



Научная статья
УДК 621.9.08
<https://elibrary.ru/qgfkdb>
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-263-283>

Динамометрический расточной резец

В.М. Свинин^{1✉}, В.А. Ушаков², А.Г. Тихонов³,
А.С. Пятых⁴, Р.В. Кононенко⁵, А.Е. Родыгина⁶

¹⁻⁶Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель – разработка, изготовление и испытание несложного по конструкции динамометра для исследования динамики процесса резания при растачивании и точении. Объектом исследований был выбран сборный правый расточной резец S20R-SSSCR09. Для регистрации силы резания и виброперемещений вершины резца в тангенциальном и радиальном направлениях на него были наклеены по полумостовой схеме четыре тензорезистора КФ5П1-10-400-А-12. Измерение изгибной жесткости резца в двух направлениях выполнили с помощью образцового динамометра сжатия ДОУ-3-01 и индикатора часового типа DDP-10А. Собственную частоту резца определили по виброграмме затухающих изгибных колебаний. Испытание динамометрического резца в работе проводили при точении на станке DMG NEF 400 заготовки из стали 20Х диаметром 79 мм с вылетом 200 мм при частоте вращения шпинделя 600 об/мин, глубине резания 0,8 мм и продольной подаче 0,103 мм/об. На основании проведенного аналитического обзора современных конструкций токарных динамометров установлено, что при растачивании наиболее простым и компактным техническим решением является тензометрирование инструмента. Изгибная жесткость резца в тангенциальном и радиальном направлениях составила, соответственно, 0,6 и 1,058 Н/мкм. Коэффициенты преобразования для перемещений в этих же направлениях имеют следующие значения: 3,5 и 4,2 мкм/В. Установлено, что взаимное влияние регистрации радиальных смещений вершины резца на тангенциальные составляет 7,7%, а тангенциальных на радиальные – 2,8%. Виброграммы показали, что процесс точения с принятыми условиями обработки сопровождается отчетливыми автоколебаниями резца с частотой 561 Гц. Таким образом, тензометрирование инструмента позволяет в одном сигнале получать информацию в виде виброграмм о двух важнейших параметрах динамики процесса резания: силе и виброперемещениях. Основными достоинствами динамометрического резца являются простота конструкции, возможность изготовления в лабораторных условиях, невысокая стоимость и нечувствительность к изменению температуры и осевой силы подачи.

Ключевые слова: динамометр для измерения силы резания, расточной резец, тензометрия, электронный блок формирования сигнала, тарирование резца, виброграммы

Финансирование: Представленная в данной статье работа реализуется в рамках стратегического проекта ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» i.DIT – Байкальский центр цифровых производственных технологий (Программа «Приоритет 2030»).

Для цитирования: Свинин В.М., Ушаков В.А., Тихонов А.Г., Пятых А.С., Кононенко Р.В., Родыгина А.Е. Динамометрический расточной резец // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 263–283. EDN: QGFKDB, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-263-283>.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Dynamometric cutting tool

Valeriy M. Svinin^{1✉}, Vladislav A. Ushakov², Aleksandr G. Tikhonov³,
Aleksey S. Pyatykh⁴, Roman V. Kononenko⁵, Albina E. Rodygina⁶

¹⁻⁶Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

© Свинин В.М., Ушаков В.А., Тихонов А.Г., Пятых А.С., Кононенко Р.В., Родыгина А.Е., 2023

<https://ipolytech.ru>

263

Abstract. The aim was to develop, manufacture and test a technically simple dynamometer for monitoring the cutting process during boring and turning. An S20R-SSSCR09 right-hand cutter was selected as a research object. To register the cutting force and vibration movements of the cutter tip in tangential and radial directions, the cutter was equipped with four KF5P1-10-400-A-12 strain gauges mounted according to a half-bridge scheme. The bending stiffness of the cutter in two directions was measured by a DOU-3-01 compression dynamometer and a DDP-10A dial indicator. The cutter natural frequency was determined by a vibrogram of damped bending vibrations. The dynamometric boring tool was tested on a DMG NEF 400 turning machine by turning a workpiece made of 20X steel, 79 mm in diameter with a 200 mm extension, at a spindle rotational frequency of 600 r/min, a cutting depth of 0.8 mm and a longitudinal feed of 0.103 mm/turn. According to the conducted review of modern turning dynamometers and their designs, strain gauging of cutting tools is the simplest technical solution when carrying out boring procedures. The bending stiffness of the cutter in tangential and radial directions comprised 0.6 and 1.058 N/ μm , respectively. The conversion coefficients for displacements in these directions were 3.5 and 4.2 $\mu\text{m}/\text{V}$, respectively. The mutual influence of registration of radial on tangential and tangential on radial displacements was 7.7% and 2.8%, respectively. The obtained vibrograms showed that the turning process under the given machining conditions is accompanied by distinct auto-oscillations of the cutter with a frequency of 561 Hz. Therefore, strain gauging of cutting tools provides information in the form of vibrograms about the two most important parameters of the cutting process dynamics – force and vibration displacements. The main advantages of the presented dynamometric cutting tool include its design simplicity, possibility of manufacturing in laboratory conditions, low cost and insensitivity to temperature and axial feed force variations.

Keywords: dynamometer for cutting force measurement, boring cutter, tensometry, electronic signal generation unit, tool calibration, vibrograms

Funding: The work presented in this article is implemented within the framework of the strategic project of the Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Irkutsk National Research Technical University» i.DIT – Baikal Center for Digital Production Technologies (Priority 2030 Program).

For citation: Svinin V.M., Ushakov V.A., Tikhonov A.G., Pyatykh A.S., Kononenko R.V., Rodygina A.E. Dynamometric cutting tool. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):263-283. (In Russ.). EDN: QGFKDB, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-263-283>.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальное исследование динамики процессов резания заключается в получении информации об изменении во времени составляющих силы резания и относительных перемещений лезвия инструмента и заготовки по координатным направлениям [1]. Для этого используют различные типы динамометров [2] и датчики вибраций⁷ [3]. Измерение уровня колебаний неподвижных элементов технологической системы чаще всего проводят с помощью пьезоэлектрических акселерометров. При регистрации колебаний вращающихся заготовок и инструментов незаменимы бесконтактные вихретоковые датчики и лазерные виброметры. Если доступ к зоне резания затруднен, то вибрации оценивают вблизи этой зоны по уровню акустической эмиссии, регистрируемой измерительными микрофонами.

Детальный анализ конструкций динамометров, созданных в первой половине прошлого века для измерения составляющих силы и момента резания, приведен в работе

профессора М.Ф. Полетики [2]. Им же определены основные требования к динамометрам: точность измерения, малая инерционность, виброустойчивость, отсутствие взаимного влияния составляющих силы резания, компактность. По принципу действия их разделяют на гидравлические, упругомеханические и упруго-электрические. Последние получили преимущественное распространение в связи с наилучшим соответствием вышеуказанным требованиям.

В отечественных вузах и научно-исследовательских организациях широкое применение нашли универсальные динамометры моделей УДМ-100, УДМ-600 и УДМ-1200, которые изготавливали во Всероссийском научно-исследовательском инструментальном институте в последней четверти прошлого века⁸. Цифры в обозначении модели указывают предельно допустимую величину силы резания в килограммах. Динамометры предназначены для измерения трех составляющих силы резания и крутящего момента при точении, фрезеровании, свер-

⁷Васильев Р.В., Гречинский Д.А., Ключев В.В. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: справочник. В 2-х т., т. 1. М.: Машиностроение, 1978. 448 с.

⁸Руководство к универсальному динамометру УДМ конструкции ВНИИ. М.: ВНИИ, 1983, 22 с.

лении, зенкерования, развертывании и нарезании резьбы метчиком. Их действие основано на преобразовании деформации упругих звеньев в электрический сигнал с помощью проволочных тензорезисторов.

Частота собственных колебаний механической части динамометра УДМ-600 составляет 1350 Гц [4]. Поэтому основным его недостатком является неспособность регистрации без искажения сигналов с частотой более 400 Гц. Кроме того, к настоящему времени они физически и морально устарели: радиолампы и конденсаторы в усилителях выработали свой ресурс, а выходные аналоговые сигналы требуют преобразования в цифровую форму для использования в компьютерах.

С целью продления возможности практического использования этих динамометров проводили работы по их модернизации. В Московском государственном техническом университете (МГТУ) им. Н.Э. Баумана лампы тензоусилитель 4АНЧ22 заменили на современный электронный усилитель напряжения ЛА-УН16, для преобразования сигналов в цифровую форму применили устройство сбора данных NI USB-6009, а вместо светолучевого шлейфного осциллографа – персональный компьютер с программным обеспечением LabVIEW [5]. Подобная же работа выполнена в Тульском государственном университете с использованием усилителя МДУ-8 и аналого-цифрового преобразователя ЛА2-USB [6]. С целью повышения точности измерений и удобства обработки данных, а также удешевления оборудования в МГТУ им. Н.Э. Баумана провели дальнейшую модернизацию измерительного комплекса на базе модуля NI-9237 компании «National Instruments» [7].

Несмотря на то, что проведенная работа качественно улучшила условия эксплуатации динамометра УДМ, не удалось устранить основного его недостатка – низкого порога частоты регистрации динамической составляющей силы резания. При этом частота автоколебаний, сопутствующих процессам механической обработки, может достигать 3000 Гц [8]. Преодоление этого недостатка возможно путем использования пьезокварцевых

пластинок в качестве упругих и силовых чувствительных элементов динамометров. В работе [9] отмечается, что «для измерения быстроизменяющихся сил рациональнее применять пьезоэлектрические датчики, так как они обладают высокой жесткостью, очень малой деформацией при нагружении, высокой резонансной частотой, широким диапазоном измерений, компактностью, большим количеством циклов нагружения, способностью выдерживать значительные перегрузки, высокой повторяемостью и возможностью измерения малых изменений сил при значительной статической составляющей». Примером такого технического решения является однокомпонентный токарный динамометр Dyna-Z, выпускаемый ООО «Технолог» [10]. На этом же принципе основана работа широко известных, но очень дорогих (порядка нескольких миллионов рублей) динамометров швейцарской компании «Kistler», используемых в лабораторных исследованиях.

