doi.org/10.1023/B:REFR.0000023344.98082.2d>)
- [16] Samoylov V.B. Modernization of the system for measuring cutting forces on the basis of UDM dynamometer series. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2019, no. 5, pp. 91–103, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2019-5-91-103> (in Russ.).
- [17] Rowe W.B. *Principles of modern grinding technology*. Elsevier, 2009. 480 p.
- [18] Klocke F. *Manufacturing processes 2*. Springer, 2009. 433 p.
- [19] Suzdaltsev E.I., Kharitonov D.V., Kharakhonov G.A. et al. Prospects for improving machining productivity of large ceramic objects for radio engineering purposes. *Novye ogneupory*, 2011, no. 12, pp. 17–24. (In Russ.). (Russ. ed.: *Refract. Ind. Ceram.*, 2012, vol. 52, no. 6, pp. 424–430, doi: <https://doi.org/10.1007/s11148-012-9442-1>)
- [20] Pavlov I.O., Ushakov M.V., Vorobyev I.A. System for measurement of cutting forces line-up, taring and evaluation of the accuracy. *Izvestiya TulGu. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula state university. Technical sciences], 2013, no. 10, pp. 159–168. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 29.12.2022

Информация об авторах

ТИМОХИН Илья Юрьевич — аспирант. ИАТЭ НИЯУ МИФИ; инженер-технолог второй категории. АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: ilyatim1990@yandex.ru).

АНАШКИНА Антонина Александровна — кандидат технических наук, начальник лаборатории. АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: antoninaanasktna1904@gmail.com).

ХАРАХОНОВ Геннадий Анатольевич — ведущий инженер-технолог. АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: g.kharahonov@yandex.ru).

ЕРМОЛАЕВ Ярослав Олегович — инженер-технолог второй категории. АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15 e-mail: 261233670i@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Тимохин И.Ю., Анашкина А.А., Харахонов Г.А., Ермолаев Я.О. Измерение сил резания в процессе механической обработки керамических деталей авиационного назначения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 6, с. 47–57, doi: 10.18698/0536-1044-2023-6-47-57

Please cite this article in English as:

Timokhin I.Yu., Anashkina A.A., Kharakhonov G.A., Ermolaev Ya.O. Cutting force measurement during machining of the ceramic parts designed for aviation purposes. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 6, pp. 47–57, doi: 10.18698/0536-1044-2023-6-47-57

Information about the authors

ТИМОХИН Илья Yurievich — Postgraduate. OINPE NRNU MEPhI; Manufacturing Engineer of the 2nd Category. ORPE Technologiya named after A.G. Romashin JSC (249031, Obninsk, Russian Federation, Kievskoe Shosse, Bldg. 15, e-mail: ilyatim1990@yandex.ru).

ANASHKINA Antonina Aleksandrovna — Candidate of Science (Eng.), Head of Laboratory. ORPE Technologiya named after A.G. Romashin JSC (249031, Obninsk, Russian Federation, Kievskoe Shosse, Bldg. 15, e-mail: antoninaanasktna1904@gmail.com).

KHARAHONOV Gennadiy Anatolievich — Leading Manufacturing Engineer. ORPE Technologiya named after A.G. Romashin JSC (249031, Obninsk, Russian Federation, Kievskoe Shosse, Bldg. 15, e-mail: g.kharahonov@yandex.ru).

ERMOLAEV Yaroslav Olegovich — Manufacturing Engineer of the 2nd Category. ORPE Technologiya named after A.G. Romashin JSC (249031, Obninsk, Russian Federation, Kievskoe Shosse, Bldg. 15, e-mail: 261233670i@gmail.com).