На правах рукописи

Бинчуров Александр Сергеевич

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ РОТАЦИОННОГО ТОЧЕНИЯ МНОГОГРАННЫМИ РЕЗЦАМИ

05.02.07 Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

г. Томск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент **Гордеев Юрий Иванович**

Официальные оппоненты:

Марков Андрей Михайлович - доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», заведующий кафедрой «Технология машиностроения»

Филиппов Андрей Владимирович – кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, младший научный сотрудник лаборатории физики упрочнения поверхности

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева» (г. Красноярск)

Защита состоится «12» мая 2017 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 003.038.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН) по адресу: 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4; e-mail: dvi@ispms.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФПМ СО РАН по адресу: 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4., а также на официальном сайте Института http://www.ispms.ru.

Автореферат разослан « » 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор Данилов В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В области лезвийной обработки наружных цилиндрических поверхностей известны следующие основные методы точения: вершинными резцами, безвершинными резцами, ротационными с самовращением или принудительным вращением, торцевое фрезерование. При всех достоинствах указанных методов они имеют ряд ограничений: относительно невысокую стойкость инструмента при повышенной скорости резания, образование сливной стружки при обработке заготовок из вязких и пластичных материалов, необходимость применения смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), низкие значения скорости резания и производительности при обработке крупногабаритных заготовок.

Исследуемый метод ротационного точения многогранными резцами (РТМР) имеет ряд преимущественных отличий. В его основу заложен принцип срезания слоя материала, при котором стружка сходит вдоль режущей кромки. Ее рабочие участки постоянно обновляются за счет вращения многогранного резца, что обеспечивает гарантированное дробление стружки, более благоприятные условия для теплоотвода из зоны резания, а также исключает необходимость применения СОТС, вследствие чего повышается качество обработки. Кроме того, в процессе РТМР реализуется повышение результирующей скорости резания за счет совмещения продольной и круговой подач (вращение заготовки), скорости главного движения (вращение инструмента), что гарантирует повышение производительности обработки в сравнении с известными способами. Использование приводного инструмента позволяет реализовать высокие скорости резания, независимо от технических характеристик станков и габаритов заготовки, то есть метод РТМР может быть широко использован в различных производственных условиях, в том числе для процессов формообразования в инструментальных узлах современных многоцелевых станков с ЧПУ и автоматизированных производствах. Для эффективной реализации нового метода РТМР в составе инструментальных модулей и технологий необходимо проведение детальных теоретических и экспериментальных исследований по оптимизации всех конструктивно-технологических параметров процесса.

Степень разработанности темы исследования. Проведенный на основе литературных и патентных исследований анализ методов ротационного точения наружных поверхностей тел вращения показал перспективность их использования благодаря возможности существенного увеличения стойкости режущего инструмента и производительности обработки. Существенный вклад в изучение вопросов кинематики процессов ротационного точения, влияния геометрических параметров и условий резания на деформационные и температурно-силовые характеристики, а также в разработку новых методов лезвийной обработки цилиндрических поверхностей из различных конструкционных материалов внесли Н.Н. Зорев, В.Ф. Бобров, Е.Г. Коновалов, Г.И. Грановский, Д.В. Кожевников, С.В. Кирсанов, М.И. Клушин, И.Дж.А. Армарего и другие отечественные и зарубежные исследователи.

Цель работы – разработка методов расчета и проектирования конструктивно-технологических параметров процесса ротационного точения многогранными резцами для повышения технико-экономической эффективности его применения.

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

1. Произвести теоретическое обоснование кинематической схемы, разработку методик расчета геометрических параметров режущей части инструмента и конструкции инструментального модуля для реализации метода ротационного точения многогранными резцами.

2. На основе аналитических методов разработать кинематические и геометрические модели формообразования в системе “инструмент – заготовка” и изучить особенности формирования стружки и профиля наружных цилиндрических поверхностей при РТМР.

3. Расчетными и экспериментальными методами установить влияние режимов резания при РТМР *(t, $S_{пр}$, $S_{кр}$, V)* на геометрию сечения среза и параметры шероховатости обработанной поверхности.

4. Исследовать влияние режимов резания при РТМР *(t, $S_{пр}$, $S_{кр}$, V)* на температуру в зоне резания.

5. Расчетными и экспериментальными методами определить функциональные взаимосвязи между режимами РТМР и силами резания.

6. Разработать рекомендации по практическому использованию метода ротационного точения многогранными резцами.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования выполнялись с использованием методов аналитической геометрии, учения о резании металлов, научных основ технологии машиностроения и учения об инженерии поверхности деталей машин, а также современных программных продуктов и средств вычислительной техники. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях с использованием методик, приборов и установок для определения силовых зависимостей процесса резания, характеристик деформации обрабатываемого материала и шероховатости обработанной поверхности. Определение параметров шероховатости поверхности производилось на профилометре-профилографе модели MarSurf M300. Контроль температуры на поверхностях режущего элемента инструмента и стружки в зоне резания выполняли бесконтактным методом с использованием тепловизора модели testo 875-1. Исследования напряженного состояния и прочности инструментальных узлов и материалов проводились с использованием программы «T-Flex Анализ». Анализ микроструктуры образцов и морфологии стружки выполнялся на растровых электронных микроскопах HITACHI TM 1000 и JEOL JSM-7001F. Обработка результатов экспериментальных исследований осуществлялся с использованием современных программных продуктов КОМПАС – 3D, Mathcad 14.0 и Microsoft Excel.

Достоверность полученных результатов. Сформулированные в диссертации положения, выводы и рекомендации обоснованы теоретическими решениями и экспериментальными данными, полученными в работе, не противоречат известным положениям технических и фундаментальных наук, базируются на корректном математическом аппарате, а также на доказанных однотипных выводах, предложенных авторами подобных исследований.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана кинематико-геометрическая модель, описывающая особенности процессов формообразования при РТМР, и на этой основе, предложены новые конструкции инструментальных модулей и многогранных ротационных резцов (Патент RU 2463130 C1).

2. Получены новые данные о влиянии технологических и конструктивных факторов (режимов резания, геометрических и кинематических параметров инструмента РТМР) на шероховатость поверхности и силы резания; на этой основе предложены полуэмпирические расчетные формулы для назначения рациональных режимов обработки методом РТМР.

3. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность повышения производительности обработки за счет увеличения результирующей скорости резания и интенсивности деформации срезаемого слоя в процессе РТМР, гарантированного дробления стружки, снижения температуры в зоне резания и на инструменте при одновременном повышении качества обработки.

Личный вклад автора состоит в постановке задач диссертации, обосновании аппаратуры и методик экспериментальных исследований, проведении теоретических и экспериментальных исследований, обработке полученных результатов, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту, подготовке публикаций по данной теме. Автором лично проведены теоретические и экспериментальные исследования технологии РТМР наружных цилиндрических поверхностей деталей машин из различных конструкционных материалов. Разработаны новые конструкции, изготовлены инструментальные модули и многогранные резцы, проведены их эксплуатационные испытания, разработаны рекомендации по практическому использованию метода РТМР.

Теоретическая значимость работы

Диссертационная работа вносит существенный вклад в развитие представлений о кинематико-геометрических особенностях деформационных и тепловых процессов формообразования срезаемого слоя стружки и поверхностей деталей при обработке новым методом РТМР.

Практическая значимость работы

Разработанные методики расчета геометрических параметров режущей части многолезвийного инструмента и полуэмпирические расчетные формулы для выбора рациональных режимов резания являются основой проектирования новых инструментальных узлов и технологических процессов с использованием РТМР.

Предложенные конструкции инструментального модуля метода РТМР и методики проведения исследований силовых и тепловых характеристик внедрены в учебный процесс при освоении дисциплин «Процессы и операции формообразования», «Технологическое обеспечение качества и надежности машин» и «Современные проблемы инструментального обеспечения машиностроительных производств».

Разработанные технологические процессы и регламенты использованы в производственных условиях АО “СИРЗ” (г. Красноярск) для обработки методом РТМР гребных валов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и валов для конвейеров из стали 40Х (для АО “Ачинский глиноземный комбинат”) с обеспечением повышения производительности до 2,5 раз в сравнении с базовым вариантом.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Кинематические схемы, методы расчета и проектирования инструментальных модулей для реализации метода ротационного точения многогранными резцами.

2. Установленные экспериментально и обоснованные теоретически закономерности влияния конструктивно-технологических факторов процесса РТМР (режимы резания, геометрические и кинематические параметры инструмента) на шероховатость поверхности, силы резания и разработанные на их основе методы управления качеством обработки.