В последние годы для обеспечения высокой точности и качества обработки деталей машин во всех промышленно развитых странах резко активизировалась работа по созданию интеллектуальных систем управления металлорежущими станками на основе мониторинга процесса резания. Динамометры являются обязательной частью таких систем. Поэтому в дополнение к вышеуказанным требованиям они должны обладать способностью встраиваться в конструкцию станка без ограничения зоны резания. Использование существующих динамометров, например, компании «Kistler», часто приводит к необходимости значительной модификации станков. В этой связи исследователями было разработано много новых компактных и недорогих конструкций динамометров. Ограниченный объем статьи не позволяет детально их рассмотреть. Поэтому далее представлены примеры основных типов технических решений динамометров для токарной обработки.

Доступный по цене и простой по конструкции трехкомпонентный динамометр для чистового и получистового точения предложили бразильские исследователи (рис. 1) [11]. Упругая часть динамометра выполнена

в виде круглой трубы, закрепленной своими концами в вилкообразном держателе, установленном на поперечных салазках токарного станка вместо обычного резцедержателя. На середине упругого элемента поперек к нему расположен держатель инструмента в виде отрезка квадратной трубы. Тензорезисторы, наклеенные на внешней поверхности упругого элемента, регистрируют деформацию его прогиба и закручивания от действия составляющих силы резания. По своим возможностям представленный динамометр уступает отечественному динамометру УДМ, т.к. предназначен только для точения. Кроме того, низкая частота дискретизации аналогоцифрового преобразователя (120 Гц) не позволяет регистрировать динамическую составляющую силы резания.

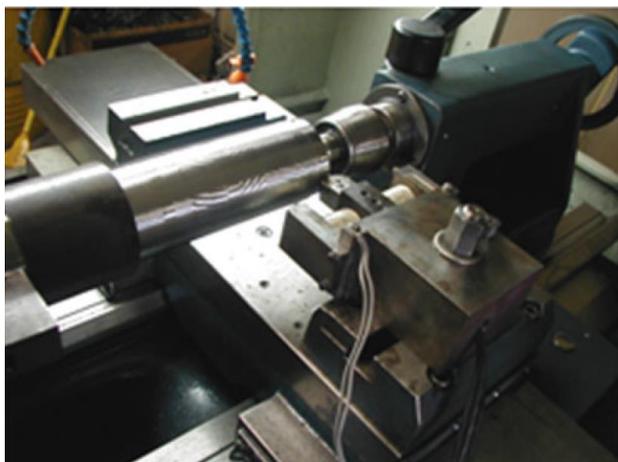


Рис. 1. Трехкомпонентный токарный динамометр [11]
Fig 1. Three-component turning dynamometer [11]

Часто современные токарные динамометры являются композицией держателя инструмента, хвостовика динамометра и соединяющего их упругого элемента с чувствительными датчиками. Упругая часть динамометра, описанного в работе [12], представляет собой четыре восьмигранных кольца, воспринимающих усилие резания и последовательно развернутых относительно друг друга на 90° (рис. 2). На внешних и внутренних сторонах колец наклеены тензорезисторы. Динамометр рассчитан на восприятие трех компонентов силы резания до 3500 Н, т.е. для условий черновой обработки. Частота собственных колебаний динамометра составля-

ет 159 Гц, что не позволяет регистрировать динамическую составляющую силы резания. Для ее измерения динамометр дополнительно снабжен акселерометром.

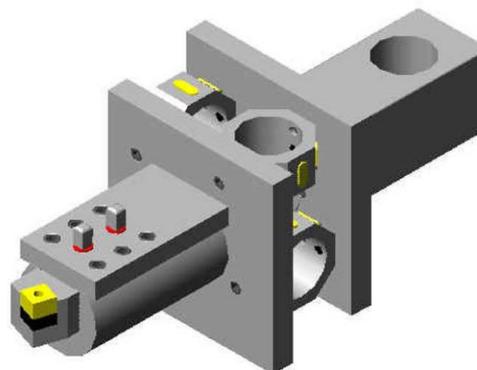


Рис. 2. Трехкомпонентный токарный динамометр [12]
Fig. 2. Three-component turning dynamometer [12]

Следующая конструкция трехкомпонентного динамометра [13] отличается формой упругого элемента и местом расположения датчиков. Упругий элемент из эластомера выполнен в виде квадратного бруска с эллиптическими выточками на продольных сторонах. Тензорезисторы расположены не на упругом элементе, а на некотором расстоянии вокруг него на внешней поверхности тонкой восьмигранной муфты, состоящей из отдельных листов и соединяющей держатель инструмента с хвостовиком динамометра (рис. 3). Сами датчики изготовлены методом напыления нихромовой ($Ni_{80}Cr_{20}$) измерительной решетки на тонкой стальной пластинке. Электрическую изоляцию измерительной решетки обеспечивают два слоя напыленной пленки из нитрида кремния (Si_3N_4). Принятое расположение тензорезисторов в совокупности с тонкопленочным вариантом их исполнения служит повышению чувствительности динамометра.

В работе [14] представлен динамометр (рис. 4), имеющий очень оригинальную конструкцию упругого элемента (рис. 5). Он представляет собой комбинацию 12 изгибных балок, монолитно соединенных в виде квадратной рамки и вписанного в нее креста. Балки, образующие крест, развернуты в поперечном направлении относительно балок, образующих рамку. На балки наклеены 24 полупроводниковых тензорезистора разме-

ром 6×3,5 мм. Удачная конструкция упругого элемента обеспечивает компактность динамометра и возможность восприятия силовой нагрузки до 2000 Н по всем направлениям при полустойковой и чистовой обработке. Частота собственных колебаний динамометра составляет 2253, 2317 и 2957 Гц, соответственно, по направлениям продольной подачи – радиальному и тангенциальному, позво-

ляя уверенно регистрировать автоколебания с частотой до 500...600 Гц. Можно признать, что на сегодняшний день эта конструкция динамометра является одной из лучших. Но ее практическое использование сдерживается необходимостью обеспечения очень точного изготовления сложного по форме упругого элемента.

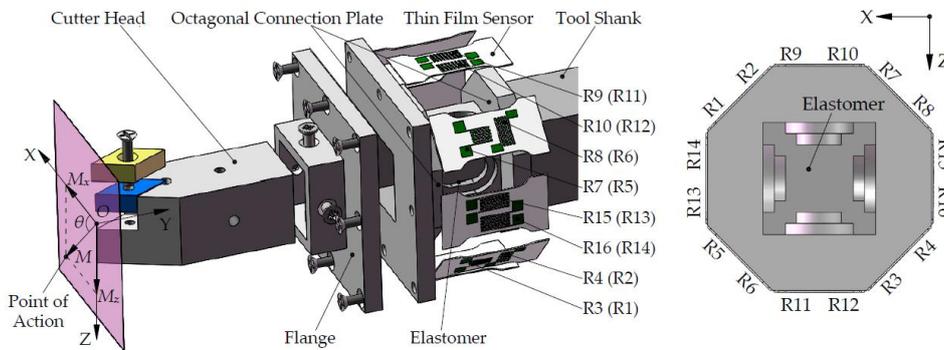


Рис. 3. Трехкомпонентный токарный динамометр [13]
Fig. 3. Three-component turning dynamometer [13]

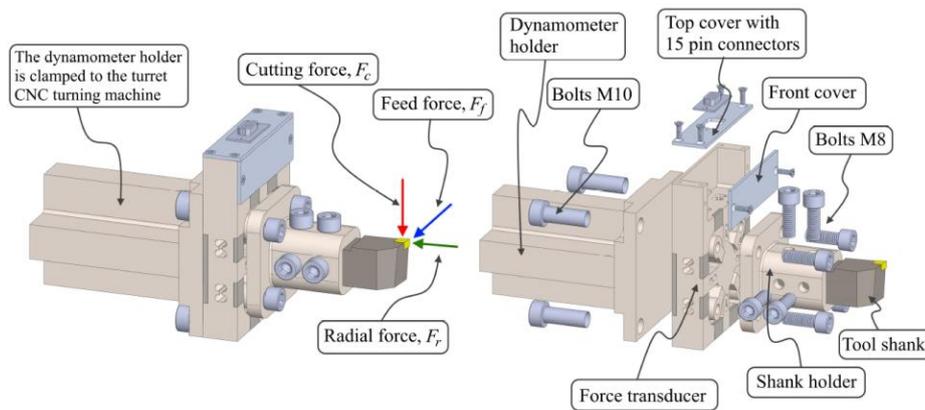


Рис. 4. Трехкомпонентный токарный динамометр [14]
Fig. 4. Three-component turning dynamometer [14]

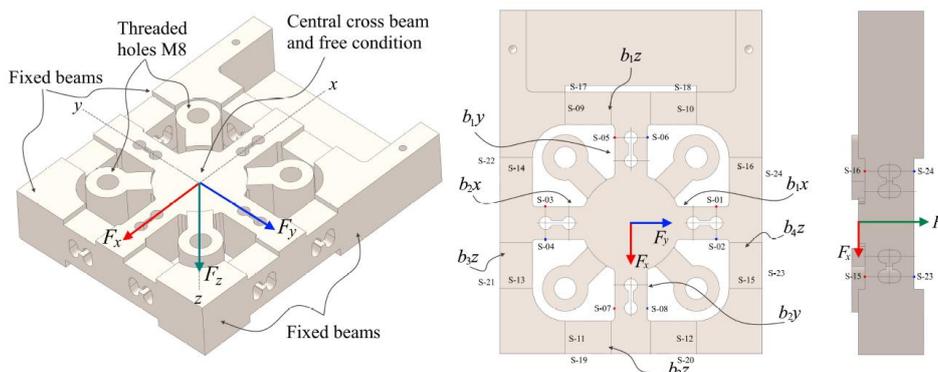


Рис. 5. Упругий элемент трехкомпонентного динамометра [14]
Fig. 5. Elastic element of a three-component dynamometer [14]

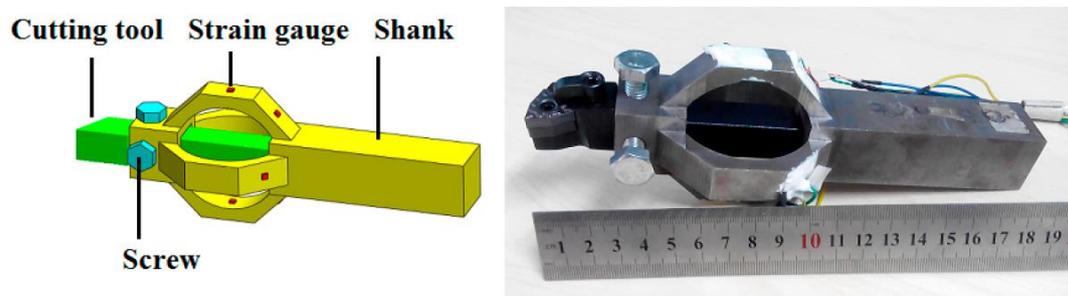


Рис. 6. Трехкомпонентный динамометрический футляр [15, 16]
Fig. 6. Three-component dynamometric case [15, 16]

Весьма оригинальную и очень компактную конструкцию трехкоординатного токарного динамометра (рис. 6) представили китайские авторы [15, 16]. По своей сути он является упругим чехлом для резца и может закрепляться в резцедержателе любого токарного станка.

