

## **Разработка динамометрической системы для измерения силы резания при точении**

д.т.н. Безъязычный В.Ф., к.т.н. Кордюков А.В., к.т.н. Тимофеев М.В., к.т.н. Фоменко Р.Н.  
РГАТУ имени П. А. Соловьёва, Рыбинск  
fomenko85@mail.ru

*Аннотация.* В статье рассматривается актуальность использования машиностроительными предприятиями и учебными заведениями динамометров для определения сил резания при механической обработке. Перечислены технико-эксплуатационные требования к современным измерительным динамометрическим системам. Приведены характеристики разработанного динамометра Dyna-Z для измерения тангенциальной составляющей силы резания при точении. Показаны экспериментальные данные по определению увеличения силы резания  $P_z$ , обусловленного износом инструмента в процессе длительного точения.

*Ключевые слова:* динамометр, сила резания, тангенциальная составляющая, эффективность инструмента, режимы резания

Сила резания, возникающая при механической обработке деталей, является важным параметром процесса резания, который определяет качество детали, долговечность станка, стойкость режущего инструмента и его производительность, что в совокупности характеризует эффективность технологического процесса и технико-экономические показатели изделия.

Важность возможности измерения и управления силой резания обусловлена следующими причинами. Возрастание силы резания при длительном точении вследствие изменения геометрии и износа инструмента позволяет оценить его работоспособность. Подбирая режимы резания, можно обеспечить требуемую стойкость и производительность режущего инструмента, которая зависит не только от воздействия износа, интенсифицирующегося превращением механической энергии в тепловую, но и от величины контактных нагрузок на рабочие поверхности инструмента. Измеряя совместное действие на деталь силового и теплового факторов, расчетным методом можно определить параметры качества поверхностного слоя детали, которые формируются в процессе обработки [1]. Подобрав необходимое значение силы резания, можно обеспечить требуемую точность обработки нежестких деталей.

Решение задач, связанных с управлением силой резания, актуально для научно-исследовательских лабораторий учебных заведений, организаций, занимающихся разработкой станков и режущих инструментов, опытно-технологических лабораторий (ОТЛ) машиностроительных предприятий и др. В перечень деятельности ОТЛ заводов входит определение режимов резания, обеспечивающих требуемое качество детали, высокую производительность обработки. Задача обеспечения максимальной размерной стойкости режущего инструмента или, что более актуально, максимальной производительности обработки решается наиболее эффективно не путем статистических наблюдений за влиянием режимов обработки на износ инструмента, а посредством комплексной оценки температурно-силового фактора, воздействующего на деталь и инструмент. Поэтому использование динамометров и методик обоснованного назначения режимов резания позволит разрабатывать наукоемкие технологические процессы изготовления деталей, где качество и себестоимость изделия закладываются и обеспечиваются в соответствии с намеченной стратегией производства, а не получаются постфактум.

С технической стороны измерение силы резания при механической обработке уже давно не является сложной задачей. Однако современный уровень развития науки и техники предъявляет высокие технико-эксплуатационные требования к измерительным динамометрическим системам.

Среди них можно отметить следующие.

- Высокая точность определения силы резания с погрешностью измерений в пределах  $\pm 2\%$ . Возможность исследования как динамических, так и статических процессов.

- Определение силы резания в пределах 10...50 кН.
- Возможность подключения динамометра к персональному компьютеру, визуализация регистрируемых данных с последующим их сохранением в файл, допускающий обработку данных средствами стороннего программного обеспечения. Устойчивость регистрируемого сигнала к помехам. Возможность установки динамометра на современные станки с различной системой крепления резцедержателя, в том числе и в револьверные головки станков с ЧПУ.
- Компактность и герметичность корпуса динамометра, допускающая обработку с применением СОТС. Высокая жесткость упруго-демпферной системы динамометра и её способность к подавлению вибраций инструмента.

В настоящее время отечественная промышленность не выпускает динамометры для измерения сил резания. Наиболее часто используемым прибором является УДМ-600 доставшийся от советского прошлого динамометр, успешно работающий не один десяток лет. Однако, как показал анализ, УДМ-600 не отвечает всем современным требованиям к измерительным динамометрическим системам, а при поломке заменить его просто нечем. Зарубежные аналоги динамометров отличаются высокой стоимостью, сопоставимой со стоимостью малобюджетного металлорежущего станка.

Специалистами малого инновационного предприятия ООО «Технолог», учредителем которого является ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», разработан динамометр *Дина-Z* (рисунок 1) [4].