3. Методика расчета рациональных режимов резания при РТМР для обеспечения повышения производительности, снижения температуры в зоне резания и шероховатости обработанной поверхности.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на 7-й и 8-й Международных научных конференциях «Интеллект и наука» - г. Железногорск (2012 г., 2013 г.), 9-ой Международной научно-практической конференции «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации» - г. Курск (2012 г.), 5-ой Международной научно-практической конференции «Техника и технологии» - Москва (2012 г.), 3-й Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в современной науке и технике» - г. Томск (2014 г.). 19-ой Международной научно-практической конференции «Решетневские чтения» - г. Красноярск (2015 г.), 9-й Международной научно-практической конференции «Современные проблемы машино-

строения» - г. Томск (2015 г.), 4-ой Международной конференции «Информационные технологии в промышленности и производстве» - г. Томск (2016 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 23 работы. Основное содержание изложено в 11 статьях, из них 7–в рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в перечень ВАК РФ; 4 – в журналах, включенных в библиографические базы данных цитирования Scopus.

Связь работы с Государственными программами и НИР. Работа выполнялась в рамках научных проектов и программ: проект РФФИ № 14-08-00508_а «Проектирование и исследование твердосплавных композитов, модифицированных наночастицами с повышенным уровнем механических и эксплуатационных свойств. Моделирование структуры и прогнозирование свойств» (2014 – 2016гг.); Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» Государственный контракт № 14.513.11.0039 (2013г.).

Автор выражает благодарность одному из разработчиков метода РТМР Индакову Николаю Степановичу за помощь в подготовке теоретических и экспериментальных исследований.

Структура и объем диссертационной работы. Работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 145 наименований и трех приложений. Всего 171 страница машинописного текста, включая 79 рисунков и 12 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

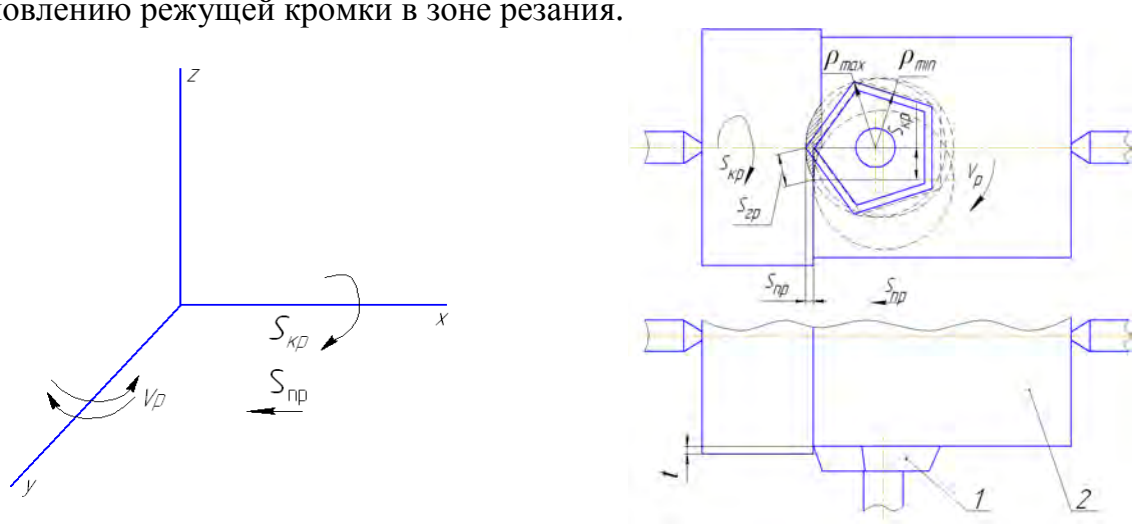
Во введении обоснована актуальность темы исследования, показана степень ее разработанности, определены цель и задачи, решение которых необходимо для ее достижения, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы и положения, выносимые на защиту, описаны методологии и методы исследования, представлена структура диссертации.

В первом разделе проведен критический анализ накопленных данных по результатам исследований и практическому применению специальных методов безвершинного косоугольного точения, ротационного точения с принудительным вращением и самовращением инструмента, а также торцевого фрезерования позволяющий утверждать, что ни один из представленных методов при обработке труднодеформируемых материалов и габаритных заготовок не позволяет обеспечить одновременно и высокую производительность, и требуемое качество обработки поверхности (вследствие относительно низкой стойкости вершинных и косоугольных резцов, образования сливной стружки, ограничениям по скорости резания, стойкости инструмента, необходимости использования СОТС, недостаточной жесткости длинных, неуравновешенных валов).

Существующие 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. Преимущественным отличием метода РТМР является постоянное обновление участков режущей кромки многогранного резца, что предотвращает ее перегрев, следовательно, способствует повышению стойкости инструмента. Повышение скорости резания обеспечивается за счет совмещения вращения многогранного резца и вращения обрабатываемого вала (круговой подачи). Несмотря на значительный объем публикаций в области ротационного точения, предлагаемый принципиально новый по кинематике метод РТМР остается крайне мало изученным как теоретически, так и экспериментально. На основании выявленных преимуществ и недостатков известных методов определены

перспективные направления для проведения теоретических и экспериментальных исследований, сформулированы цели и задачи работы.

Во втором разделе рассмотрены особенности кинематики метода РТМР, расчета геометрических параметров режущей части, формы и размеров стружки и микронеровности поверхностного слоя детали. Кинематическая схема предлагаемого метода по классификации Грановского Г.И и Коновалова Е.Г. относится к VII группе, в которой одно из двух вращательных движений сообщается инструменту 1, а другое – обрабатываемой заготовке 2 (рисунок 1б). При этом ось вращения инструмента устанавливается перпендикулярно оси вращения заготовки и находится на линии оси центров. Режущая кромка резца многогранная и состоит из N режущих лезвий. Резец совершает принудительное вращение вокруг своей оси, что приводит к постоянному обновлению режущей кромки в зоне резания.



а) б)

Рисунок 1 – Ротационное точение многогранными резцами: (а) кинематическая схема; (б) схема обработки многогранным ротационным резцом

Характерной особенностью метода РТМР является возникновение конструктивной подачи S_k на участке профиля с возрастающим радиус-вектором, при этом срезаемая стружка, формирующаяся в виде отдельных участков клинового типа, сходит по передней поверхности со скольжением вдоль режущей кромки лезвия.

Конструктивная подача: $$S_к = (\rho_{\max} - \rho_{\min}) = (\rho_{ср} + e) - (\rho_{ср} - e) = 2e. \quad (1)$$

Подача на грань профиля резца: $$S_{гр} = \sqrt{S_{кр_{гр}}^2 + S_{пр_{гр}}^2} = \sqrt{\left(\frac{\pi \cdot d_3 \cdot n_3}{n_p \cdot N}\right)^2 + \left(\frac{S_{прст} \cdot n_з}{n_p \cdot N}\right)^2}. \quad (2)$$

где $\rho_{\max}$ – максимальный радиус-вектор контура режущей кромки, $[мм]$; $\rho_{\min}$ – минимальный радиус-вектор контура режущей кромки, $[мм]$; $\rho_{ср}$ – средний радиус-вектор контура режущей кромки, $[мм]$; e – эксцентриситет профиля инструмента, $[мм]$; $S_{пр_{ст}}$ – продольная подача резца на оборот обрабатываемого вала, $[мм/об]$; $n_з$ – число оборотов заготовки, $[об/мин]$; n_p – число оборотов инструмента, $[об/мин]$; ψ – угол наклона между вектором скорости главного движения υ_p и координатной осью y. N – число граней профиля резца; d_3 – диаметр заготовки, $[мм]$.

В формировании обрабатываемой поверхности участвуют три движения: главное движение V_p, прямолинейное движение, или продольная подача $S_{пр}$, и круговая подача $S_{кр}$. Главным движением является вращение инструмента, причем скорость вращения инструмента должна быть минимум на порядок больше скорости вращения заготовки. Вектор скорости главного движения изменяется по величине и направлению. В процессе срезания единичного фрагмента с поверхности заготовки происходит изменение

скорости резания за счет изменения радиус вектора многогранной режущей кромки. При сложном сочетании трех и более одновременно осуществляемых движений специфика формообразования при РТМР заключается в появлении скорости дополнительного движения или круговой подачи $S_{кр} = \pi \cdot d_3 \cdot n_3$. Одной из важных особенностей РТМР является возникновение в процессе резания областей ниже оси центров на участке профиля с возрастающим радиус-вектором.

Одновременно действующие главное, вспомогательное и дополнительное движения при данном методе точения в совокупности определяют пространственную траекторию результирующего движения резания (рисунок 2).