Динамометр состоит из хомута и полого хвостовика, монолитно связанных двумя взаимно перпендикулярными восьмиугольными упругими кольцами, на внешних и внутренних поверхностях которых наклеены тензорезисторы. Резец вставляется в динамометр и закрепляется там двумя болтами через резьбовые отверстия на хомуте. Хвостовик служит для закрепления динамометра на станке. Отличительная особенность динамометра состоит в близком расположении упругого контура к зоне резания, что повышает точность измерений. Достоинствами динамометра являются компактность и малое (менее 0,84%) взаимовлияние составляющих силы резания. Последнее обеспечивается удачной формой упругой части и правильным выбором мест расположения тензодатчиков. Частота собственных колебаний резца, закрепленного в динамометре, составила 1147, 1122 и 2035 Гц в направлениях, соответственно, скорости резания, продольной подачи и нормальном к поверхности заготовки. Поэтому измерительные возможности этого динамометра по частоте регистрируемого сигнала не превышают возможностей динамометра УДМ. Кроме того, большой вылет вершины резца из резцедержателя станка (не менее 110 мм) обуславливает низкую изгибную жесткость инструмента и может спровоцировать возбуждение автоколебаний при резании.

Следующим шагом на пути миниатюризации токарного динамометра явилось встраивание через промежуточный элемент малогабаритного (24×24×10 мм) трехкомпонентного силоизмерительного пьезоэлектрического датчика Kistler 9251A под сменную головку резца (рис. 7 и 8) [17, 18].

Сравнение разработанного динамометра [17] с серийно выпускаемым токарным динамометром Kistler 9129AA доказало его преимущество по двукратному повышению частоты собственных колебаний в направлениях главного движения и продольной подачи, что положительно отражается на способности регистрации автоколебаний. Достигнутое преимущество объясняется снижением массы режущего инструмента (120 г головки резца против 1068 г целого резца). Вторым преимуществом созданного динамометра перед динамометром Kistler 9129AA является его компактность и трехкратное уменьшение общей массы. Трехкомпонентный датчик Kistler 9251A позволяет измерять три составляющие силы резания до 100 Н с точностью 0,1 Н при тонком точении. Уменьшение жесткости резца практически незначительно. Достоинствами конструкции являются компактность и минимальность искажения динамики процесса резания, а недостатком – невозможность использования при полустойковой и черновой обработках. Наибольшей компактностью и простотой обладает конструкция динамометрического резца [19], под сменной режущей пластиной которого размещены два кусочка (3×3 мм) пьезоэлектрической пленки толщиной 0,26 мм (рис. 9), с помощью которой измеряют главную составляющую силы резания. Очевидным достоинством конструкции является возможность использования в

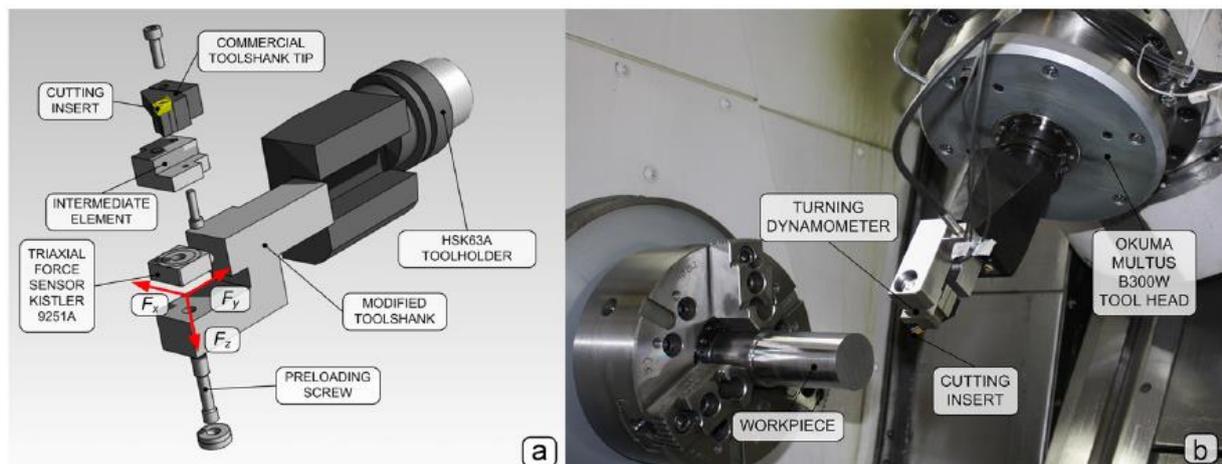


Рис. 7. Трехкомпонентный динамометрический резец [17]
Fig. 7. Three-component dynamometric cutter [17]

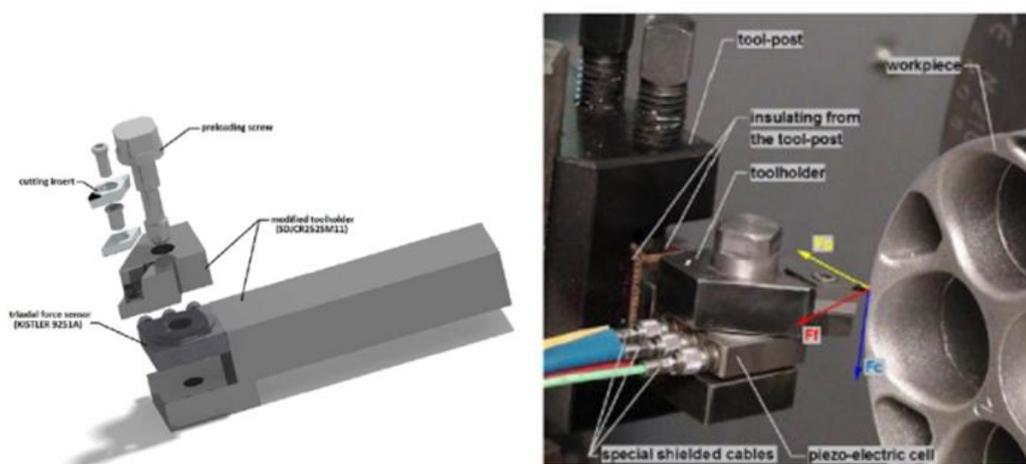


Рис. 8. Трехкомпонентный динамометрический резец [18]
Fig. 8. Three-component dynamometric cutter [18]

штатных инструментах, а недостатком – отсутствие возможности измерения двух других компонент силы резания. Кроме того, проблемы использования резца могут возникнуть в связи с надежностью электрической изоляции пленки в условиях работы с СОЖ и превышением допустимых силовых и тепловых нагрузок пленки.

В конце прошлого века был разработан новый тип датчиков, способных регистрировать очень малые деформации с помощью поверхностных акустических волн (ПАВ) [20]. Они характеризуются компактностью, надежностью, максимальной точностью в сложных условиях эксплуатации и беспроводной передачей сигнала. Пример использования датчиков ПАВ для измерения силы резания токарного резца приведен в работе [21]. С

этой целью на теле инструмента выбирается зона, в которой деформация от силы резания регистрируется датчиком.

Принципиальная схема датчика ПАВ представлена на рис. 10. Датчик, изготавливаемый компанией «SENSeOR», представляет полированную пластинку (7×5×0,35 мм) из пьезоэлектрического материала (кварц или ниобат лития), на поверхности которой методом фотолитографии нанесен встречно-штыревой преобразователь из алюминия толщиной 0,1 мкм в виде вставленных друг в друга гребенок, и две отражательные решетки. Электроды преобразователя шириной 1 мкм расположены с шагом 3,645 мкм и связаны с антенной. При поступлении на антенну электромагнитной волны преобразователь генерирует в пьезоэлектрической пластине

стоящую поверхностную акустическую волну частотой 433 МГц, затухающую на глубине две-три длины волны от поверхности. Механическая деформация пластинки, вызванная силой резания, приводит к изменению резонансной частоты датчика. Он работает совместно с радиоопросчиком, имеющим излучающую и приемную части и расположенным в 20 см от антенны датчика. Опросчик генерирует импульсы с частотой 3 кГц, между которыми получает ответ от датчика. По изменению резонансной частоты датчика определяют степень механической деформации пластинки и величину вызывающей ее силы.

