

*На правах рукописи*



**Киселев Денис Иванович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА  
РОТАЦИОННОГО ТОЧЕНИЯ МНОГОГРАННЫМИ РЕЗЦАМИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

магистерской диссертации на соискание степени  
магистра по направлению Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств (15.04.05)  
магистерская программа – **Автоматизация конструкторско-  
технологического проектирования** (15.04.05.01)

Красноярск 2017

Работа выполнена на кафедре «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» Политехнического института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет».

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук, доцент Индаков Николай Степанович

**Рецензент:** Зданович Сергей Сергеевич, заместитель главного технолога АО «НПП «Радиосвязь»

Защита состоится «28» июня 2017 г. в 9 ч. 00 мин. В ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Ак. Киренского 26, ауд. Д 5-30

С авторефератом магистерской диссертации можно ознакомиться на сайте СФУ <http://edu.sfu-kras.ru/engineering/special> и в архиве открытого доступа: <http://elib.sfu-kras.ru>

**Руководитель магистерской программы**

кандидат технических наук,  
профессор



М. П. Головин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В области токарной обработки наружных цилиндрических поверхностей наиболее широко применяются следующие методы: точение вершинными резцами, безвершинными резцами, ротационными с самовращением или принудительным вращением. Каждый из указанных методов имеет свои рациональные области применения. Однако эти традиционные методы механической обработки имеют существенные ограничения при обработке труднообрабатываемых материалов, вызванные недостаточной стойкостью режущего инструмента вследствие образования сливной стружки, что приводит к перегреву инструмента и заготовки, требует использования дорогостоящих и токсичных СОТС. Это не позволяет применять высокие скорости резания, снижает производительность процессов, особенно при обработке крупногабаритных валов и требуют разработки альтернативных по кинематике методов формообразования. Метод ротационного точения многогранными резцами является перспективным способом обработки вязких, сложнолегированных, труднообрабатываемых сталей и сплавов, в том числе на основе титана, широко используемых в аэрокосмическом и транспортном машиностроении.

Несмотря на значительный объем публикаций в области ротационного точения, разработанный в Красноярском политехническом институте СФУ принципиально новый по кинематике метод ротационного точения многогранными резцами (РТМР) остается крайне мало изученным как теоретически, так и экспериментально. Поэтому, для развития и практической реализации этого метода необходимо проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований по оптимизации силовых параметров.

**Цель работы** – Исследование силовых характеристик процесса ротационного точения многогранными резцами.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели определены следующие основные задачи:

1. Разработать экспериментальную установку для исследования влияния конструкторско-технологических параметров на силу резания и крутящий момент, возникающий при механической обработке методом ротационного точения многогранными резцами;

2. Расчетными и экспериментальными методами определить функциональные взаимосвязи между режимами обработки и силами резания;

3. Исследовать влияние режимов резания при РТМР ( $t$ ,  $S_{np}$ ,  $S_{кр}$ ,  $V$ ) на температуру в зоне резания;

4. Представить расчетные зависимости для определения силы резания и крутящего момента при механической обработке методом ротационного точения многогранными резцами.

**Объект исследования** – процесс ротационного точения многогранными резцами наружных цилиндрических поверхностей.

**Предмет исследования** – силовые и температурные характеристики процесса РТМР.

**Методы исследований.** Результаты, представленные в работе, получены путем проведения теоретических исследований с использованием современного программного обеспечения и средств вычислительной техники (КОМПАС-3D, MatCAD, Microsoft Excel). Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях с использованием методик, приборов (динамометр Токарева) и установок для определения силовых зависимостей процесса резания. Контроль температуры на поверхностях инструмента и стружки в зоне резания выполняли бесконтактным методом с использованием тепловизора модели testo 875-1.

**Достоверность полученных результатов.** Основные результаты, выводы и положения, сформулированные в диссертационной работе, обоснованы и подтверждены результатами экспериментов.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

- обоснована кинематическая схема и разработана рациональная конструкция измерительного инструментального узла для РТМР позволяющего определить силу резания и крутящий момент действующий на режущую часть инструмента в процессе обработки.

- получены новые данные о влиянии технологических параметров метода РТМР (режимов резания) на силовые характеристики процесса; представлены эмпирические расчетные формулы для назначения рациональных режимов обработки методом РТМР.

**Личный вклад автора** состоит в постановке задач диссертации, разработке экспериментального оборудования, проведении теоретических и экспериментальных исследований, обработке полученных результатов, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту, подготовке публикаций по данной теме.