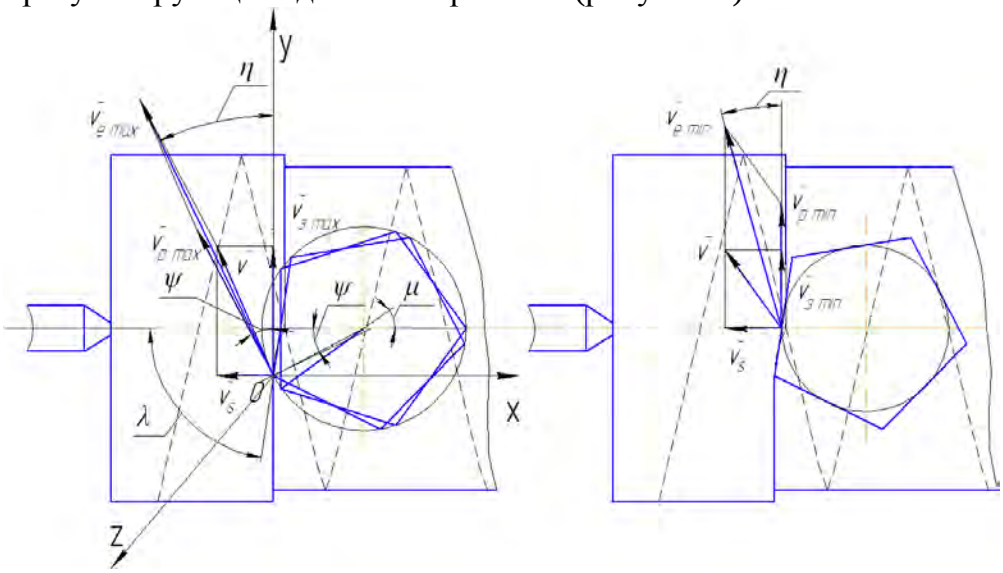


Рисунок 2 - Схема определения вектора скорости результирующего движения резания

Скорость главного движения резания:

$$V_p = \frac{2\pi \cdot \rho \cdot n_p}{1000}; \quad (3)$$

скорость результирующего движения резания:

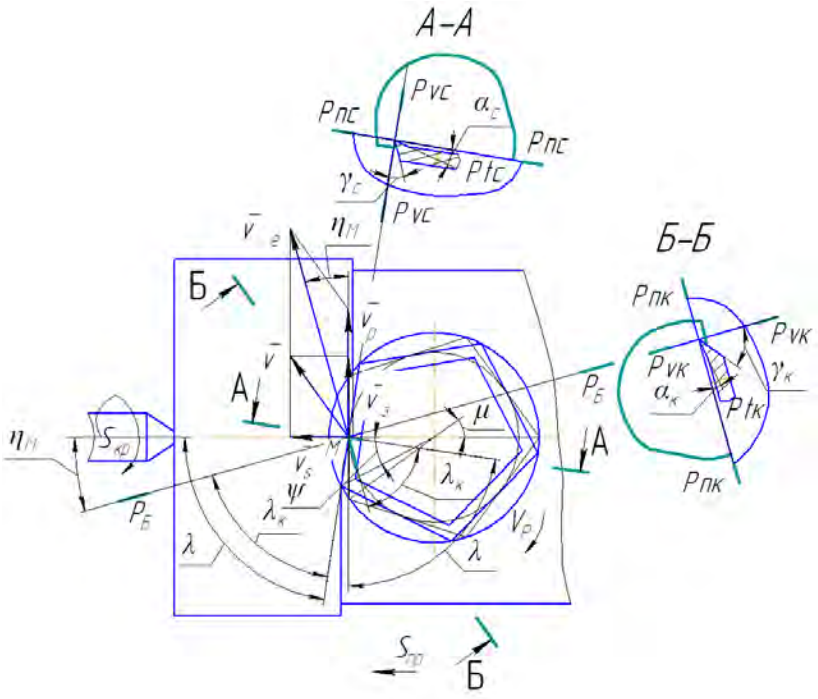
$$\left|\bar{\upsilon}_e\right| = \sqrt{\left(\frac{-S_{np} \cdot n_3}{1000} - V_p \cdot \sin\psi\right)^2 + \left(V_p \cdot \cos\psi + \frac{S_{kp}}{1000}\right)^2}; \quad (4)$$

угол подъема винтовой траектории:

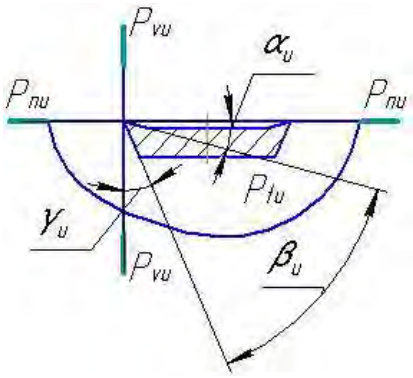
$$\cos\eta = \frac{V_p \cdot \cos\psi + (S_{kp}/1000)}{\left|\bar{\upsilon}_e\right|}. \quad (5)$$

Так как различные точки режущей кромки находятся на разном удалении от оси вращения заготовки, то, согласно уравнению (5), в точках режущей кромки вектор результирующего движения резания $\bar{\upsilon}_e$ имеет различные значения по величине и углу подъема.

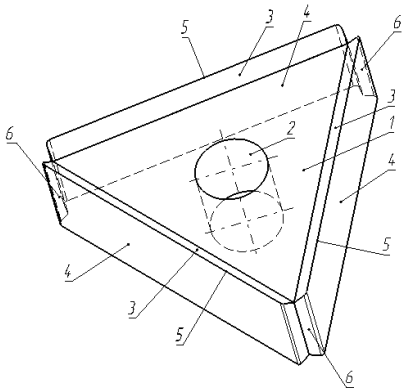
Для анализа режущих свойств инструмента РТМР необходимо рассмотреть его геометрические параметры в процессе обработки. Предложены системы координат и схемы измерения углов ротационных инструментов, где значения угловых кинематических параметров определяют как результат относительного движения резца и заготовки в каждый момент времени в рассматриваемой точке режущей кромки (рисунок 3). В предлагаемом методе ротационный резец представляет собой многогранное тело 1 чашечной формы с посадочным отверстием 2 и режущей частью, состоящей из N режущих лезвий. Каждое лезвие содержит заднюю 3 и переднюю 4 поверхности, которые образуют между собой прямолинейную режущую кромку 5. Сформированные на каждом лезвии режущие кромки 5, размещенные в плоскости, перпендикулярной оси вращения ротационного резца, образуют режущий многоугольник (рисунок 3а). Возможно также конструктивное исполнение, когда на вершинах многогранного тела 1 резца выполнены разделительные канавки 6 (рисунок 3в).



а)



б)



в)

Рисунок 3 – Геометрия процесса резания РТМР: а) - системы координат при РТМР (статическая и кинематическая); б) – инструментальная система координат для многогранного ротационного резца. в) - вариант конструктивного исполнения резца

Кинематический угол наклона $\lambda_к$ имеет наибольшую величину на вершине резца при врезании в заготовку ниже оси центров и минимален на вершине резца при выходе из зоны резания выше оси центров, что является следствием разнонаправленности вектора скорости главного движения $\bar{\upsilon}_p$. В инструментальной системе координат передний и задний инструментальные углы обеспечиваются при изготовлении и заточке инструмента. Исходя из способа установки ротационного резца относительно заготовки, для исключения затирания по задней поверхности необходимо соблюдать следующее условие: $\alpha \geq \alpha_{u\min}$. Минимальный задний угол резца определяется из соотношения: $tg\alpha_{u\min} = \frac{t_{cm}}{\rho_{\max}}$. Статический задний угол α_c измеряется в статической главной секущей плоскости между задней поверхностью лезвия и статической плоскостью резания P_{nc}. Кинематический задний угол $\alpha_к$ измеряется в кинематической главной секущей плоскости между задней поверхностью лезвия и кинематической плоскостью резания $P_{nк}$ (рисунок 4).

Известно, что передний угол должен обеспечивать сход стружки вдоль режущей кромки с наименьшей усадкой стружки. Этого можно добиться только при увеличении переднего угла γ до максимально возможного значения. Статический передний угол γ_c расположен в главной секущей плоскости между передней поверхностью лезвия и статической основной плоскостью P_{vc}, кинематический передний угол $\gamma_к$ находится в главной секущей плоскости между передней поверхностью лезвия и кинематической основной плоскостью $P_{vк}$ (рисунок 5).