Динамометрический токарный проходной резец представлен на рис. 11. На каждой продольной грани хвостовика сразу за головкой инструмента наклеен датчик ПАВ и закреплен держатель антенны. Датчики на противоположных гранях хвостовика образуют дифференциальные пары для измерения

главной составляющей силы резания и силы подачи. Вылет экспериментального резца из резцедержателя составляет примерно 70...80 мм. Для проверки достоверности измерений силы резания созданным инструментом были проведены опыты по точению, в которых резец находился в динамометре Kistler 9263, а тот – в револьверной головке токарного станка. Одновременная запись сигналов силы резания от обоих устройств показала высокую степень их совпадения. Однако принятая частота дискретизации 3 кГц может обеспечить уверенную регистрацию динамической составляющей силы резания с частотой не более 200 Гц, тем самым уступая динамометру УДМ-600. Вторым недостатком созданного устройства состоит в возможности возбуждения автоколебаний резца вследствие его большого вылета из резцедержателя.

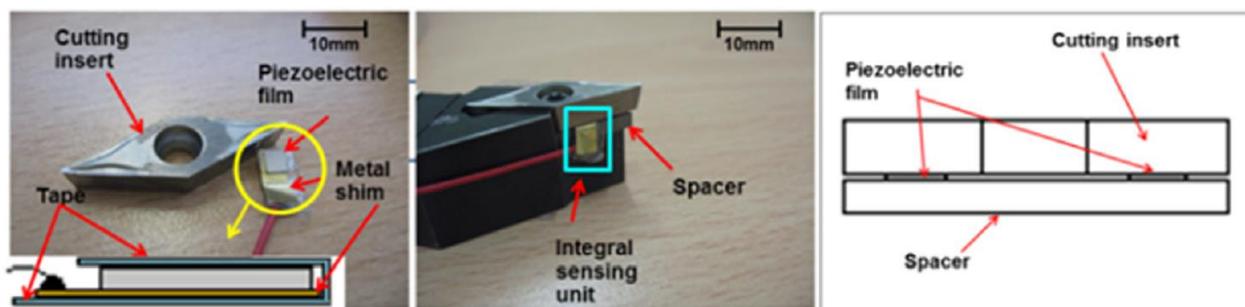


Рис. 9. Однокомпонентный динамометрический резец [19]
Fig. 9. One-component dynamometric cutter [19]

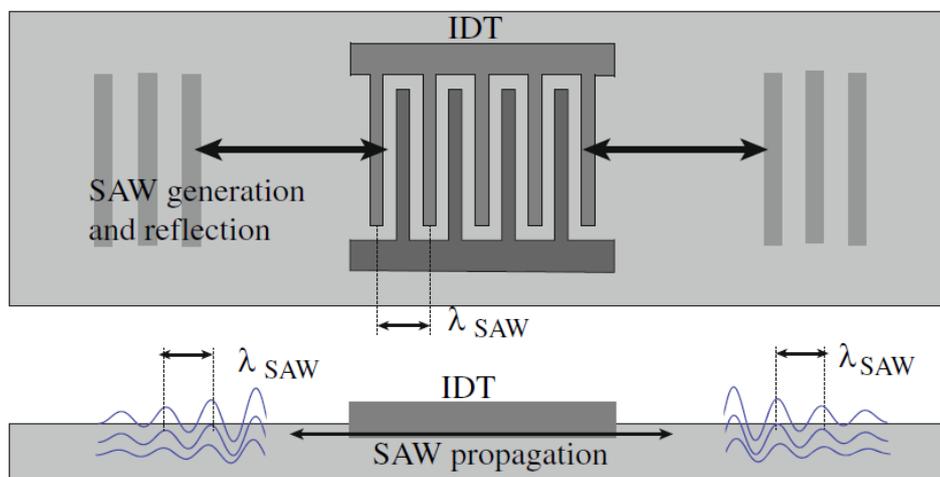


Рис. 10. Принципиальная схема датчика поверхностных акустических волн [21]
Fig. 10. Schematic diagram of the surface acoustic wave sensor [21]

SAW sensors setup on all four faces of tool holder

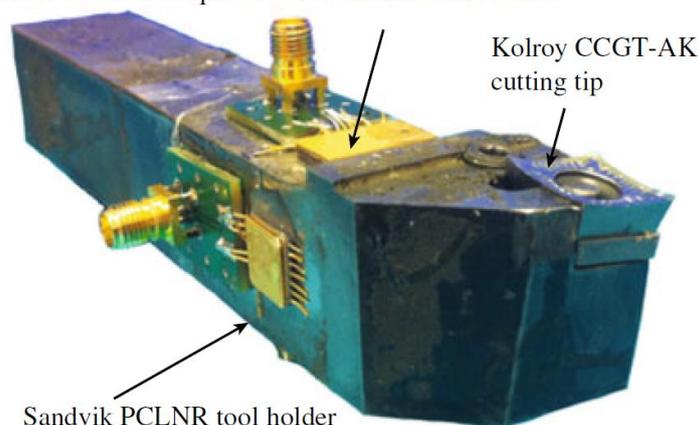


Рис. 11. Двухкомпонентный токарный динамометрический резец с датчиками поверхностных акустических волн [21]

Fig. 11. Two-component turning dynamometric cutter with surface acoustic wave sensors [21]

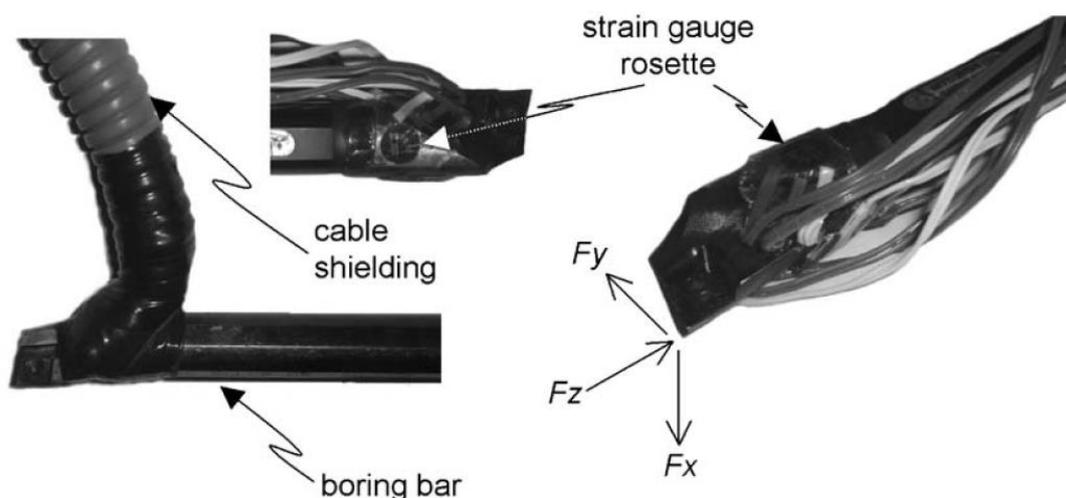


Рис. 12. Трехкомпонентный расточной динамометрический резец [22]

Fig. 12. Three-component dynamometric boring cutter [22]

Рассмотренные выше конструкции динамометров предназначены для измерения силы резания при наружной токарной обработке. Применительно к расточным резцам создано гораздо меньше технических решений. Для мониторинга износа инструмента посредством измерения трех составляющих силы резания при растачивании авторами работы [22] был изготовлен тензометрический инструмент (рис. 12). На переднем конце стандартного расточного резца S16Q-SCLCR09, оснащенного режущей пластиной CCGT 09T304 FN, вблизи его головки была наклеена фольговая розетка тензорезисторов с базой 5 мм. Недостатком предложенной конструкции является низкая чувствительность измерительной системы вслед-

ствие расположения тензодатчиков на небольшом расстоянии от места приложения силы резания. Кроме того, громоздкость кабеля в защитном рукаве ограничивает минимальный диаметр растачиваемого отверстия.

В процессе работы вершина расточного резца вследствие его гибкости отжимается под действием силы резания. Адаптивные системы управления станками позволяют компенсировать этот отжим радиальным смещением резца. Непосредственное измерение отжима в зоне резания при растачивании глубоких отверстий весьма проблематично. Поэтому измерение выполняют с помощью тензорезисторов, наклеенных на стержень резца вблизи места его закрепления. Однако такой способ измерения сопро-

водится ошибкой. В работе [23] проведен анализ ошибки измерения изгибных деформаций консольно закрепленной балки при учете первых двух форм ее колебаний. По результатам анализа для уменьшения ошибки авторы предложили использовать две группы тензорезисторов вместо одной. Такой прием позволил сократить ошибку более чем в три раза и добиться микронной точности измерения отжатий резца. Однако практическая реализация этих рекомендаций возможна при использовании миниатюрных тензодатчиков с малой базой, обладающих низкой чувствительностью. Такие датчики требуют большего усиления сигнала, что ведет к повышению уровня помех.

С целью повышения чувствительности измерения смещения вершины расточной оправки силой резания в работе [24] предлагается использовать специальную муфту (рис. 13), по принципу действия подобную муфте в работе [13]. Она состоит из двух фланцев, соединенных четырьмя мостиками, на которых наклеены тензорезисторы. Муфта закрепляется на расточной оправке в непосредственной близости от держателя инструмента. В процессе работы при изгибе оправки мостики испытывают деформацию растяжения и сжатия, что позволяет независимо регистрировать радиальную и тангенциальную составляющие силы резания. Недостатком конструкции является ограничение муфтой глубины растачивания. Кроме того, ослабление под действием вибраций жестко-

сти крепления фланцев на стержне расточной оправки может привести к значительным погрешностям измерения.

Приобретение динамометрической аппаратуры для проведения исследований в настоящее время затруднительно. В России аппаратуру для измерения силы резания производит единственное предприятие ООО «Технолог» (г. Рыбинск). Однако серийно выпускаемый токарный динамометр Dyna Z способен регистрировать только одну компоненту силы резания. Динамометры швейцарской компании «Kistler» имеют высокую стоимость. Поэтому исследователи вынуждены самостоятельно конструировать и изготавливать динамометры.

Краткий обзор современных токарных динамометров показал широкое многообразие их конструкций. В качестве чувствительных элементов используют тензорезисторы, пьезодатчики и датчики ПАВ. В некоторых конструкциях упругий элемент имеет сложную геометрическую форму, создающую технологические трудности при изготовлении. Другая часть конструкций в качестве упругого элемента использует тело инструмента. Для получения и обработки сигнала применяют дорогостоящую аппаратуру.