**Практическая значимость работы**

1. Разработанные расчетные формулы для выбора рациональных режимов резания являются основой для проектирования новых инструментальных узлов, технологических процессов с использованием РТМР.

2. Разработана конструкция инструментального узла позволяющая измерять составляющие силы резания действующие на режущую часть инструмента.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Методика определения и средства измерения силовых характеристик процесса РТМР;

2. Совокупность данных о влиянии конструкторско-технологических параметров метода РТМР (режимы резания) на силовые характеристики процесса;

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на:

1. XIX Международной научно-практической конференции «Решетневские чтения» - г. Красноярск (2015 г.),
2. Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспектив Свободный -2016» - г. Красноярск (2016),
3. XX Международной научно-практической конференции «Решетневские чтения» - г. Красноярск (2016 г.).

#### **Публикации.**

По материалам диссертации опубликовано 3 работы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** изложена актуальность темы, представлено краткое содержание диссертации, сформулированы цель, научная новизна и практическая ценность работы.

**В первом разделе** представлен аналитический обзор отечественной и зарубежной литературы и патентные исследования посвященные вопросам кинематики процесса резания, силовых зависимостей и в области известных методов лезвийной обработки наружных цилиндрических поверхностей, а также определены задачи исследования. В работах Е.Г. Коновалов, В.Ф. Бобров, П.И. Ящерицын, В.Г. Шаламов, Н.Н. Зорев, Г.И. Грановский, М.И. Клушин, И.Дж.А. Армарега, Tero Stjernstoff и другие отечественных и зарубежных исследователей выявлено влияние кинематики на условия резания.

По результатам анализа существующего состояния в области исследований было показано, что известные традиционные методы точения: вершинными и безвершинными резцами, ротационными с самовращением или принудительным вращением имеют ряд ограничений при обработке вязких и пластичных материалов, легированных и жаропрочных сталей (относительно низкая стойкость вершинных и косоугольных резцов; использование дорогостоящих СОТС; образование сливной стружки; ограниченная скорость главного движения; недостаточная жесткость длинных, неуравновешенных валов). А при использовании торцевого фрезерования возникают большие радиальные силы, приводящие к прогибу обрабатываемого вала и, как результат, возникающие вибрации. А прерывистый характер резания неизбежно приводит к формированию кинематической волнистости, что снижает качество обработанной поверхности.

Анализ литературного материала показал, что вышеуказанные проблемы могут быть решены на основе сочетания элементов

безвершинного косоугольного точения основным достоинством, которого является движение срезаемого слоя вдоль режущей кромки и метода ротационного точения основным достоинством, которого является постоянное обновление участков режущей кромки, что приводит к хорошему охлаждению и, следовательно, повышению стойкости инструмента, обеспечение требуемой скорости резания осуществляется путем требуемого количества оборотов резца, а вращение обрабатываемого вала является круговой подачей.

На основании проведенного анализа и в соответствии с поставленной целью были сформулированы задачи по обоснованию конструкций модулей и резцов, а также методики проведения экспериментальных исследований РТМР.

**Во-втором разделе** представлены методы расчета составляющей силы резания  $P_z$  и крутящего момента. Принята схема инструментального модуля и разработана методика расчета силовых характеристик.

На стадии отработки методики измерений в соответствии со схемой и конструктивным исполнением измерительного инструментального узла, были определены нагрузочные расчетные формулы и проведена тарировка в координатах “нагрузка – деформация”.

На основании разработанной схемы инструментального узла (рис. 1) можно рассчитать основные динамические и кинематические параметры, которые в дальнейшем будут использованы при проведении однофакторных экспериментов.