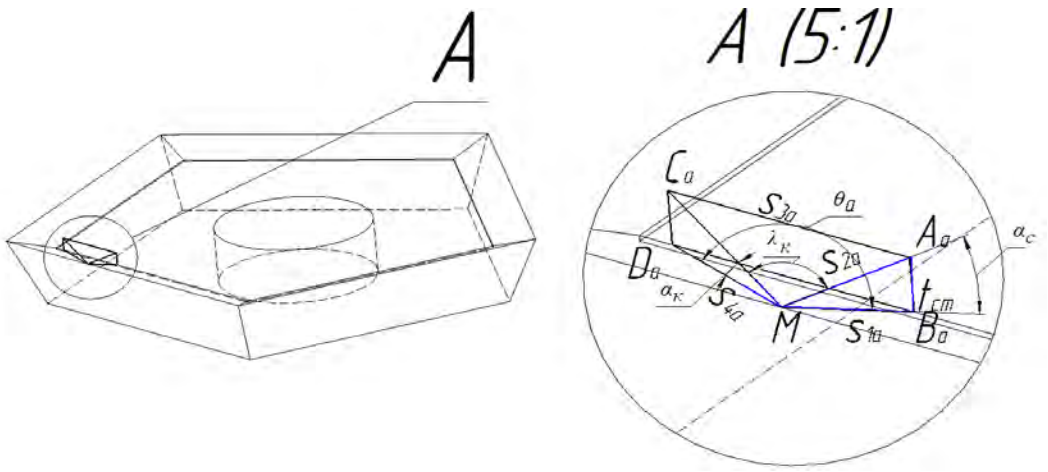


Рисунок 4 - Схема для определения кинематического заднего угла

Кинематический задний угол:

$$\sin\alpha_k = \frac{t_{cm}}{s_{4a}} = \sin a_c \cdot \cos\theta_a; \quad (6)$$

Кинематический передний угол:

$$\cos\gamma_k = \frac{s}{s_{4\gamma}} = \cos\gamma_c \cdot \cos\theta_\gamma; \quad (7)$$

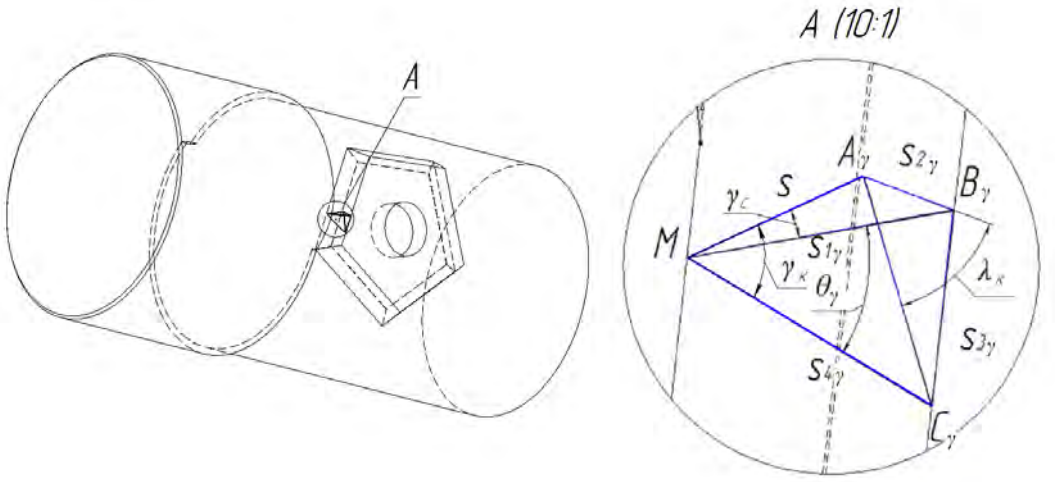


Рисунок 5 - Схема для определения кинематического переднего угла

Анализ кинематики процесса ротационного точения показывает, что угол наклона режущей кромки в процессе обработки будет величиной переменной. В процессе обработки реализуются функциональные взаимосвязи между основными геометрическими параметрами РТМР: кинематический передний угол γ_k при врезании максимален и стремится к значению, равному статическому переднему углу γ_c; кинематический задний угол α_k изменяется от минимального до статического заднего угла α_c. Это приводит к соответствующим изменениям формы и размеров сечения срезаемого слоя, что необходимо учитывать при назначении и оптимизации режимов резания для наиболее эффективного удаления стружки из зоны резания.

На основании расчетов кинематических параметров и геометрии инструмента можно определить высоту и форму микронеровностей обработанной поверхности. На рисунке 6 приведено схематическое изображение профиля цилиндрической поверхности, полученной РТМР. Высота расчетных неровностей Δh определяется по формуле:

$$\Delta h = \sqrt{\rho^2 \cdot \sin\kappa^2 + R_{\partial\min}^2} - R_{\partial\min}; \quad (8)$$

где ρ – радиус-вектор контура режущей кромки, $[мм]$; $R_{\partial\min}$ – радиус обработанной заготовки, $[мм]$; k – угол между осью центров и точкой контакта режущей кромки и обрабатываемой поверхности.

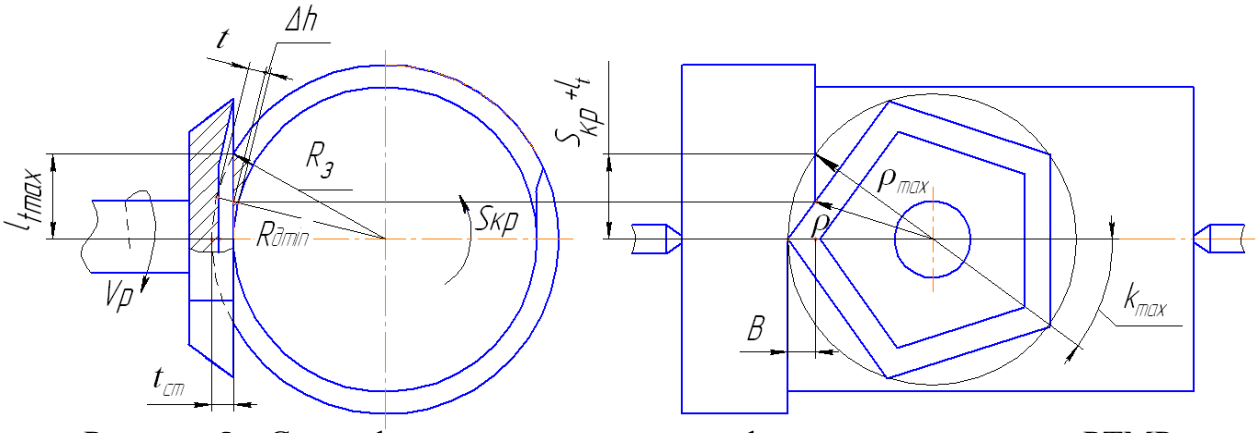


Рисунок 6 – Схема формирования микропрофиля поверхности при РТМР

Размер элементарных стружек можно охарактеризовать тремя параметрами: шириной, толщиной и длиной (рисунок 7а).

а) б)

Рисунок 7 – Форма и размеры сечения стружки: а) расчет; б) эксперимент

Ширина стружки: $B = 2S_{np_{гр}}$; (9)

длина стружки: $L = 2S_{кр_{гр}} + l_t$; (10)

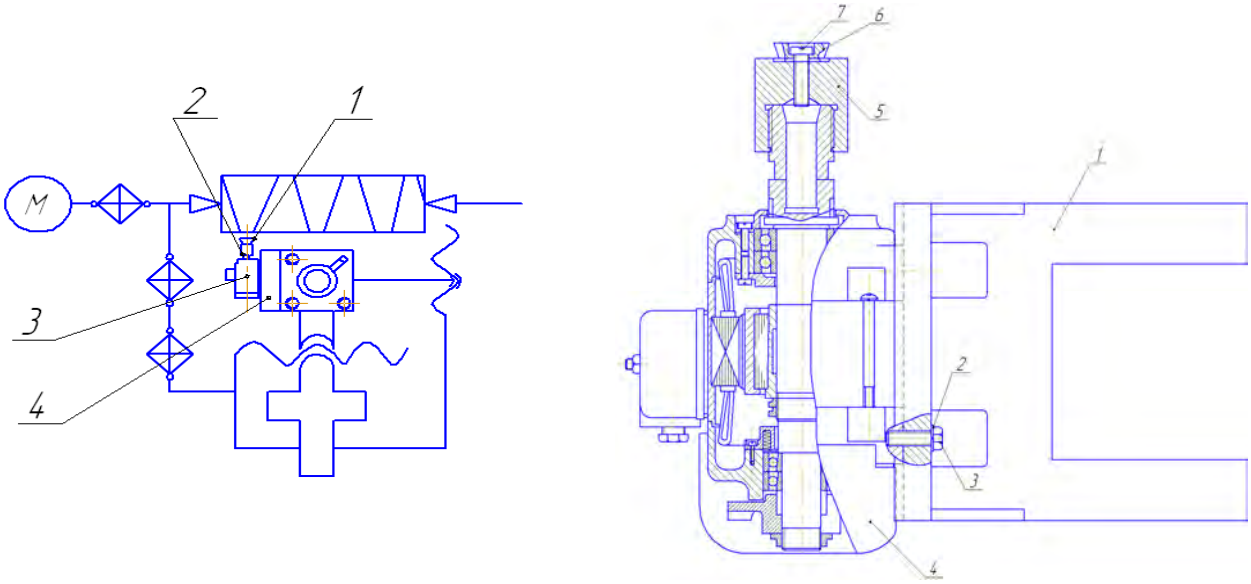
толщина стружки: $t = t_{cm} - \Delta h = t_{cm} - \sqrt{\rho^2 \cdot \sin\kappa^2 + R_{d\min}^2} + R_{d\min}$. (11)

где l_t – длина участка, зависящая от глубины резания, $[мм]$; t – глубина резания в каждом положении режущей кромки находящейся в зоне резания, $[мм]$; t_{cm} – глубина резания в плоскости оси центров, $[мм]$.