Однокомпонентный динамометр *Дина-Z* предназначен для количественной оценки тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$ , возникающей при точении резцами на токарном станке.

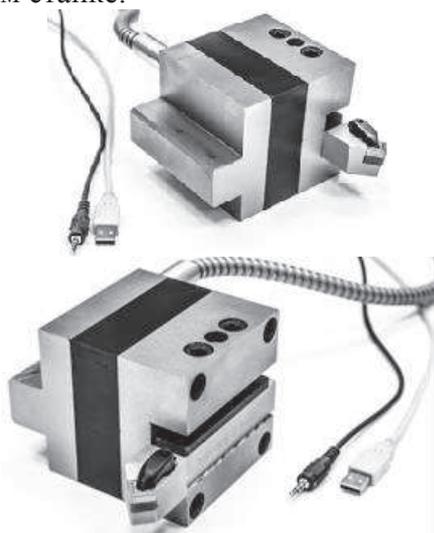


Рисунок 1. Динамометр *Дина-Z* для измерения силы резания (с ручным управлением)

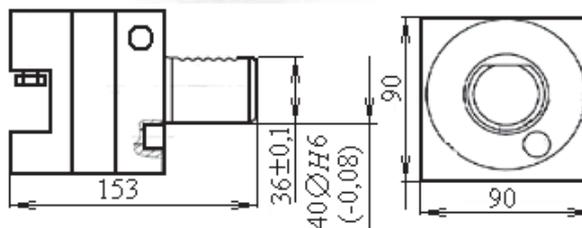
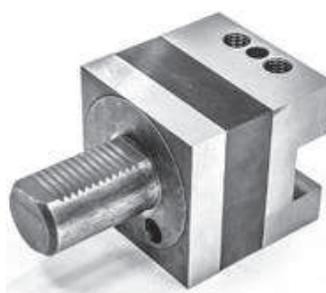


Рисунок 2. Исполнение 1 для станков с ЧПУ, оснащенных револьверной головкой: *а* – фото, *б* – эскиз. Хвостовик выполнен в соответствии с ГОСТ 24900-81 или DIN 69880

#### Область применения

Научно обоснованное определение режимов обработки с целью создания наукоёмких процессов механической обработки. Создание учебных стендов для проведения практических и лабораторных работ. Проведение научных исследований в области процессов механической обработки. Использование в составе адаптивных систем управления процессом обработки.

#### Отличительные особенности [2]

Широкий диапазон измерения  $P_z$  от 10 до 3000 Н с допускаемой 100% перегрузкой. Возможность измерения как динамических, так и статических нагрузок. Защита внутренних элементов конструкции от попадания СОТС и стружки. Непосредственное подключение к любому ПК, оснащённому звуковой картой. Многофункциональное программное обеспече-

ние с удобной визуализацией, интерфейсом и возможностью сохранения результатов измерения. Экспресс-калибровка по двум точкам. Силочувствительный элемент – пьезокварцевые пластинки, обеспечивающие высокую точность измерений и термостабильность.

Конструктивно динамометр *Dyna-Z* может быть выполнен в одном из двух вариантов: с возможностью размещения в револьверной головке современного станка с ЧПУ (рисунок 2) и на универсальных станках с ручным управлением (рисунок 1).

Информация о величине нагрузки кодируется контролером динамометра в импульсную последовательность, которая поступает на вход звуковой карты компьютера и с помощью специальной программной процедуры преобразуется в текущее значение силы  $P_z$ . Полученные данные отображаются на мониторе в режиме реального времени, а также могут быть сохранены в форматах \*.csv и \*.txt для дальнейшей обработки средствами стороннего ПО. Главное диалоговое окно программного обеспечения *Dyna-Soft*, на котором отображаются регистрируемые динамометром значения силы, приведено на рисунке 3.

Динамометр *Dyna-Z* представляет собой самодостаточную измерительную систему, для функционирования которой не требуется дополнительного источника питания, тензометрической станции или платы сбора данных. Всё, что нужно для начала работы с *Dyna-Z* – подключить динамометр к обычному персональному компьютеру или ноутбуку и запустить программное обеспечение (рисунок 3, 4).