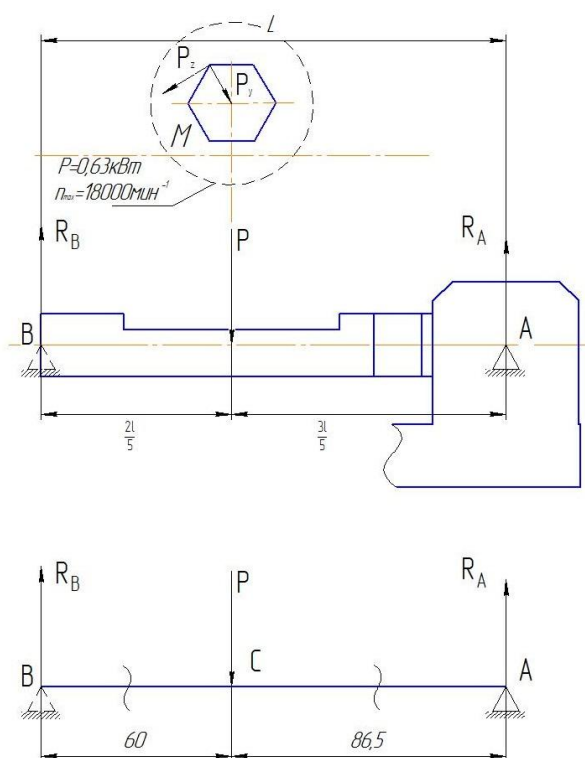


Рисунок 1 – Расчетная схема системы сил измерительного узла.

Главная составляющая силы резания находится по формуле:

$$P_z = \frac{P}{\cos \varphi}; \quad (1)$$

где  $P$  – сила действующая на плиту.

Для определения силы  $P$  необходимо выразить ее через силу действующую на опору  $R_B$ , которой является механический динамометр сжатия.

$$\begin{cases} R_B = \frac{86,5P}{146,5} = 0,59P \\ R_A = \frac{60P}{146,5} = 0,41P \end{cases} \Rightarrow R_B = 0,59P \Rightarrow P = \frac{R_B}{0,59}; \quad (2)$$

Угол наклона главной составляющей силы резания относительно силы действующей на плиту рассчитывается по формуле:

$$\varphi = 90^\circ - \eta; \quad (3)$$

По результатам тарировки (рис. 2) получена зависимость цены деления динамометра от нагрузки, которая описывается уравнением:  $y = 1,3216x + 0,8134$ .

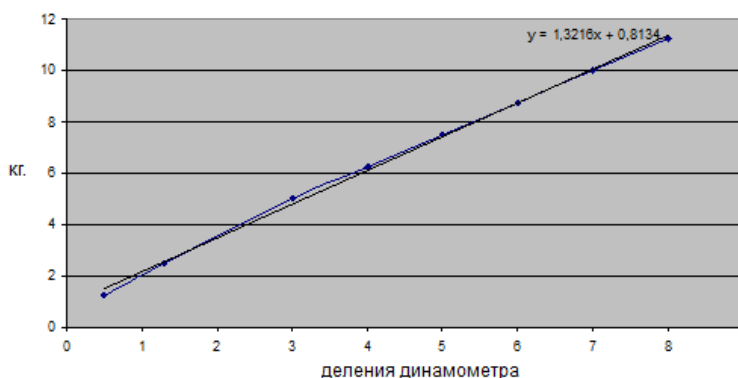


Рисунок 2 – Тарировочный график для определения сил резания.

При определении силовых зависимостей  $P_z, P_x, P_y = f(t, S_{пр}, S_{кр}, V_p)$  как правило, используют методы однофакторных экспериментов, когда варьируется только один параметр процесса резания, а все остальные остаются постоянными. Конечной целью проведения исследований является установление функциональных связей между независимыми и зависимой переменными и описание этой связи математической формулой. Независимая переменная  $x$  – один из параметров режимов резания  $t, S_{пр}, S_{кр}, V_p$ . Зависимой переменной  $y$  является одна из составляющих сил резания  $P_z, P_x, P_y$ . Число наблюдений (дублей) выбиралось равным пяти,

что соответствует уровню надежности 0,9 (доверительной вероятности). Известно, что при изменении какого-либо параметра режимов резания составляющая силы резания монотонно растет или убывает. Такие зависимости хорошо изображаются кривыми параболического или гиперболического типа. Данные кривые наиболее удобно аппроксимировать степенной функцией вида  $y=Cx^k$ , которая представляет из себя прямую линию при построении в декартовых координатах с функциональными логарифмическими шкалами. Определение численного значения показателя степени  $k$  и постоянной  $C$  производилось аналитически при помощи программного продукта Microsoft Excel.

**В третьем разделе** представлена конструкция измерительного инструментального узла для измерения силы резания и крутящего момента.

Устройство для измерения силы резания и крутящего момента (рис. 3) состоит из неподвижного основания, подвижной части, с исследуемым объектом (ротационным резцом), соединенной с основанием с помощью упругого элемента. Подвижная часть выполнена в виде двухопорной балки, которая одной стороной закреплена на упругом элементе, а другой стороной соединена с неподвижным основанием с помощью шарнира. Упругий элемент выполнен в виде пружины растяжения-сжатия, на которой установлен индикатор часового типа (динамометр Токарева).