Предложенные методы расчета и проектирования геометрических и кинематических параметров режущей части инструмента и режимов резания позволяют прогнозировать и целенаправленно влиять на интенсивность дробления, форму и размеры стружки, температурно-силовые процессы в зоне резания и управлять качеством обработки.

Третий раздел посвящен экспериментальному исследованию процесса РТМР при обработке поверхностей тел вращения: шероховатости обработанной поверхности и сил резания, интенсивности деформационных процессов и температуры в зоне резания, свойств инструментальных материалов.

В зависимости от параметров РТМР экспериментальные исследования проводились на токарно-винторезном станке повышенной точности (модель ИЖ250 ИТВМ.Ф1) с использованием инструментального модуля, состоящего из электро-шпинделя, кронштейна, оправки, и специально переточенных типовых многогранных твердосплавных пластин (ротационных резцов), рисунки 8 и 9.



а) б)

Рисунок 8 – Инструментальный модуль для РТМР: а) – кинематическая схема: 1 − твердосплавная пластина (ротационный резец); 2 − оправка; 3 − электрошпиндель Э-18/0,63; 4 – кронштейн; б) конструктивное исполнение: 1 − кронштейн; 2 − шайба; 3 − болт; 4 − электрошпиндель; 5 − оправка; 6 − резец; 7 – винт

Эксперименты по точению методом РТМР проводились на оправке с образцами материалов из стали 45 (ГОСТ 1050-88) и алюминиевого сплава Д16 (ГОСТ 4784-97).

а) б)

Рисунок 9 – Инструментальный модуль на базе токарно-винторезного станка ИЖ250 ИТВМ.Ф1; а) – общий вид; б) – ротационные резцы.

Некоторые варианты конструкций многогранных резцов для ротационного точения представлены на рисунке 9б. (Патент RU 2463130 C1). В качестве материала для ротационного резца использовался твердый сплав Т15К6 при обработке образцов из стали 45 и ВК6ОМ – при обработке алюминиевых сплавов. Шероховатость рабочих передней и задней поверхностей инструмента обеспечивалась в пределах Ra 0,32-0,63мкм. Глубина резания изменялась в диапазоне от 0,1мм до 1мм, круговая подача – от 8 до 25 м/мин; частота вращения электрошпинделя от 6000 до 18000 об/мин регулировалась с помощью частотного преобразователя Альтивар 31.

Экспериментальные исследования влияния параметров (t, $S_{пр}$, $S_{кр}$, $V_р$) при РТМР на шероховатость обработанной поверхности выполнялись по методике, разработанной на основе планирования многофакторного эксперимента типа 2^4. Диапазон изменения параметров: продольная подача (от 0,3 до 1,2 мм/об), круговая подача (от 9,9 до 19,7 м/мин), скорость резания (от 310 до 940 м/мин), глубина резания (от 0,5 до 1,5 мм). Результаты экспериментальных исследований по шероховатости поверхности детали после РТМР приведены на рисунке 10.

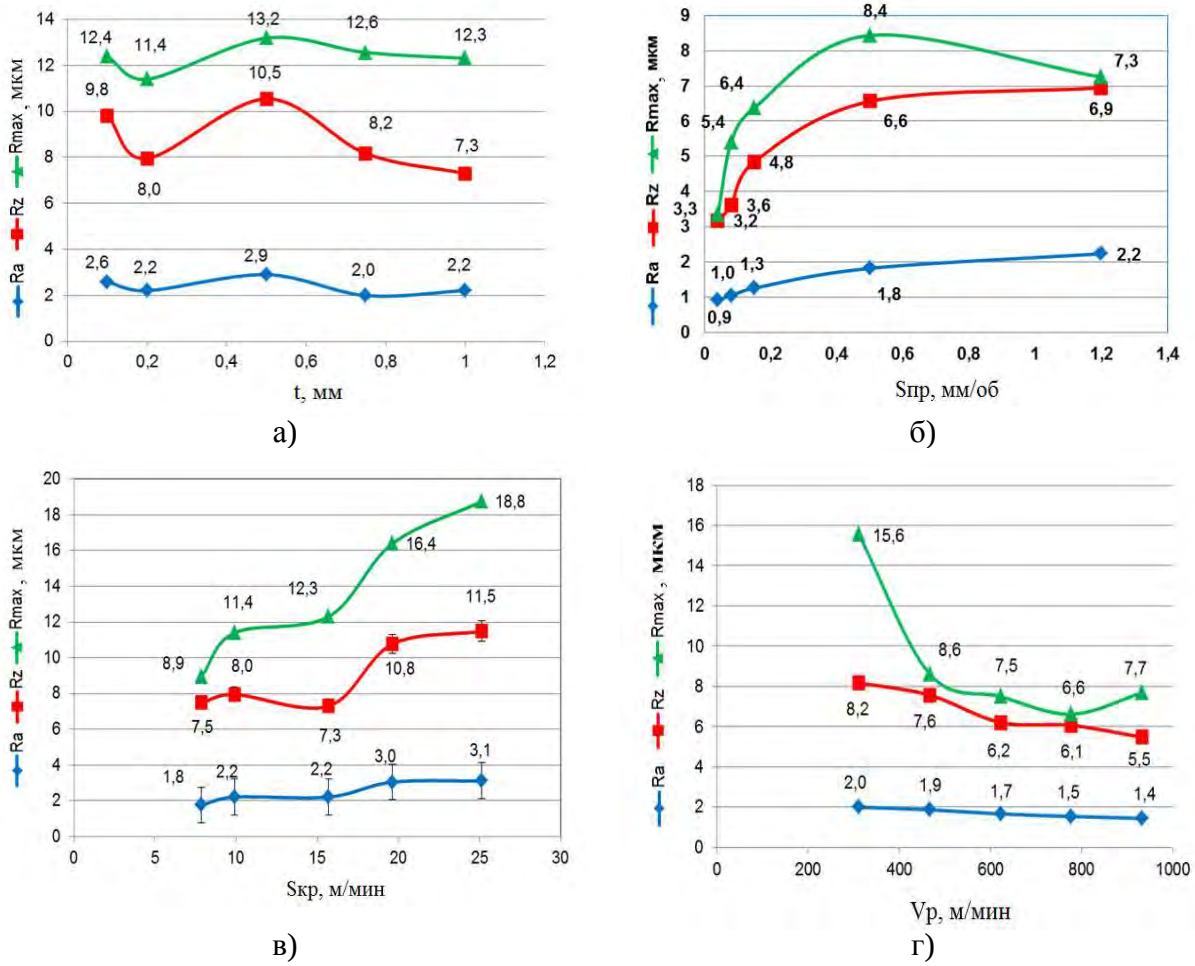


Рисунок 10 - Влияние режимов резания на шероховатость поверхности: а) – глубины резания *t*; б) – продольной подачи $S_{пр}$; в) - круговой подачи $S_{кр}$; г) – скорости резания V_p

На основе обработки экспериментальных данных получены зависимости параметров шероховатости обработанной поверхности от режимов резания, представленных эмпирическими зависимостями (12 – 16). Характер влияния отдельных режимов резания на параметры шероховатости иллюстрируются рисунком 11.

Наибольшее влияние на качество обрабатываемой поверхности оказывает продольная подача. Установлено, что глубина резания существенно не влияет на шероховатость обрабатываемой поверхности, величина продольной подачи не должна превышать конструктивную подачу, умноженную на количество граней. Скорость резания должна назначаться максимально допустимой по условиям стойкости инструмента.