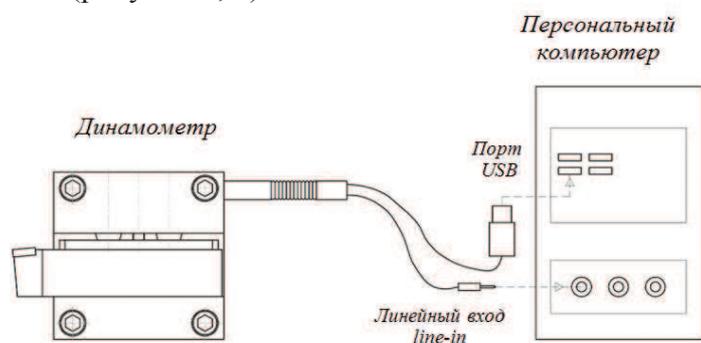


Рисунок 3. Схема подключения динамометра *Dyna-Z*

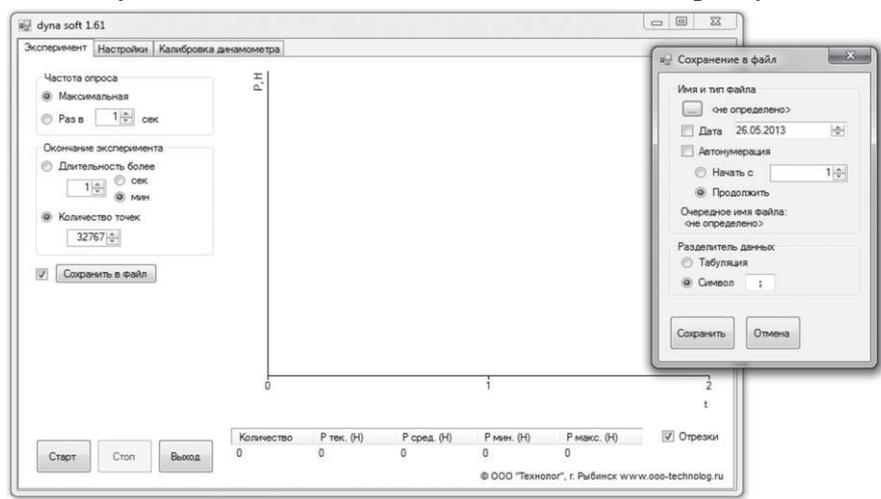


Рисунок 4. Главное окно визуализации регистрируемых данных и настройки их сохранения в файл

Высокая точность измерений динамометром *Dyna-Z* обеспечена тем, что упруго-демпферная система прибора представляет собой монолитную конструкцию, в которой минимизировано количество деталей и стыков поверхностей, полностью отсутствуют пары трения. Упругий элемент имеет высокую жесткость в направлении действия радиальной и осевой составляющей силы резания. По данным производителя, гистерезис и нелинейность характеристики преобразования используемых силоизмерительных пьезокварцевых пластинок не превышают значения 0,02% от предела измерения, временной дрейф нуля при номинальной нагрузке, соответственно, не превышает 0,01%/час, температурный уход показаний

не более 0,2% на 10 °С. Силоизмерительные пластинки расположены внутри герметичного корпуса и работают при постоянных температурных условиях, в которых производилась их калибровка. На разработанный динамометр подана заявка на полезную модель, получен приоритет.

Приведенные данные показывают, что технико-эксплуатационные характеристики динамометра соответствуют современным требованиям.

Для подтверждения заявленных характеристик прибора была проведена серия экспериментов.

### Испытание динамометра *Dyna-Z*

Перед испытанием динамометра *Dyna-Z* была произведена его калибровка для получения паспорта калибровки, который сохраняется в виде файла для каждого конкретного динамометра. Пользователь может проводить любое необходимое количество калибровок. Причем, чем точнее эталонный динамометр и схема калибровки, тем точнее калибровочная функция динамометра.