Целью данной работы является разработка, изготовление и испытание простого по конструкции и недорогого динамометра для исследования динамики процесса резания при растачивании и точении.

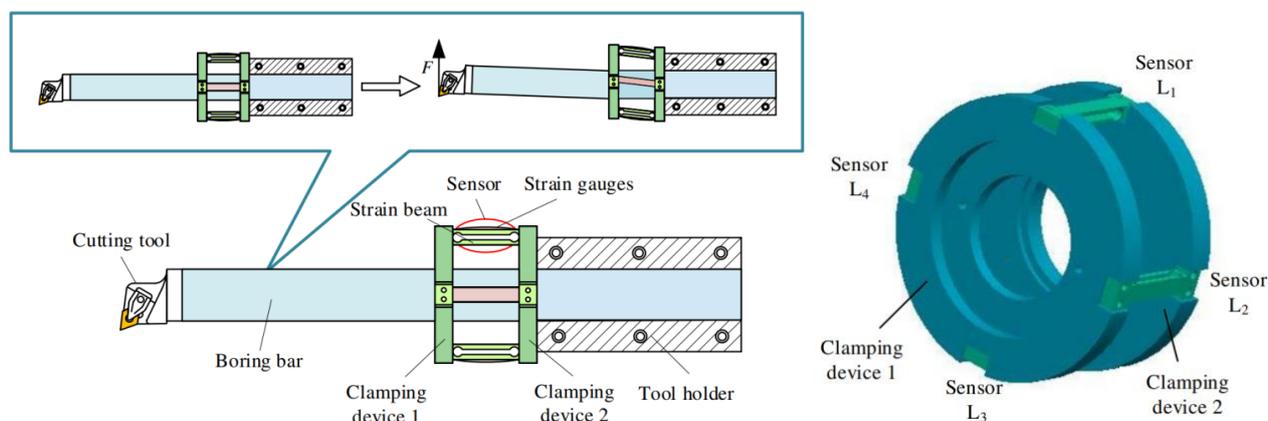


Рис. 13. Двухкомпонентный динамометрический расточной резец с измерительной муфтой [24]
Fig. 13. Two-component dynamometric boring cutter with a measuring sleeve [24]

КОНСТРУКЦИИ ДИНАМОМЕТРИЧЕСКОГО РАСТОЧНОГО РЕЗЦА И ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Обзор литературных источников показал, что для получения опытных данных о виброперемещениях и силе резания расточного резца наилучшим из существующих технических решений является тензометрирование инструмента. Тензорезисторы очень компактны и не загромождают зону резания. Получаемый при этом сигнал несет информацию одновременно об этих обоих важнейших параметрах динамики процесса резания, связанных между собой жесткостью инструмента. Поэтому в данной работе было принято решение об изготовлении тензометрического резца.

В качестве базового элемента изделия использовали токарный сборный правый расточной резец S20R-SSSCR09 (рис. 14) для обработки сквозных отверстий (главный угол в плане $\varphi = 75^\circ$) с винтовым механическим креплением сменной квадратной твердосплавной режущей пластины SCMT09T304-MM IM7325 с задним углом $\alpha = 7^\circ$. Форма сечения державки резца круглая, с продольными лысками сверху и спереди. Длина резца составляет 180 мм, диаметр державки – 20 мм, поперечный размер державки с лыской – 18 мм, минимальный диаметр растачиваемого отверстия – 25 мм. Резец размечали и зачищали шлифовальной шкуркой до шероховатости $Ra\ 2,5\ \mu\text{м}$ его поверхности под наклейку тензорезисторов (см. рис. 14). Участок резца длиной 50 мм от заднего торца предназначен для закрепления в держателе револьверной головки станка. На следующих 20 мм располагается короткая сторона тензорезисторов с выводами.

Расточной резец, установленный в револьверной головке токарного станка, представляет консольно закрепленную балку. Практика эксплуатации резцов показывает, что при обычных режимах резания они не имеют остаточной деформации изгиба. Достаточная упругость резцов объясняется их изготовлением (согласно ГОСТ 26613-85⁹) из

стали 40X с термообработкой до HRC_э 37...47. Поэтому стержень резца можно использовать в качестве упругого элемента, максимальная деформация которого располагается в зоне возле места закрепления. Именно в этой зоне целесообразно располагать датчики деформации. Наиболее доступными, компактными и недорогими из них являются тензорезисторы.

Исходя из возможности размещения на резце, были использованы фольговые одиночные тензорезисторы марки КФ5П1-10-400-А-12 с номинальным сопротивлением 400 Ом и базой (длиной тензорешетки) 10 мм (рис. 15). Тензорезистор состоит из чувствительного элемента (тензорешетки), полимерной подложки и выводов. В тензорезисторах типа КФ5 в качестве подложки используется термостойкая бумага, пропитанная клеем УВС-10Т.

С целью группировки тензорезисторов было измерено их фактическое сопротивление с точностью до 0,1 Ом при помощи моста постоянного тока типа УМВ и отобраны две пары с одинаковым сопротивлением: 399,8 и 400,2 Ом. Первая пара тензорезисторов предназначена для измерения главной составляющей силы резания и виброперемещений вершины резца в направлении вектора скорости резания (тангенциальные перемещения). Они размещены на верхней и нижней сторонах стержня резца напротив друг друга. Вторая пара служит для измерения радиальной составляющей силы резания и радиальных виброперемещений. Они расположены на боковых сторонах резца. В осевом направлении все тензорезисторы одинаково удалены от торца резца.

Наклейку тензорезисторов осуществляли клеем БФ-2 высшего сорта (ГОСТ 12172-2016¹⁰) согласно инструкции. Для обезжиривания использовали спирто-бензиновую смесь, ацетон и этиловый спирт. Сушку проводили в электрошкафу ШС-80-01 СПУ. На рис. 16 показан фрагмент державки резца с наклеенными тензорезисторами.

⁹ГОСТ 26613-85. Резцы токарные с механическим креплением сменных многогранных пластин. Введ. 01.07.1986. М.



Рис. 14. Расточной резец S20R-SSSCR09 с разметкой под наклейку тензодатчиков
Fig. 14. S20R-SSSCR09 boring cutter with markings for load cell stickers

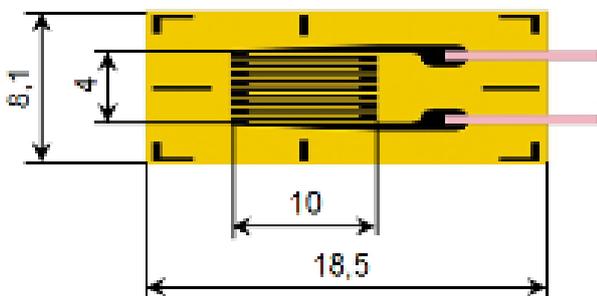


Рис. 15. Одиночный тензорезистор КФ5П1-10-400-А-12
Fig. 15. Single KF5P1-10-400-A-12 strain gauge



Рис. 16. Наклеенные тензорезисторы
Fig. 16. Strain gauges glued to the cutter

После наклейки тензорезисторов к их выводам припаяли экранированный 8-жильный медный кабель типа LCS-8BL OFC 8C+1. Для фиксации кабеля и предотвращения непредвиденного механического воздействия использовали термоусадочную трубку Rexant 25/12,5 art. 22-5008, термоклей и пластиковую скобу (рис. 17). С целью защиты от внешнего воздействия и экранирования помех на участок резца с приклеенными тензорезисторами одели термоусадочную трубку, поверх которой намотали слой алюминиевой ленты фирмы «Tesa» шириной 50 мм и толщиной 0,08 мм, соединив ее с экраном кабеля. Затем для окончательной защиты и фиксации одели еще одну термоусадочную труб-

ку. К другому концу кабеля припаяли разъем типа DB37M для соединения с аппаратурой.



Рис. 17. Распайка и фиксация кабеля на резце со стороны тензорезисторов
Fig. 17. Cable unsoldering and clamping on the cutter from the strain gauge side

Таким методом были сформированы два измерительных канала: для регистрации тангенциальных виброперемещений по оси Z и радиальных по оси Y. Каждый канал представляет собой пару тензорезисторов R_1 и R_2 с электрическим сопротивлением R , наклеенных напротив друг друга на державку в виде балки с консольным закреплением (рис. 18).

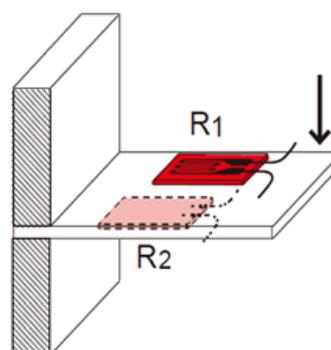


Рис. 18. Балка с консольным закреплением
Fig. 18. Beam with a single-sided support

В рассматриваемом случае под действием составляющих силы резания (тангенциальной и радиальной) происходит изгиб консольно-закрепленной державки резца, соот-

ветственно, вершина резца перемещается на некую величину. Для измерения изгибных деформаций и вызванных ими перемещений два одинаковых активных тензорезистора R_1 и R_2 должны быть включены в смежные плечи по схеме полумоста (дифференциальная схема) (рис. 19), в то время как другая половина моста дополняется непосредственно в измерительном приборе парой стабильных одинаковых сопротивлений $R_3=R_4=R_0$.