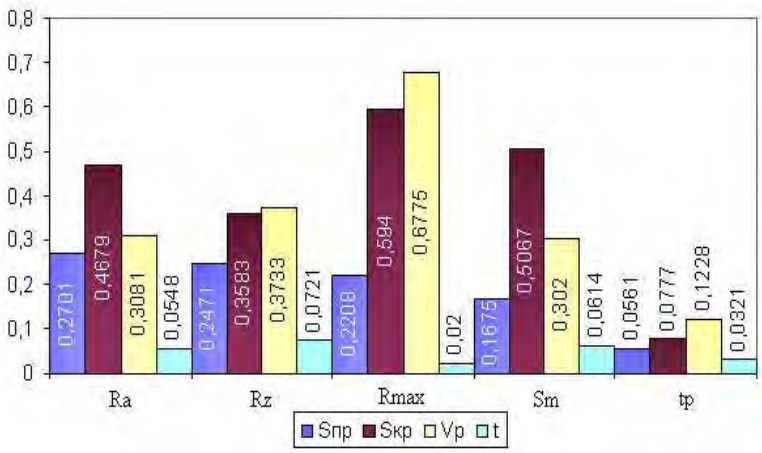


Рисунок 11 – Влияние режимов резания *(t, $S_{пр}$, $S_{кр}$, V)* на параметры шероховатости

$$Ra = 6,01\frac{S_{пр}^{0,2701}\cdot S_{кр}^{0,4679}}{V_p^{0,3081}\cdot t^{0,0548}}; \quad (12)$$

$$Rz = 41,52\frac{S_{пр}^{0,2471}\cdot S_{кр}^{0,3583}}{V_p^{0,3733}\cdot t^{0,0721}}; \quad (13)$$

$$R\max = 251,89\frac{S_{пр}^{0,2208}\cdot S_{кр}^{0,594}\cdot t^{0,02}}{V_p^{0,6775}}; \quad (14)$$

$$Sm = 185,83\frac{S_{пр}^{0,1675}\cdot S_{кр}^{0,5067}\cdot t^{0,0614}}{V_p^{0,302}}; \quad (15)$$

$$t_p = 25,42\frac{V_p^{0,1228}}{S_{пр}^{0,0561}\cdot S_{кр}^{0,0777}\cdot t^{0,0321}}; \quad (16)$$

Форма и размеры стружки, образующейся при РТМР (рисунок 12), убедительно подтверждают теоретические положения о гарантированном дроблении (вследствие прерывистого характера резания) и отводе мелкой стружки из зоны резания.

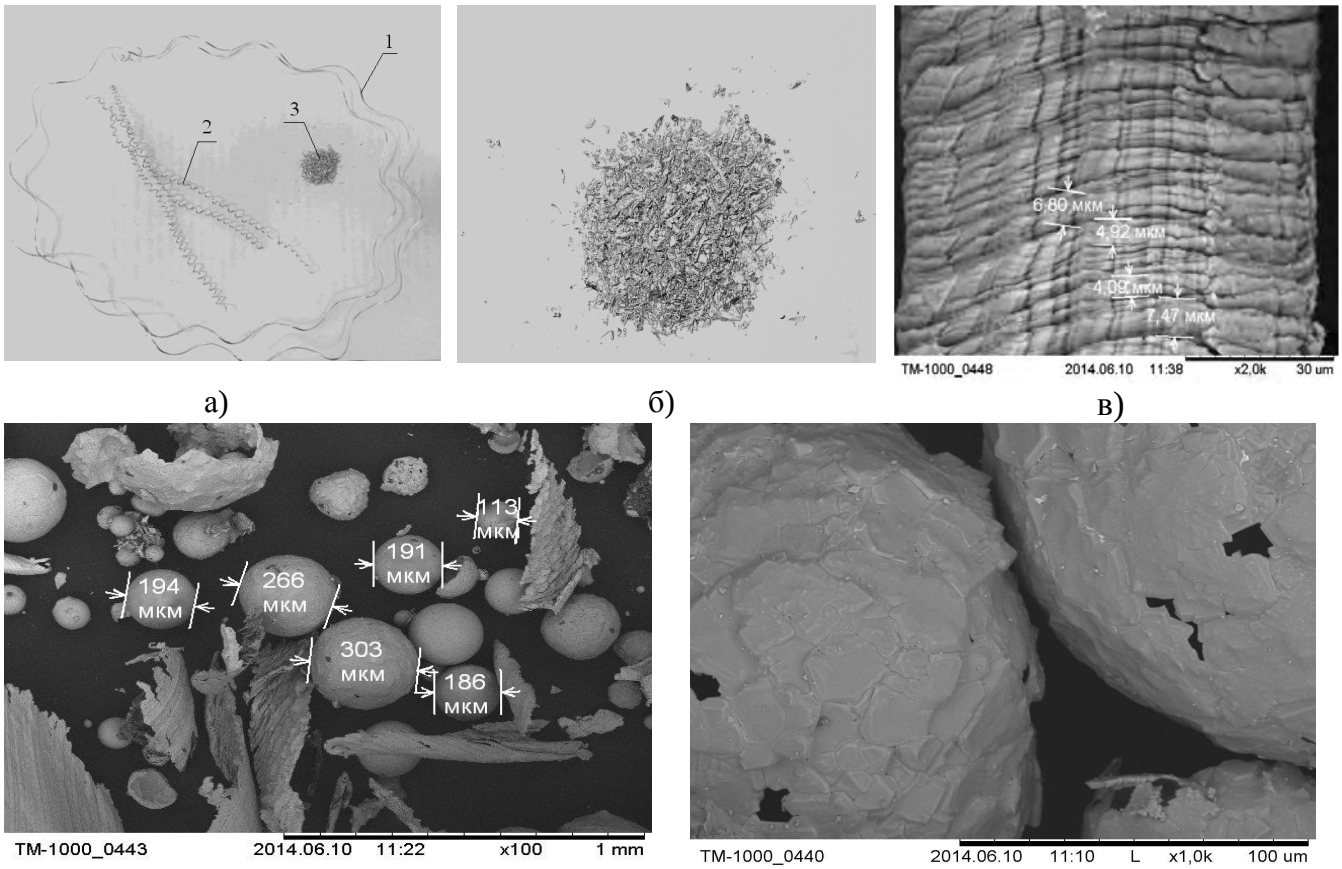


Рисунок 12 – Различные типы стружки при обработке алюминиевого сплава Д16 (а-в) и стали 45 (г, д): а) – стружка, формирующаяся при обработке: проходным резцом без стружколомающей канавки (1), со стружколомающей канавкой (2), ротационным многогранным резцом (3); б) – стружка, сформированная при РТМР; в) следы поверхностей сдвига; г, д) скручивание элементных стружек стали 45 при РТМР в полые сферы.

Особый интерес представляют результаты изучения морфологии стружки, полученной на различных режимах РТМР. В зависимости от условий резания формируются разные типы дробленых мелких стружек (рисунок 12 а,б). Изучение морфологии, структуры и размеров поперечного сечения стружки (рисунок 12 в) подтверждает высокую интенсивность сдвиговых деформаций при РТМР. Толщина слоев поверхностей сдвига изменяется в пределах 1 – 2 мкм (хотя они могут быть связаны в относительно устойчивые слои толщиной до 5 мкм). Укрупненные численные оценки показывают, что такие размеры между поверхностями сдвига (срезания слоя материала) при РТМР соответствует интенсивности деформационных процессов с частотой от 36000 до 120000 сек$^{-1}$. Проведенные измерения объемного коэффициента степени дробления $\omega=2\div3$ также подтверждают повышенную интенсивность деформационных процессов при РТМР. В результате совместного воздействия всех экстремальных по интенсивности силовых и температурных факторов при РТМР, локального разогрева элементов стальной стружки до высоких температур может происходить образование новых структур в виде полых сфер с размерами от 100…300 мкм и толщиной стенки около 1…2 мкм (рисунок 12 г,д). Это открывает перспективы с точки зрения более эффективного использования стружки путем её превращения в товарный продукт для последующего применения в технологиях порошковой металлургии и композиционных материалов.

Распределение температуры на поверхности многолезвийного инструмента, стружки и детали исследовали бесконтактным методом с помощью тепловизора модели testo 875-1 (рисунок 13).