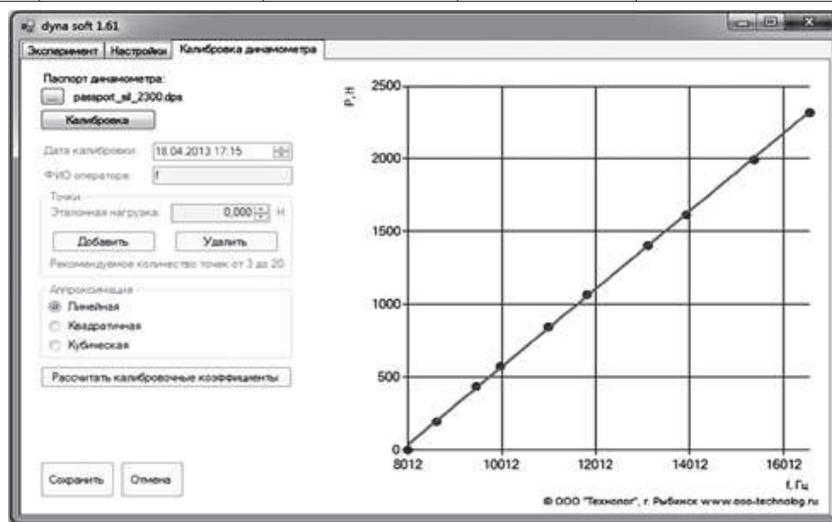
Калибровка произведена на станке при помощи специального приспособления для механического крепления эталонного серийно выпускаемого электронного динамометра ДОУ-3-5И, производитель ООО «Пет-Вес» ([http://petves.com/dinamometrydor\\_dos\\_dou](http://petves.com/dinamometrydor_dos_dou)). В результате калибровки получены 2 паспорта для разных диапазонов сил резания: *passport\_2300\_sil* – диапазон нагрузок 0...2300 Н, *passport\_1000\_sil* – диапазон нагрузок 0...1000Н.

После калибровки для проверки погрешности измерений динамометра было проведено сопоставление показаний динамометра *Dyna-Z* и показаний эталонного динамометра ДОУ-3-5И при нагружении различными силами  $P_z$ , Н (таблица 1).

Таблица 1

**Сопоставление показаний динамометра *Dyna-Z* после калибровки и показаний эталонного динамометра ДОУ-3-5И**

№	Нагрузка ДОУ-3-5И, Н	Нагрузка Dyna-Z, Н	Разница показаний $\Delta$ , Н	Погрешность $\Delta\%$ , отн.
1	1689	1698	9	0,53
2	1067	1071	4	0,37
3	1209	1210	1	0,08
4	495	478	-17	3,43
5	603	591	-12	1,99
6	1172	1154	-18	1,54
7	1865	1850	-15	0,80
8	898	888	-10	1,11
9	1368	1373	5	0,37



**Рисунок 5. График калибровки динамометра**

Как видно из данных таблицы 1, относительная погрешность измерений силы  $P_z$  дина-

мометром *Dyna-Z* при статических испытаниях не превысила 2...3%. Отображаемый средствами программного обеспечения *Dyna-Soft* график калибровки для паспорта *passport\_2300\_sil* приведен на рисунке 5.

После калибровки динамометра *Dyna-Z* были произведены эксперименты по измерению силы резания на токарном универсальном станке *NL-26* (рисунок 6).

Цель экспериментов – оценить способность динамометра *Dyna-Z* определять силы резания и их динамическое изменение для определения износа инструмента в процессе длительного точения.

Определение силы резания  $P_z$  в процессе длительного точения является технически сложной задачей. Квазистатичные процессы могут быть отслежены не всеми динамометрами, вследствие появления гистерезиса и температурно-силовых деформаций упруго-демпферной системы динамометра, что увеличивают погрешность измерений до значений изменения силы  $P_z$ .

Исходные данные для экспериментов: инструментальный материал – твердый сплав Т130 (АЛГ), геометрия пластины – *SNMG 120408*, обрабатываемый материал – ЭК26(05X12Н2М2К3АФ).

Режимы обработки: глубина резания  $t = 0,5\text{мм}$ ; подача  $S = 0,2\text{мм/об}$ ; скорость резания  $v = 92\text{м/мин}$ .



Рисунок 6. Общий вид экспериментальной установки

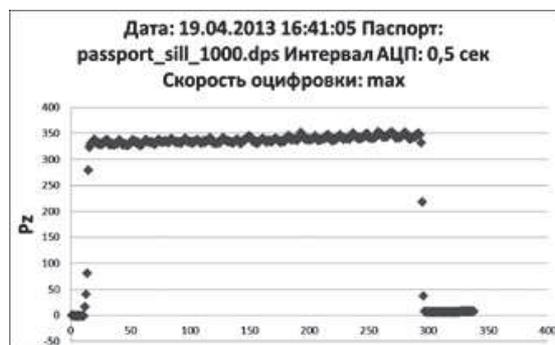


Рисунок 7. Увеличение силы  $P_z$  при точении

Обработка выполнялась за один непрерывный проход, путь резания составил  $L = 260\text{ м}$ . На рисунке 7 приведены полученные значения силы резания  $P_z$  после обработки данных в программе *Microsoft Excel*.