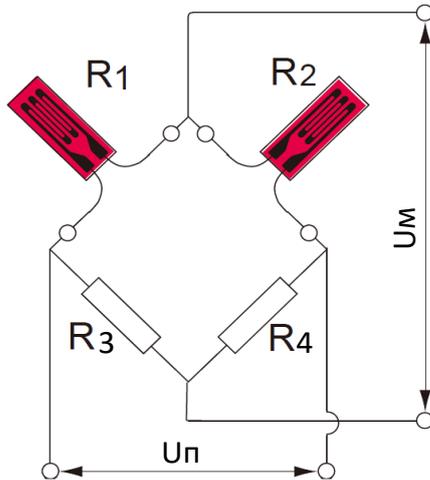


Рис. 19. Подключение двух активных тензорезисторов по дифференциальной схеме
Fig. 19. Connecting two active strain gauges in a differential circuit

Под влиянием нагружения сопротивление R тензорезисторов изменяется на величину ΔR , причем для тензорезистора R_1 в сторону увеличения, а для тензорезистора R_2 – в сторону уменьшения. Кроме того, в результате температурных изменений исследуемого объекта, на котором наклеены тензорезисторы, его сопротивление увеличивается на величину ΔR_T . Помимо этого, под действием осевой силы подачи P_X сопротивление тензорезисторов уменьшается на величину ΔR_X . С учетом вышесказанного имеем:

$$R_1 = R + \Delta R + \Delta R_T - \Delta R_X; \quad (1)$$

$$R_2 = R - \Delta R + \Delta R_T - \Delta R_X. \quad (2)$$

Основное уравнение мостовых схем [25]:

$$U_M = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_{\Pi}, \quad (3)$$

где U_M – выходное напряжение моста, В;
 U_{Π} – напряжение питания моста, В.

Подставляя (1) и (2) в (3), получаем:

$$U_M = \frac{(R + \Delta R + \Delta R_T - \Delta R_X)R_0 - (R - \Delta R + \Delta R_T - \Delta R_X)R_0}{2R_0(R + \Delta R + \Delta R_T - \Delta R_X + R - \Delta R + \Delta R_T - \Delta R_X)} U_{\Pi} = \frac{\Delta R}{2(R + \Delta R_T - \Delta R_X)} U_{\Pi}. \quad (4)$$

Как видим, сопротивления второй половины моста $R_3=R_4=R_0$, встроенной в прибор, в уравнение вообще не входят, т.е. их величина не оказывает влияния на результаты измерений. Влияние температуры и осевой силы при принятой схеме моста (см. рис. 19) хорошо компенсируется, т.к. $\Delta R_T \ll R$, $\Delta R_X \ll R$ и слагаемыми ΔR_T и ΔR_X знаменателя в формуле (4) можно пренебречь. Следовательно, можно записать:

$$U_M \approx \frac{U_{\Pi} \Delta R}{2R}. \quad (5)$$

Таким образом, данная схема не фиксирует температурную и осевую деформации, вызываемые силой подачи. К преимуществам данной схемы подключения можно отнести то, что она исключает температурное влияние проводов, а чувствительность при измерении деформаций изгиба увеличивается вдвое.

Сигнал с выходов измерительных каналов поступает в тензостанцию с аналогово-цифровым преобразователем (АЦП) и далее на персональный компьютер. Изначально в качестве тензостанции использовали крейтовую систему LTR-EU-2 (Л-Кард) с прилагаемым программным обеспечением.

Тензостанция LTR-EU-2 рассчитана на проведение долгосрочных экспериментов с медленно изменяющейся во времени измеряемой величиной, что обуславливает крайне низкую дискретность измерительных каналов (около 600 Гц). Для преодоления этого препятствия был принят ряд мер, в том числе изменен режим работы тензометриче-

¹⁰ГОСТ 12172-2016. Клеи фенолополивинилацетальные. Введ. 01.11.2017. М.: Стандартинформ, 2019.

ских модулей, позволивший добиться максимально возможной частоты дискретизации на уровне 7560 Гц для каждого из двух измерительных каналов. Однако предварительные опыты по резанию показали неудовлетворительное качество сигналов.

Для устранения возникшей проблемы вместо приобретения другой дорогостоящей тензостанции с большей частотой дискретизации выходного сигнала был сконструирован и изготовлен недорогой двухканальный электронный блок. Каждый канал блока включает в себя измерительный мост Уитстона из двух тензорезисторов и подстроечного резистора, усилитель и АЦП. В качестве комплектующих деталей были выбраны:

INA333 – прецизионный инструментальный дифференциальный усилитель с нулевым дрейфом, со схемотехническим решением типа rail to rail;

AD8629 – сдвоенный операционный усилитель, со схемотехническим решением типа rail to rail.

Встроенный в контроллер АЦП осуществляет дискретизацию сигнала с частотой 42 кГц на канал. По интерфейсу COM-порт осуществляется передача данных со скоростью 8 Мбит/с. Электронная схема разработанного устройства приведена на рис. 20, где

указаны:

R3, R4, R12, R13 – тензорезисторы измерительного полумоста Уитстона;

RV1, RV4 – подстроечные резисторы для уравнивания полумоста;

U1, U4, U5, U6, U9, U10 – операционные усилители, объединенные в дифференциальный усилитель попарно в одном корпусе;

U2, U3, U7, U8 – операционные усилители, объединенные попарно в одном корпусе;

RV2, RV3, RV5, RV6 – подстроечные резисторы для задания коэффициента усиления;

U11 – стабилитрон для создания виртуальной земли;

R19 – токоограничивающий резистор;

R20, R21 – резисторы делителя напряжения.

Плата электронного блока помещена в пластмассовый корпус и закрыта прозрачной крышкой (рис. 21). На корпусе размещены три разъема: DB37M – для подключения тензорезисторов, электропитания +5 В и микро USB – для связи с компьютером.

Дополнительно для устройства была разработана собственная управляющая программа на языке программирования Python, позволяющая записывать неограниченный объем данных.

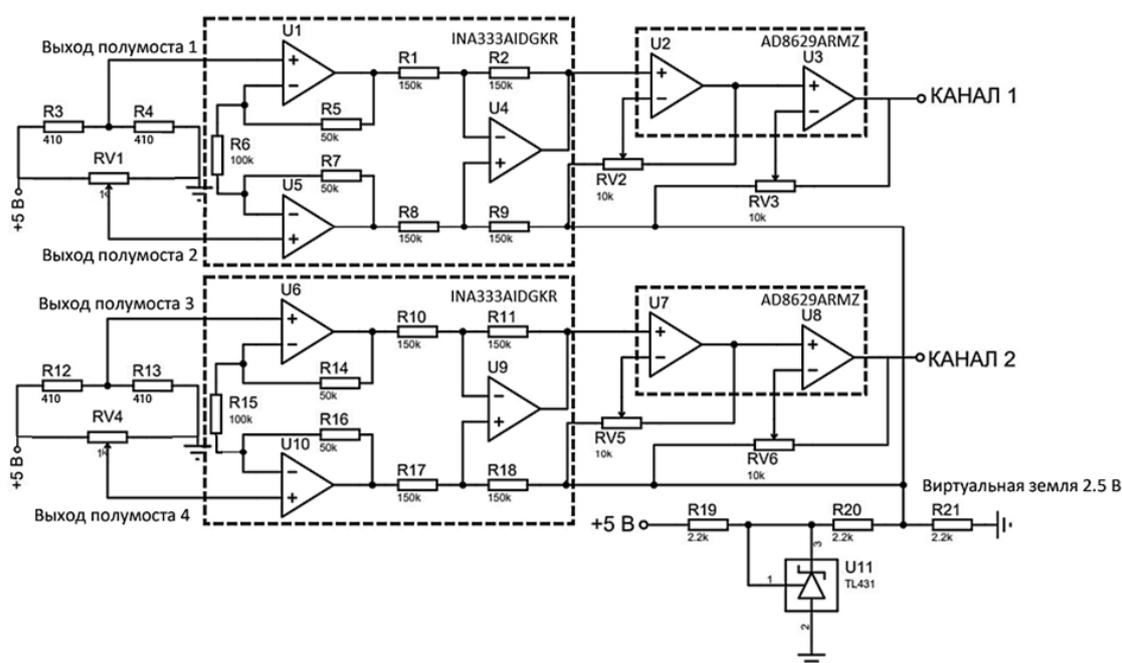


Рис. 20. Принципиальная электрическая схема электронного блока
Fig. 20. Schematic diagram of the electronic unit



Рис. 21. Внешний вид электронного блока
Fig. 21. External view of the electronic unit

ИСПЫТАНИЯ ДИНАМОМЕТРИЧЕСКОГО РАСТОЧНОГО РЕЗЦА

Тарирование резца в двух радиальных направлениях выполняли на экспериментальной установке, собранной на столе фрезерного станка (рис. 22).

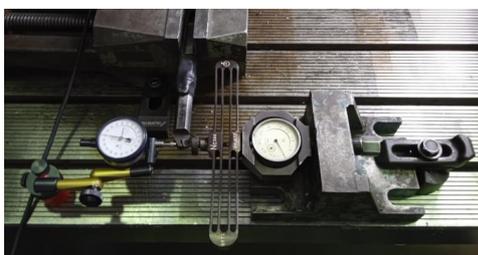


Рис. 22. Измерение изгибной жесткости динамометрического расточного резца
Fig. 22. Measuring bending stiffness of a dynamometric boring cutter

Изгибающую резец силу создавали на вершине режущей пластинки с помощью нагрузочного винта и образцового динамометра сжатия механического типа ДОУ-3-01 с максимальной нагрузкой 100 кгс. Регистрацию смещений резца выполняли механическим датчиком часового типа DDP-10A с ценой деления 1 мкм. Нагружение и разгружение резца выполняли ступенчато с интервалом смещения 20 мкм до величины 200 мкм и обратно. Силу определяли по индикатору динамометра. Сигнал от резца поступал на персональный компьютер, где обрабатывался с помощью модуля тарировки специализированного программного обеспечения АСТест (рис. 23).

Полученные коэффициенты преобразования для перемещений имеют следующие значения: 3,5 мкм/В в направлении силы P_z и 4,2 мкм/В в направлении силы P_y . Изгибная жесткость резца в указанных направлениях составила, соответственно, 0,6 Н/мкм и 1,058 Н/мкм (рис. 24).