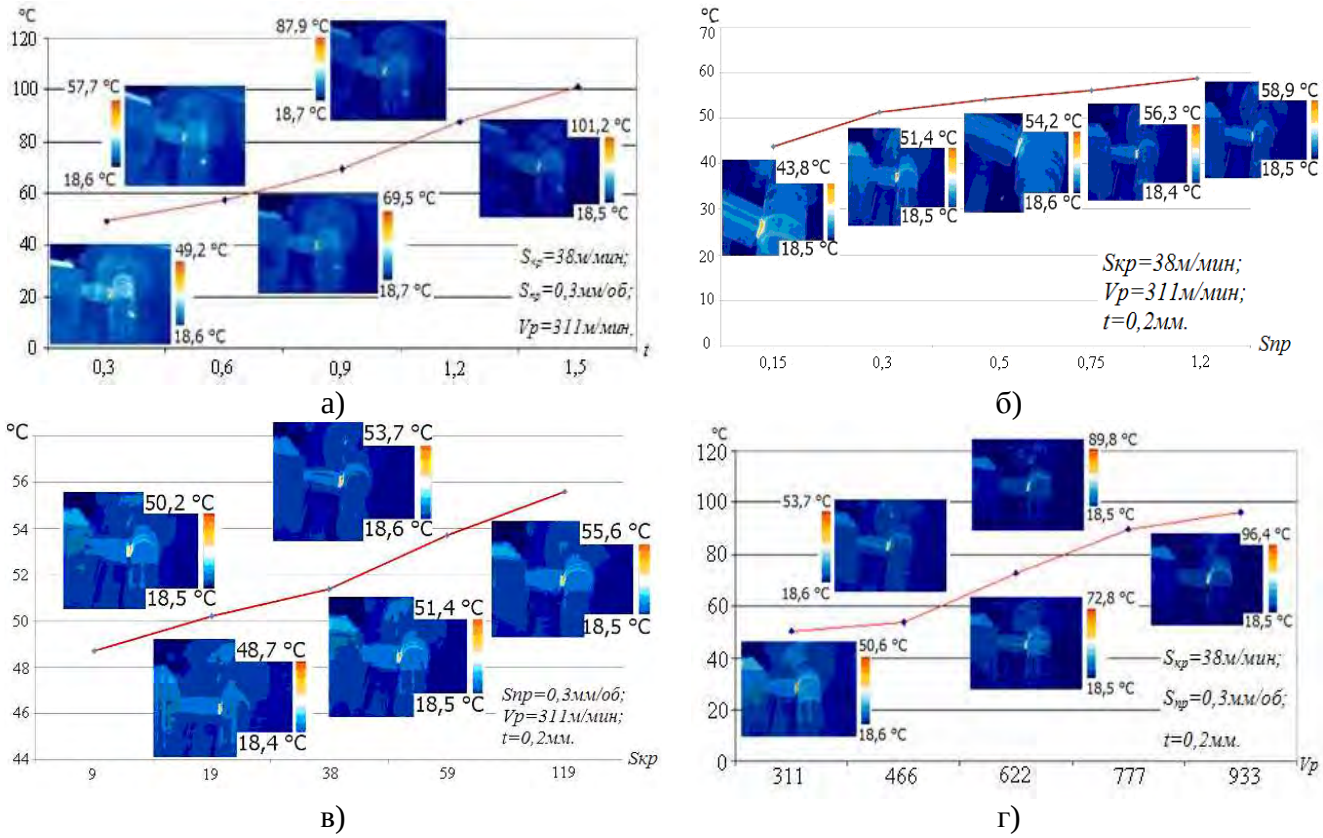
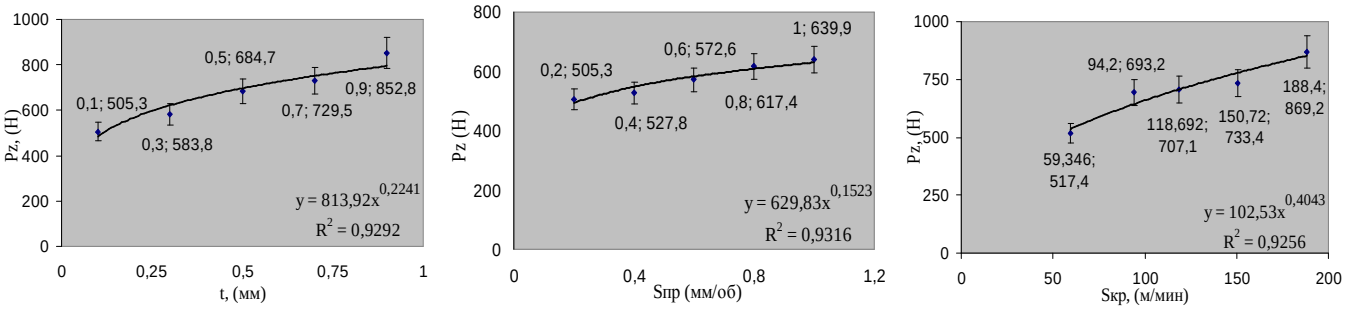


Рисунок 13 - Влияние технологических параметров на температуру в зоне резания: а) – глубины резания t ; б) – продольной подачи $S_{пр}$; в) - круговой подачи $S_{кр}$; г) – скорости резания V_p.

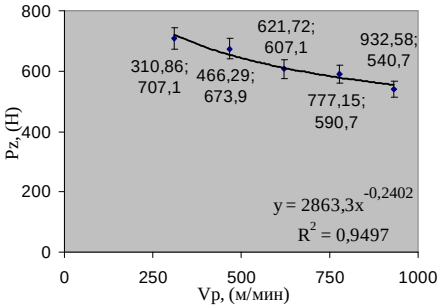
Компьютерная обработка теплограмм показала, что температура в зоне резания изменяется в диапазоне от 60 до 110 °С, температура режущего лезвия инструмента на входе в зону резания – от 30 до 40°С, на выходе из нее – от 40 до 60°С. Характер распределения температуры показывает, что в связи с высокой скоростью вращения и постоянным обновлением режущая кромка не успевает разогреваться (< 120°С) и практически все тепловые потоки концентрируются в объеме мелкодроблёной стружки, что позволяет отказаться от использования СОТС. Температура в зоне резания остается стабильной в течение всего процесса обработки.

Необходимым условием для эффективной реализации предложенного метода РТМР является всестороннее изучение влияния геометрических и кинематических факторов, режимов резания на силы резания и крутящие моменты, действующие на резец при РТМР.

Экспериментальные исследования силовых характеристик проводились на токарно-винторезном станке 16К20Ф1 с применением специально спроектированного и изготовленного измерительного инструментального узла. Для определения функциональных взаимосвязей между одним из параметров режимов резания и переменной составляющей сил резания проводились серии однофакторных экспериментов. Такие зависимости хорошо изображаются кривыми параболического или гиперболического типа. Данные кривые наиболее удобно аппроксимировать степенной функцией вида $y=Cx^{\kappa}$. Результаты измерений представлены в графической форме на рисунке 14.



а) б) в)



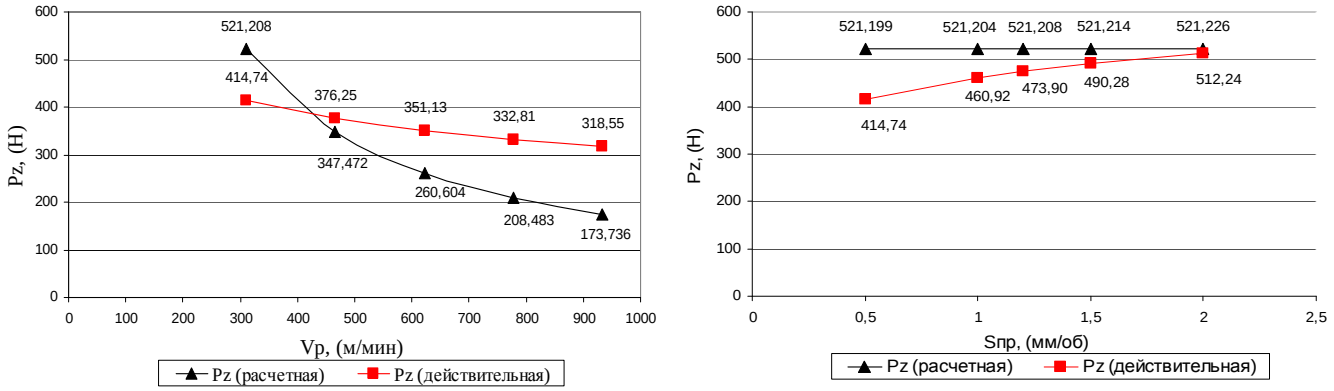
г)

Рисунок 14– Изменение главной составляющей силы резания *Pz* в зависимости от режимов резания:
а) – глубины резания *t* б) – продольной подачи $S_{пр}$
в) - круговой подачи $S_{кр}$ г) – скорости резания V_p

На основе обработки экспериментальных данных получено расчетное выражение для определения главной составляющей силы резания при РТМР:

$$P_z = 662{,}12 \cdot \frac{S_{пр}^{0,1523} \cdot S_{кр}^{0,4043} \cdot t^{0,2241}}{V_p^{0,2402}}. \qquad (17)$$

Анализ экспериментальных данных показывает, что наиболее значимыми, с точки зрения повышения производительности, режимами резания являются скорость резания V_p и продольная подача $S_{пр}$. На рисунке 15 приведены в графической форме результаты численных оценок по влиянию этих параметров на главную составляющую силы резания *Pz* .