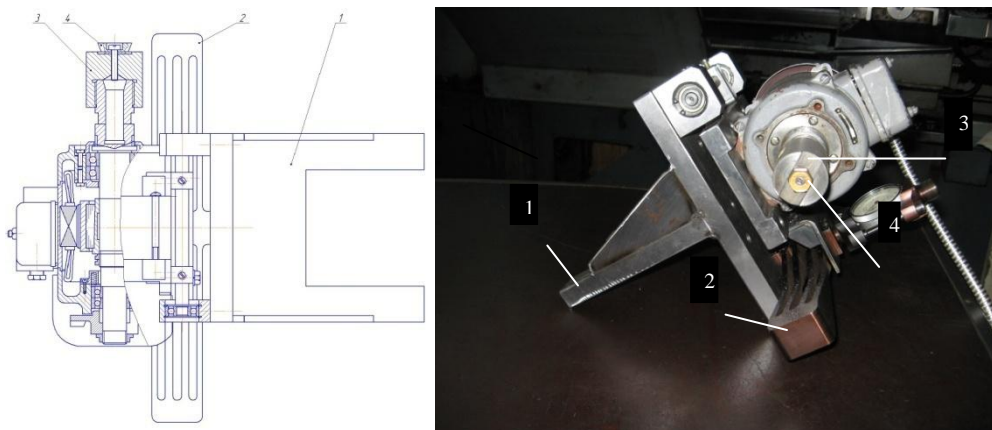


Рисунок 3 – Измерительный инструментальный узел: 1 – кронштейн; 2 – динамометр; 3 – оправка; 4 – резец;

Общий вид многогранного резца для ротационного точения наружных поверхностей деталей типа тел вращения спроектированный и изготовленный на основе разработанных КТР представлен на рис. 4. Данная конструкция ротационного резца была разработана в ПИ СФУ.



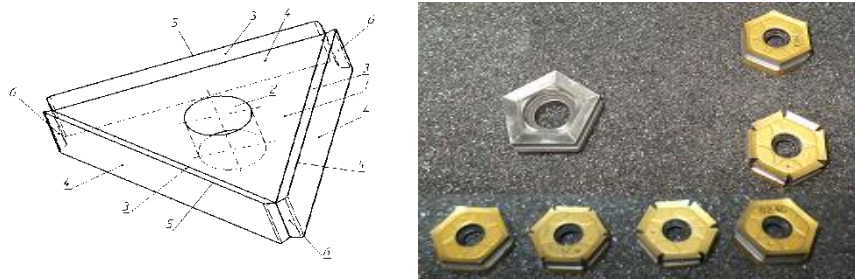


Рисунок 4 - Ротационный резец

Ротационный резец представляет собой многогранное тело 1, например трехгранное (рис 4), с посадочным отверстием 2 и режущей частью, состоящей из  $N$  зубьев. Каждый зуб содержит заднюю 3 и переднюю 4 поверхности, которые образуют между собой прямолинейную режущую кромку 5. Сформированные на каждом зубе режущие кромки 5, размещенные в плоскости, перпендикулярной оси вращения ротационного резца, образуют между собой режущий многоугольник. Передняя 4 поверхность зуба выполнена под углом  $\gamma$  к плоскости резания от 2 до 5 градусов. Также на вершинах многогранного тела 1 резца выполнены разделительные канавки 6 с шириной равной размерам шлифовального круга. В качестве материала для ротационного резца использовался твердый сплав Т15К6 при обработке образцов из стали, а ВК6 и ВК6ОМ при обработки алюминиевых сплавов.

Резец устанавливается с помощью инструментальной оправки на вал электрошпинделя.

Разработанная конструкция измерительного инструментального узла позволяет использовать его как для обработки методом РТМР, так и одновременно измерять (контролировать) силовые характеристики.

**Четвертый раздел** посвящен экспериментальному исследованию сил резания и температуры в зоне резания в зависимости от технологических параметров (режимов резания).

Экспериментальные исследования проводились на токарно-винторезном станке модель 16К20 с использованием инструментального модуля состоящего из электрошпинделя, кронштейна, оправки, и специально переточенных типовых многогранных твердосплавных пластин (ротационных резцов) рис. 5.