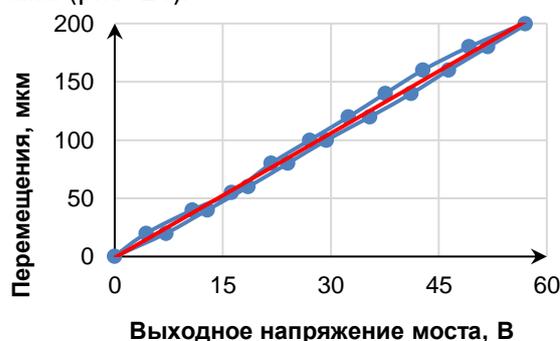


Рис. 23. Результаты тарировки устройства в тангенциальном направлении
Fig. 23. Results of device calibration in tangential direction

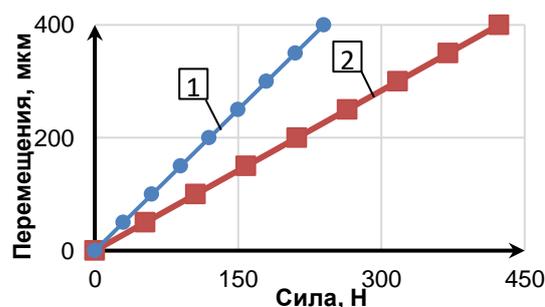


Рис. 24. График зависимости перемещений от силы: 1 – в тангенциальном направлении, 2 – в радиальном направлении
Fig. 24. Displacement vs force graph: 1 – in the tangential direction, 2 – in the radial direction

Взаимное влияние радиальных смещений на тангенциальные составляет 7,7% и 2,8% – наоборот. Кроме того, путем удара по резцу, закрепленном в револьверной головке станка, была записана виброграмма его собственных затухающих изгибных колебаний (рис. 25). Спектрограмма колебаний показала, что их частота составляет 695 Гц.

Для испытания резца в работе провели опыты на токарном станке DMG NEF 400 (рис. 26).

Заготовка из стали 20Х диаметром 79 мм была установлена в трехлапчатом патроне с вылетом 200 мм. Динамометрический резец закрепили в револьверной головке станка. Наружное продольное точение заготовки выполнили при частоте вращения шпинделя $n = 600$ об/мин, глубине резания $t = 0,8$ мм и продольной подаче $S = 0,103$ мм/об.

Виброграммы колебаний вершины резца записывали в память персонального компьютера. Они представлены на рис. 27 и 28.

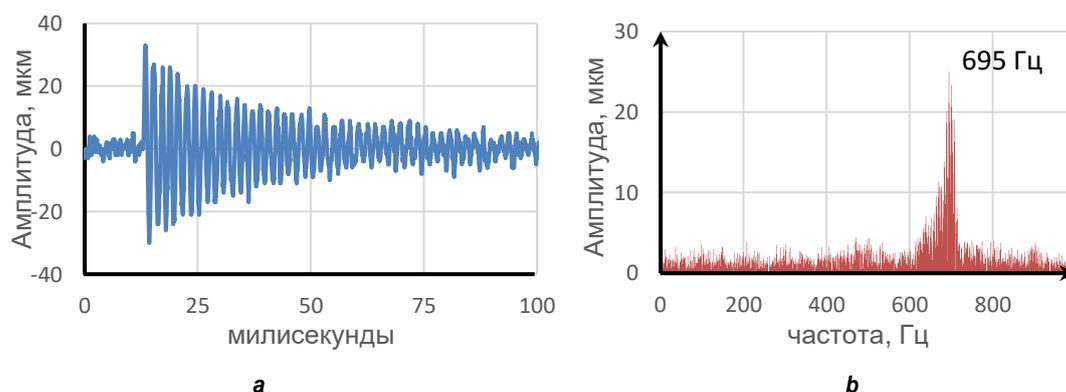


Рис. 25. Виброграмма и спектрограмма собственных колебаний резца
Fig. 25. Vibrogram and spectrogram of cutter natural oscillations



Рис. 26. Испытание динамометрического резца в работе
Fig. 26. Tests of the dynamometric boring cutter

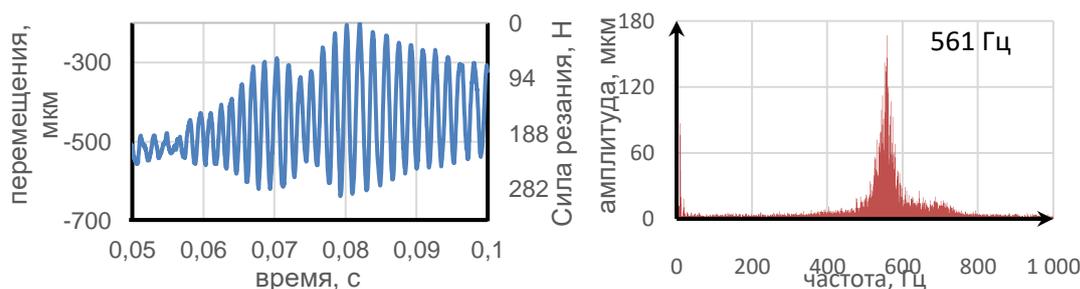


Рис. 27. Виброграмма и спектр частот тангенциальных перемещений
Fig. 27. Vibrogram and frequency spectrum of tangential displacements

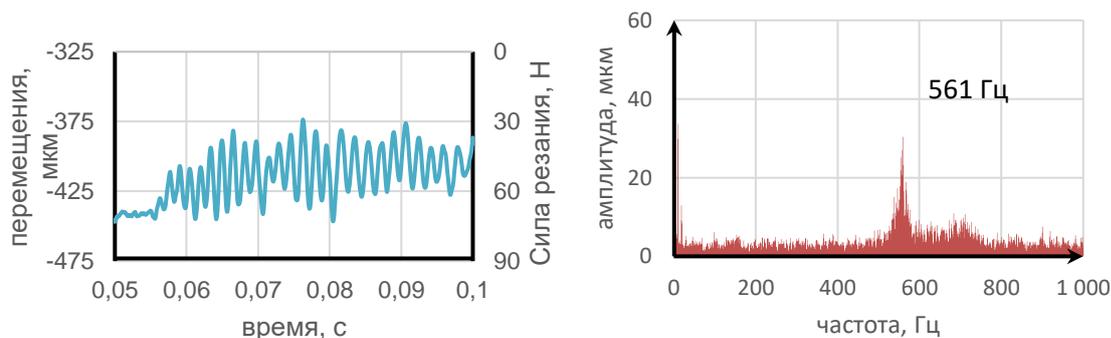


Рис. 28. Виброграмма и спектр частот радиальных перемещений
Fig. 28. Vibrogram and frequency spectrum of radial displacements

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для измерения силы резания при точении промышленность России в настоящее время выпускает одну марку динамометра – Дуна-Z. Он позволяет регистрировать только главную составляющую силы резания. Однако проведение анализа динамики процесса резания требует информации и о двух других компонентах силы, в первую очередь радиальной составляющей. Кроме того, в динамометре Дуна-Z невозможно закрепить расточной резец. Использование устаревшей отечественной марки динамометра УДМ на современных токарных станках с револьверной головкой также не представляется возможным. Это обусловило необходимость изготовления динамометра для растачивания собственными силами. С целью поиска наилучшей конструкции был проведен обзор литературных источников, показавший, что для расточных резцов наиболее компактным техническим решением является их тензометрирование. Оно позволяет в одном сигнале получать информацию о двух важнейших параметрах динамики процесса резания: силе и виброперемещениях.

Для реализации такого подхода на стан-

дартный расточной резец наклеили четыре тензорезистора для регистрации силы и виброперемещений его вершины в радиальном направлении и скорости резания. С целью формирования сигнала спроектировали и изготовили электронный блок. Испытание устройства в двух указанных направлениях позволило определить изгибную жесткость резца и коэффициенты преобразования. Опыты по точению доказали способность устройства получать качественные виброграммы динамики процесса резания.

Основными достоинствами спроектированного изделия являются простота конструкции, возможность изготовления в лабораторных условиях и невысокая стоимость. Кроме того, принятая полумостовая дифференциальная схема включения тензорезисторов обеспечивает практическую нечувствительность к деформациям резца от изменения температуры и осевой силы подачи. Динамометрический расточной резец может найти применение при исследованиях динамики процесса резания, разработке адаптивных систем управления станками, в учебном процессе и в других областях технологии машиностроения.

Список источников

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
2. Полетика М.Ф. Приборы для измерения сил резания. М.: Машгиз, 1962. 108 с.
3. Altintas Y., Weck M. Chatter stability of metal cutting and grinding // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2004. Vol. 53. Iss. 2. P. 619–642. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60032-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60032-8).
4. Гусейнов Р.В. Динамометрическая аппаратура для измерения составляющих сил резания при обработке осевым инструментом // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018. Т. 45. № 1. С. 22–29. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-1-22-29>.
5. Шуляк Я.И. Модернизация установки измерения сил резания на базе динамометра УДМ-600 // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2016. № 1. С. 1-12.