а) б)

Рисунок 15 – Влияние режимов резания на главную составляющую силы резания:
а) скорости резания V_p; б) продольная подача $S_{пр}$.

Полученные полуэмпирические зависимости позволяют устанавливать рациональные режимы резания для обеспечения максимальной производительности процесса РТМР, при сохранении требуемого качества обработанной поверхности. Многолезвийность процесса РТМР и дискретность резания приводят к микроударным знакопеременным нагрузкам на режущую кромку. Эта кинематическая особенность РТМР предъявляет дополнительные требования к материалу инструмента по параметрам ударной вязкости и трещиностойкости. Поэтому в экспериментальной части работы было уделено внимание такому важному фактору, как повышение качества твердосплавных материалов.

На основании комплекса расчетных и экспериментальных исследований разработаны новые составы и технологии изготовления твердосплавных материалов с повышенной трещиностойкостью и прочностью связующего (за счет модифицирующего влияния добавок наночастиц керамики), позволяющие расширить технологические возможности методов и инструментальных модулей для РТМР. Положительное влияние добавок наночастиц на свойства базовых твердых сплавов объясняется изменением его структурных

параметров. Наночастицы, однородно распределенные в объеме связки кобальта, приводят к ее дисперсному упрочнению и способствуют увеличению трещиностойкости сплава в целом (в 1,5 раза). Включения тугоплавких и твердых наночастиц в прослойках связующего являются «барьерами» на пути распространения микротрещин. Обнаружена также устойчивая тенденция увеличения коэффициента относительной стойкости инструмента из модифицированных наночастицами твердых сплавов. Косвенным путем подтверждено снижение износа инструмента (по снижению величины шероховатости обработанной поверхности детали с Ra 6 до Ra 1,25).

В четвертом разделе представлены результаты эксплуатационных и производственных испытаний инструментальных модулей РТМР, которые подтверждают возможность повышения технико-экономических показателей (расширенные диапазоны допускаемых скоростей резания от 310 до 933 м/мин, повышение производительности от 1,3 до 2,5 при обеспечении точности размеров по 6 - 8 квалитету) за счет реализации новых кинематических принципов формообразования срезаемого слоя при РТМР. На основании комплекса расчетных теоретических и экспериментальных исследований обоснованы перспективные направления для наиболее эффективного использования метода РТМР при обработке различных материалов, предложены методические рекомендации по расчету и назначению рациональных режимов резания. Разработанные технологические процессы и регламенты использованы в производственных условиях АО “СИРЗ” (г. Красноярск) для обработки методом РТМР гребных валов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и валов для конвейеров из стали 40Х (для АО “Ачинский глиноземный комбинат”).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам комплекса теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. На основании разработанных аналитическими методами принципов построения кинематической схемы ротационного точения многогранными резцами предложены новые конструкции инструментальных модулей, имеющие существенные преимущественные отличия от известных по производительности, температурно-силовым условиям процесса формообразования при одновременном обеспечении требуемого качества обработки.
2. Разработана новая методика расчета геометрических и кинематических параметров процесса РТМР и инструмента. Показано, что, изменяя параметры процесса РТМР, можно влиять на форму и размеры поперечного сечения стружки, интенсивность деформационно-силовых процессов в зоне резания и шероховатость обработанной поверхности.
3. Получены полуэмпирические зависимости величины шероховатости и сил резания от режимов резания, позволяющие с наибольшей эффективностью использовать новый метод ротационного точения многогранными резцами и управлять качеством обработки поверхности. Разработаны рекомендации по выбору и назначению рациональных режимов резания, позволяющие исключить формирование кинематической волнистости и уменьшить шероховатость обработанной поверхности (Ra = 0,8 - 6,3мкм.).
4. Экспериментально подтверждено, что метод РТМР обеспечивает дробление и отвод мелкой стружки (от 100мкм до 3мм) из зоны резания. Изучение морфологии разных типов стружки подтверждает адекватность предложенных теоретических оценок по форме и размерам срезаемого слоя, с учетом особенностей кинематики резания методом РТМР.
5. Экспериментальными исследованиями установлено, что температура в зоне резания существенно ниже, чем в объеме стружки (температура поверхности режущей части инструмента не превышает 120°С). Это является предпосылкой для повышения эксплуатационной стойкости инструмента без применения СОТС и, как результат, повышение качества обработки.

6. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность повышения результирующей скорости резания при РТМР (до 950 м/мин), что обеспечивается за счет совмещения продольной и круговой подач (вращение заготовки), скорости главного движения (вращение инструмента).

7. Разработанные методики расчета геометрических параметров инструмента и режимов резания являются основой для эффективного практического использования метода и инструментов РТМР для разных видов обработки и групп материалов (P, N, M по стандарту ISO513), снижения трудоемкости и повышения производительности (в 1,3-2,5 раза).

8. Производственные эксплуатационные испытания подтвердили технико-экономическую эффективность в составе технологических процессов механической обработки гребных валов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т (АО “СИРЗ”), и валов из стали 40Х для конвейеров АО “АГК”.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. Бинчуров, А.С. Исследование метода ротационного точения многогранными резцами / Н.С. Индаков, А.С. Бинчуров // Станки инструмент (СТИН). – 2013. - №6. – С. 21-24.

2. Бинчуров, А.С. Особенности ротационного точения многогранными резцами / Н.С. Индаков, А.С. Бинчуров// Вестник машиностроения. – 2013. - №10. – С. 56-58.

3. Бинчуров, А.С. Особенности геометрии многогранных резцов для ротационного точения /Н.С. Индаков, А.С. Бинчуров// Вестник машиностроения. – 2013. - №11. – С. 38-41.

4. Бинчуров, А.С. Разработка эффективных путей управления структурой и свойствами твердосплавных композитов, модифицированных наночастицами / Ю. И. Гордеев, А. К. Абкарян, А.С. Бинчуров, В. Б. Ясинский, И. В. Карпов, А. А. Лепешев, О.Л. Хасанов, Э.С. Двилис// Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2014. Т.7. №3. с. 270-289.

5. Бинчуров, А.С. Конструирование и исследование наноструктурированных твердосплавных композитов с повышенным уровнем прочностных и эксплуатационных характеристик за счет модифицирования наночастицами и термомеханической обработки/ Ю. И. Гордеев, А. К. Абкарян, А.С. Бинчуров, В. Б. Ясинский, В. Н.Вадимов// Вестник СибГАУ 2014. № 4(56). С. 209–218.

6. Пат.2463130 РФ, МПК B23B 27/12. Ротационный резец/ Индаков, Н.С. Гордеев, Ю.И. Бинчуров, А.С. Опубл. 10.10.2012г. Бюл. № 28

7. Патент Пат. 2548846 РФ, C22C29/08, B22F3/12. Способ получения спеченных твердых сплавов/ Индаков, Н.С., Гордеев, Ю.И., Бинчуров, А.С., Абкарян А.К., Ясинский В.Б. Опубл. 10.02.2015г. Бюл. № 4.

В журналах, включенных в библиографические базы данных цитирования Scopus:

1. Binchurov, A.S. Turning by multifaceted cutters/ N.S. Indakov, A.S. Binchurov // //Russian Engineering Research, 2014, Vol. 34, No. 1, pp. 52–54.

2. Binchurov, A.S. Geometry of Multifaceted Rotary Cutters /A.S. Binchurov, N.S. Indakov // Russian Engineering Research, 2014, Vol. 34, No. 2, pp. 79–82.

3. Binchurov A., Gordeev Y., Indakov N. Method of Rotational Turning With Multifaceted Cutters //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2016. – Т. 124. – №. 1. – С. 012150.

4. Binchurov, A. S., Gordeev, Y. I., Abkaryan, A. K., & Jasinski, V. B. Design and Investigation of Hard Metal Composites Modified by Nanoparticles / Y. I. Gordeev, A. K. Abkaryan, A. S. Binchurov, & V. B. Jasinski //Advanced Materials Research. – 2014. – Т. 1040. – С. 13-18.