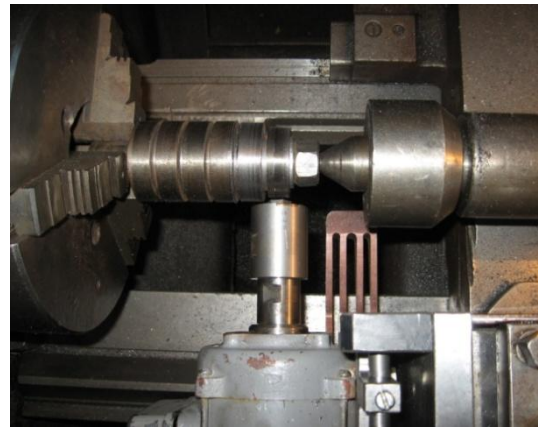
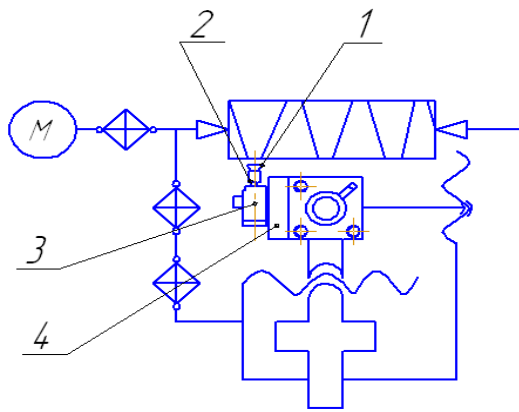


Рисунок 5 – Вариант исполнения инструментального модуля для ротационного точения на станке 16К20: кинематическая схема установки на токарный станок: 1 – твердосплавная пластина; 2 – оправка; 3 – электрошпиндель Э-18/0,63; 4 – кронштейн,

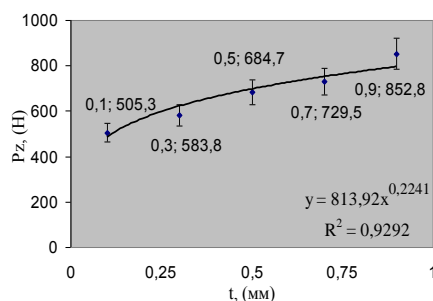
Исследования проводились на специальных образцах установленных на оправку. Материал образцов сталь 45. Инструментальный материал пластин Т15К6.

Диапазон изменения параметров составил: продольная подача (от 0,2 до 1 мм/об), круговая подача (от 59,3 до 188,4 м/мин), скорость резания (от 310,8 до 932,5 м/мин), глубина резания (от 0,1 до 0,9 мм). Геометрия инструмента не менялась.

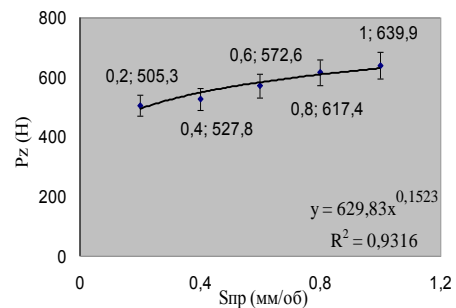
Скорость вращения инструмента изменяется в диапазоне от 6000 до 18000 оборотов электрошпинделя путем изменения частоты питающего напряжения по средством частотного преобразователя Альтивар 31.

Значения продольной подачи определяется соответственно настройкой коробки подач станка 16К20, а круговая подача соответствующей настройкой коробки скоростей станка.

Для того чтобы установить связь между одним из параметров режимов резания и изменением зависимой переменной составляющих сил резания проводим однофакторный эксперимент, результаты которых приведены на графиках (рис 6).



а)



б)

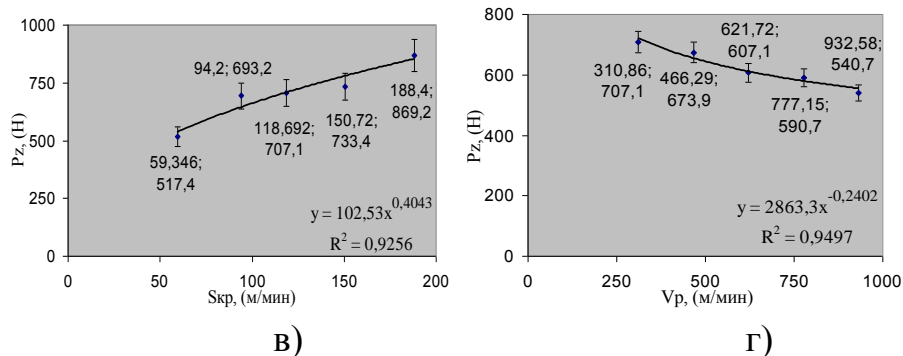


Рисунок 6 – Изменение главной составляющей силы резания  $P_z$  от режимов резания при ротационном точении многогранными резцами:

- а) – глубины резания  $t$  б) – продольной подачи  $S_{np}$   
 в) - круговой подачи  $S_{кр}$  г) – скорости резания  $V_p$

При увеличении глубины резания и круговой подачи растет площадь сечения срезаемого слоя, что вызывает возрастание всех составляющих сил резания. Однако результаты проводимых экспериментальных исследований при различных условиях обработки ротационным точением свидетельствуют, что во всех случаях глубина резания на составляющие силы резания оказывает наибольшее влияние, нежели круговая подача.