6. Павлов И.О., Ушаков М.В., Воробьев И.А. Система для измерения сил резания. Компонировка, тарирование и оценка погрешности // Известия ТулГУ. Серия: Технические науки. 2013. № 10. С. 159–168.
7. Самойлов В.Б. Модернизация системы для измерения сил резания на базе динамометров серии УДМ // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2019. № 5. С. 91–103. <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2019-5-91-103>
8. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение, 1986. 184 с.
9. Марков А.М., Леонов С.Л., Черданцев П.О., Черданцев А.О., Гайст С.В., Лапенков Е.Ю. Особенности обработки сигналов, получаемых от пьезоэлектрических датчиков динамометра для измерения сил резания // Актуальные проблемы в машиностроении. 2017. Т. 4. № 4. С. 89–93.
10. Безъязычный В.Ф., Кордюков А.В., Тимофеев М.В., Фоменко Р.Н. Разработка динамометрической системы для измерения силы резания при точении // Известия МГТУ «МАМИ». 2014. Т. 2. № 1-2. С.171–176. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-67842>.
11. Panzera T.H., Souza P.R., Rubio J.C.C., Abrão A.M., Mansur T.R. Development of a three-component dynamometer to measure turning force // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012. Vol. 62. P. 913–922. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3866-5>.
12. Yaldiz S., Ünsaçar F. Design, development and testing of a turning dynamometer for cutting force measurement // Materials and Design. 2006. Vol. 27. Iss. 10. P. 839–846. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.04.001>.
13. Zhang Yuntao, Wu Wenge, Han Yanwen, Wen Haijun, Cheng Yunping, Liu Lijuan. Design and analysis of a turning dynamometer embedded in thin-film sensor // Micromachines. 2019. Vol. 10. Iss. 3. P. 210. <https://doi.org/10.3390/mi10030210>.
14. Rizal M., Ghani J.A., Mubarak A.Z. Design and development of a tri-axial turning dynamometer utilizing cross-beam type force transducer for fine-turning cutting force measurement // Sensors. 2022. Vol. 22. Iss. 22. P. 8751. <https://doi.org/10.3390/s22228751>.
15. You Zhao, Yulong Zhao, Songbo Liang, Guanwu Zhou. A high performance sensor for triaxial cutting force measurement in turning // Sensors. 2015. Vol.15. Iss. 4. P. 7969–7984. <https://doi.org/10.3390/s150407969>.
16. Zhao You, Zhao Yulong, Gong Taobo. Application of a strain gauge cutting force sensor in machining process monitoring // 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (Changsha, 1–3 November 2019). Changsha: IEEE, 2019. P. 891–897.
17. Totis G., Sortino M. Development of a modular dynamometer for triaxial cutting force measurement in turning // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2011. Vol. 51. Iss. 1. P. 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.10.001>.
18. Horváth R., Pálkás T., Mátyási G., Drégelyi-Kiss A.G. The design, calibration and adaption of a dynamometer for fine turning // International Journal of Machining and Machinability of Materials. 2017. Vol. 19. Iss. 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.1504/IJMMM.2017.081183>.
19. Wang Chao, Rakowski Ricard, Cheng Kai. Design and analysis of a piezoelectric film embedded smart cutting tool // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2013. Vol. 227. Iss. 2. P. 254–260. <https://doi.org/10.1177/0954405412462785>.
20. Елисеев Н. Перспективные ПАВ-датчики Transense/HoneyWell // Электроника: наука, технология, бизнес. 2008. № 1. С. 40–45.
21. Stoney R., Donnell G.E., Geraghty D. Dynamic wireless passive strain measurement in CNC turning using surface acoustic wave sensors // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. Vol. 69. P. 1421–1430. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5116-5>.
22. Scheffer C., Heyns P.S. An industrial tool wear monitoring system for interrupted turning // Mechanical Systems and Signal Processing. 2004. Vol. 18. Iss. 5. P. 1219–1242. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2003.09.001>.
23. Li Chen-Jung, Ulsoy A.G. High-precision measurement of tool-tip displacement using strain gauges in precision flexible line boring // Mechanical Systems and Signal Processing. 1999. Vol. 13. Iss. 4. P. 531–546. <https://doi.org/10.1006/mssp.1999.1223>.
24. Liu Qiang, Gao Dayong, Jia Ruhong, Zhou Qiang, Bai Zhengyan. Investigating the cutting force monitoring system in the boring process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 119. P. 3703–3715. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08451-y>.
25. Немец И. Практическое применение тензорезисторов / пер. с чешск. М.: «Энергия», 1970. Вып. 392. 144 с.

References

1. Bobrov V.F. *Fundamentals of the theory of metal cutting*. Moscow: Mashinostroenie; 1975, 344 p. (In Russ.).
2. Poletika M.F. *Instruments for measuring cutting forces*. Moscow: Mashgiz; 1962, 108 p. (In Russ.).
3. Altintas Y., Weck M. Chatter stability of metal cutting and grinding. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2004;53(2):619-642. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60032-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60032-8).
4. Gusejnov R.V. Dynamometric equipment for measuring the components of cutting strengths when processing materials with axial tools. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2018;45(1):22-29. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-1-22-29>.

5. Shuliak Y.I., Vasilev V.G. A modernized UDM-600 dynamometer-based setup for the cutting force measurement. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiya = Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2016;(1):1-12. (In Russ.).
6. Pavlov I.O., Ushakov M.V., Vorobyov I.A. Cutting force measurement system. Layout, taring and error estimation. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. = Proceedings of the Tula State University*. 2013;10:159-168. (In Russ.).
7. Samoylov V.B. Modernization of the system for measuring cutting forces on the basis of UDM dynamometer series. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana. Seriya: Seriya Mashinostroyeniye = Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*. 2019;5:91-103. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2019-5-91-103>.
8. Zharkov I.G. *Vibrations when processing with a blade tool*. Leningrad, Mashinostroyeniye; 1986, 184 p. (In Russ.).
9. Markov A.M., Leonov S.L., Cherdancev P.O., Cherdancev A.O., Gayst S.V., Lapenkov E.Y. The features of a processing of signals received from piezoelectric sensors of a dynamometer for measuring cutting forces. *Aktual'nye problemy v mashinostroyenii = Actual Problems in Machine Building*. 2017;4:89-93. (In Russ.).
10. Bezyazichniy V.F., Kordyukov A.V., Timofeev M.V., Fomenko R.N. Development of a dynamometer system for cutting force measurement when turning. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta «MAMI» = Scientific Journal "Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2014;2(1-2):171-176. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-67842>. (In Russ.).
11. Panzera T.H., Souza P.R., Rubio J.C.C., Abrão A.M., Mansur T.R. Development of a three-component dynamometer to measure turning force. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012;62:913-922. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3866-5>.
12. Yaldız S., Ünsaçar F. Design, development and testing of a turning dynamometer for cutting force measurement. *Materials and Design*. 2006;27(10):839-846. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.04.001>.
13. Zhang Yuntao, Wu Wenge, Han Yanwen, Wen Haijun, Cheng Yunping, Liu Lijuan. Design and analysis of a turning dynamometer embedded in thin-film sensor. *Micromachines*. 2019;10(3):210. <https://doi.org/10.3390/mi10030210>.
14. Rizal M., Ghani J.A., Mubarak A.Z. Design and development of a tri-axial turning dynamometer utilizing cross-beam type force transducer for fine-turning cutting force measurement. *Sensors*. 2022;22(22):8751. <https://doi.org/10.3390/s22228751>.
15. You Zhao, Yulong Zhao, Songbo Liang, Guanwu Zhou. A high performance sensor for triaxial cutting force measurement in turning. *Sensors*. 2015;15(4):7969-7984. <https://doi.org/10.3390/s150407969>.
16. Zhao You, Zhao Yulong, Gong Taobo. Application of a strain gauge cutting force sensor in machining process monitoring. In: *14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments*. 1–3 November 2019, Changsha. Changsha: IEEE; 2019, p. 891-897.
17. Totis G., Sortino M. Development of a modular dynamometer for triaxial cutting force measurement in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2011;51(1):34-42. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2010.10.001>.
18. Horváth R., Pálkás T., Mátyási G., Drégelyi-Kiss A.G. The design, calibration and adaption of a dynamometer for fine turning. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*. 2017;19(1):1-16. <https://doi.org/10.1504/IJMMM.2017.081183>.
19. Wang Chao, Rakowski Ricard, Cheng Kai. Design and analysis of a piezoelectric film embedded smart cutting tool. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2013;227(2):254-260. <https://doi.org/10.1177/0954405412462785>.
20. Eliseev N. Promising surface acoustic wave sensors. Transense/HoneyWell. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*. 2008;1:40-45. (In Russ.).
21. Stoney R., Donnell G.E., Geraghty D. Dynamic wireless passive strain measurement in CNC turning using surface acoustic wave sensors. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;69:1421-1430. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5116-5>.
22. Scheffer C., Heyns P.S. An industrial tool wear monitoring system for interrupted turning. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2004;18(5):1219-1242. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2003.09.001>.
23. Li Chen-Jung, Ulsoy A.G. High-precision measurement of tool-tip displacement using strain gauges in precision flexible line boring. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 1999;13(4):531-546. <https://doi.org/10.1006/mssp.1999.1223>.
24. Liu Qiang, Gao Dayong, Jia Ruhong, Zhou Qiang, Bai Zhengyan. Investigating the cutting force monitoring system in the boring process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;119:3703-3715. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08451-y>.
25. Nemeč I. Practical application of strain gauges, 1970, 144 p. (Russ. ed.: *Prakticheskoe primenenie tenzorezistorov*. Moscow, Energiya; 1970, iss. 392, 144 p.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Свинин Валерий Михайлович,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры технологий и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ svinin_vm@mail.ru

Ушаков Владислав Александрович,
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
pren.prr@mail.ru

Тихонов Александр Геннадиевич,
м.н.с. кафедры технологий и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
tihonovalex90@mail.ru

Пятых Алексей Сергеевич,
к.т.н.,
доцент кафедры технологий и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
pyatykhas@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-4116-9190>

Конonenko Роман Владимирович,
к.т.н.,
доцент института информационных технологий и
анализа данных,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
istu_politeh@mail.ru

Родыгина Альбина Евгеньевна,
к.т.н., доцент кафедры технологий и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
rodygina.ae@gmail.com

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valeriy M. Svinin,
D. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Technology and
Equipment for Machine-Building Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ svinin_vm@mail.ru

Vladislav A. Ushakov,
Master's Degree Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
pren.prr@mail.ru

Aleksandr G. Tikhonov,
Junior Researcher of the Department of Technology and
Equipment for Machine-Building Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
tihonovalex90@mail.ru

Aleksey S. Pyatykh,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
of the Department of
Technology and Equipment for Machine-Building
Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
pyatykhas@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-4116-9190>

Roman V. Kononenko,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor at the
School of Information Technology
and Data Science,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
istu_politeh@mail.ru

Albina E. Rodygina,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
of the Department of Technology and Equipment for
Machine-Building Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
rodygina.ae@gmail.com

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 21.01.2023; одобрена после рецензирования 01.03.2023; принята к публикации 11.04.2023.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 21.01.2023; approved after reviewing 01.03.2023; accepted for publication 11.04.2023.