Начальное и конечное значение силы резания соответственно  $P_{\text{нач}} = 331\text{ Н}$ ,  $P_{\text{кон}} = 345\text{ Н}$ , увеличение силы  $\Delta P_z = 14\text{ Н}$ .

Как видно из проведенного эксперимента динамометр *Dyna-Z*, в сложных условиях резания труднообрабатываемого материала показал высокую способность к регистрации сил резания, а удобство последующей обработки полученных данных позволило быстро получить результаты.

### Выводы

1. Техничко-эксплуатационные характеристики динамометра *Dyna-Z* соответствуют современным требованиям. Технические характеристики динамометра позволяют регистрировать изменение сил резания  $P_z$ , обусловленное износом инструмента в процессе длительного точения.
2. Использование динамометров *Dyna-Z* в совокупности с методиками обоснованного назначения режимов резания позволит разрабатывать наукоемкие технологические процессы изготовления деталей.

### Литература

1. Определение влияния наноструктурированных покрытий режущего инструмента на параметры качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей / Безъязычный В.Ф., Тимофеев М.В., Фоменко Р.Н., Шустер Л.Ш.: Упрочняющие технологии и покрытия, 2011, № 11, с. 3-7.

2. Влияние наноструктурированных покрытий инструмента на оптимальную скорость резания при механической обработке точением/ Безъязычный В.Ф., Тимофеев М.В., Фоменко Р.Н: Справочник. Инженерный журнал, 2012, № 8, с. 38-43.
3. Пат. 131157. Российская Федерация, МПК G01L 5/16. Однокомпонентный динамометр для измерения тангенциальной составляющей силы резания при точении / Тимофеев М.В., Татаринцов А.Ю., Фоменко Р.Н. / заявитель и патентообладатель Рыбинский гос. авиационный технический университет, Общество с ограниченной ответственностью ООО «Технолог». – № 2012152761/28; заявл. 06.12.2012; опубл. 10.08.2013, Бюл. № 22. – 2 с.

### **Повышение сопротивления усталости деталей технологическими методами**

к.т.н. Урядов С.А.  
РГАТУ имени П. А. Соловьева  
8(4855) 222-091 [tadiom@rsatu.ru](mailto:tadiom@rsatu.ru)

*Аннотация.* В статье проанализировано влияние технологических условий ма-  
ятникового и глубинного шлифования на параметры сопротивления усталости,  
предложена эффективная методика обработки деталей с обеспечением требуемого  
уровня предела выносливости.

*Ключевые слова:* шлифование, сопротивление усталости, эксплуатацион-  
ные свойства

В современном машиностроении всю большую роль играет обеспечение требуемого качества выполнения деталей. Для разных отраслей промышленности доминирующими показателями качества детали могут пониматься различные ее эксплуатационные характеристики. Так, для пищевой и химической промышленности основной показатель качества – химическая и коррозионная стойкость, для металлургии – высокая прочность и теплостойкость и т.д. Часто требуется некая совокупность показателей качества. Например, для автомобильной промышленности наряду с высокими требованиями по себестоимости детали доминирующими являются сопротивление усталости, теплостойкость, масло- и бензостойкость, жесткость, прочность, герметичность и т.д.

Однако существуют отрасли промышленности, где перед деталью ставятся высочайшие требования по качеству, которые сильно усложняют технологический процесс изготовления и повышают стоимость детали. Такими отраслями являются атомная энергетика, авиация и космонавтика.

Механическая обработка (точение, фрезерование, шлифование, полирование и т.д.) вызывает пластическую деформацию, нагрев и структурные превращения в поверхностных слоях материала обрабатываемой детали и сопровождается появлением неравномерных по глубине остаточных деформаций и напряжений. В зависимости от того, какое явление преобладает (пластическая деформация, нагрев или структурные превращения), поверхностный слой может отличаться различными глубиной и степенью наклепа, величиной и знаком остаточных напряжений. Эти параметры, а также шероховатость поверхности, в основном характеризуют качество поверхностного слоя и оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства деталей машин.

Так как детали авиационной промышленности являются ответственными, для обеспечения работоспособности часто требуется высокая точность и низкая шероховатость, то одним из основных методов, завершающих технологический процесс изготовления детали, является шлифование.

Помимо высокой точности и низкой шероховатости, шлифование отличается также высокой производительностью и низкой себестоимостью, хорошо масштабируется и автоматизируется.

Одним из важнейших эксплуатационных свойств деталей является сопротивление усталости – способность деталей машин сопротивляться разрушению в течение определен-