Характер получившихся зависимостей свидетельствует о том что с увеличением глубины резания, продольной и круговой подачи и уменьшении количества оборотов резца, составляющая силы резания  $P_z$  увеличивается. Это связано с увеличением толщины срезаемого слоя и незначительным увеличением рабочей длины режущей кромки.

На основе обработки экспериментальных данных получена математическая зависимость главной составляющей сил резания от режимов обработки:

$$P_z = 662,12 \cdot \frac{S_{np}^{0,1523} \cdot S_{кр}^{0,4043} \cdot t^{0,2241}}{V_p^{0,2402}} \quad (4)$$

Момент сопротивления резанию, называемый крутящим моментом резания:

$$M_{кр} = \frac{P_z \cdot \rho_{max}}{1000} \quad (5)$$

Эффективная мощность привода инструментального узла:

$$N_e = \frac{P_z \cdot V_p}{6120} \quad (6)$$

Анализ влияния режимов обработки на изменение величины силы резания и крутящего момента действующих на резец при ротационном точении многогранными резцами показывает на соответствующий характер при традиционных методах обработки, однако отделение стружки

со сдвигом вдоль режущей кромки и переменное сечение стружки приводят к снижению силовых характеристик.

При данном методе точения составляющие силы резания изменяется по величине и направлению. Сила резания будет максимальной при врезании резца в заготовку на участке лезвия находящимся на линии оси центров, так как нормальная сила  $N$  будет максимальной вследствие наибольших значений толщины и ширины срезаемого слоя.

Распределение температуры в зоне резания исследовали бесконтактным методом с помощью тепловизора модели testo 875-1. Компьютерная обработка термограмм показала: температура на поверхности срезаемого слоя материала составляет  $60^{\circ}\text{C}$ - $110^{\circ}\text{C}$ . температура режущего лезвия инструмента на входе в зону резания от  $30$  до  $40^{\circ}\text{C}$  на выходе из нее  $40^{\circ}\text{C}$  -  $60^{\circ}\text{C}$ . Характер распределения температуры показывает, что основное тепло уходит в стружку, зона непосредственно рабочих локальных участков режущей кромки постоянно обновляется и одновременно с высокой скоростью вращения успевает охлаждаться, что позволяет отказаться от использования дорогостоящих и токсичный СОТС. Температура в зоне резания приближается к стабильной на протяжении всего процесса обработки.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

По результатам комплекса теоретических и экспериментальных исследований сделаны следующие выводы:

1. На основании кинематической схемы разработана конструкция измерительного инструментального узла, позволяющая реализовать новый метод ротационного точения многогранными резцами и одновременно измерять силовые характеристики.

2. Получены эмпирические зависимости величины силы резания от режимов резания, при ротационном точении многогранными резцами, позволяющие с наибольшей эффективностью использовать новый метод РТМР.

3. Изучен характер распределения тепла в зоне резания. Выявлено удовлетворительная охлаждение ротационного резца без использования СОТС. Это является предпосылкой для повышения эксплуатационной стойкости инструмента и как результат повышении качества обработки.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Киселев Д.И. Исследование процесса ротационного точения многогранными резцами/ Н.С. Индаков, А.С. Бинчуров, Ю.И. Гордеев, Д.И. Киселев// 19-я Международной научно-практической конференции «Решетневские чтения» - г. Красноярск (2015 г.)

2. Киселев Д.И. Исследование тепловых явлений в процессе ротационного течения многогранными резцами/ Н.С. Индаков, А.С. Бинчуров, Ю.И. Гордеев, Д.И. Киселев// 20-я Международной научно-практической конференции «Решетневские чтения» - г. Красноярск (2016 г.)

3. Киселев Д.И. Экспериментальное исследование тепловых явлений при ротационном течении многогранными резцами/ Д.И. Киселев, А.С. Бинчуров// Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспективныи Свободный -2016» - г. Красноярск (2016)

