Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Ю. И. Гордеев

г. Красноярск – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ…… 4
Раздел 1 Сравнительный анализ известных методов токарной обработки тел вращения……..... 10
1.1 Специальные методы лезвийной обработки тел вращения…… 10
1.1.1 Особенности процесса формообразования при косоугольном точении……... 10
1.1.2 Анализ известных схем и методов ротационного точения. Результаты исследований и практического применения …….. 14
1.1.3 Особенности торцевого фрезерования тел вращения (фрезоточение)……... 25
1.2 Сравнительная характеристика кинематики специальных методов токарной обработки. Преимущества и недостатки ……... 28
1.3 Выводы. Постановка целей и задач исследования……... 36
Раздел 2. Теоретическое исследование процессов формообразования при РТМР…… 40
2.1 Кинематическая схема процесса РТМР. Определение режимов резания…… 40
2.2 Определение геометрических параметров режущей части инструмента при РТМР……. 45
2.3 Разработка методики расчета высоты микронеровностей обработанной поверхности при РТМР…… 53
2.4 Методика определения действительной площади среза и формы стружки при РТМР……... 59
2.5 Аналитическое определение физических составляющих усилий резания при РТМР……. 62
2.6 Выводы по разделу…….. 69
Раздел 3 Экспериментальное исследование процесса ротационного точения многогранными резцами…… 72

3.1 Методика и аппаратура проведения экспериментальных исследований…….. 72
3.2 Экспериментальное исследование влияния режимов резания на шероховатость поверхности при РТМР…….. 77
3.3 Определение объемного коэффициента дробления стружки…….. 96
3.4 Экспериментальная оценка температуры в зоне резания…… 104
3.5 Исследование силовых характеристик ротационного точения многогранными резцами……... 110
3.5.1 Методика и аппаратура для определения силовых характеристик метода РТМР…… 110
3.5.2 Экспериментальное определение составляющих сил резания при РТМР……. 116
3.6 Изучение возможностей повышения эффективности метода РТМР за счет использования новых марок твердосплавных материалов……... 123
3.7 Выводы по разделу 3……... 132
Раздел 4 Практическое применение результатов исследования……... 133
4.1 Проведение эксплуатационных и производственных испытаний….. 133
4.2 Разработка рекомендаций по практическому использованию метода РТМР…….. 139
4.3 Выводы по разделу 4……... 144
ЗАКЛЮЧЕНИЕ…….. 146
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ……. 148
ПРИЛОЖЕНИЯ……. 162
Приложение А…….. 163
Приложение Б …..……. 165
Приложение В……..…….. 169

ВВЕДЕНИЕ

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.

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 (2012г., 2013г.), 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 (2012г.), 3-й Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в современной науке и технике» - г. Томск (2014г.). 19-ой Международной научно-практической конференции «Решетневские чтения» - г. Красноярск (2015 г.), 9-й Международной научно-практической конференции «Современные проблемы машиностроения» - г. Томск (2015г.), 4-ой Международной конференции «Информационные технологии в промышленности и производстве» - г. Томск (2016г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 23 работы. Основное содержание изложено в 11, из них 7 статей – в научных журналах,

входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий, 4 статьи – в зарубежных изданиях, входящих в базу 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 научному консультанту и 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.

Раздел 1 Сравнительный анализ известных методов токарной обработки тел вращения.

Токарная обработка подавляющего количества поверхностей вращения производится однолезвийным инструментом - вершинными резцами. Однако данный метод вследствие ряда ограничений по скорости, производительности и качеству обработки при формообразовании поверхностей из труднодеформируемых материалов, габаритных и нежестких валов все чаще заменяют специальными методами обработки, такими как безвершинное (косоугольное) точение, ротационное резание с самовращением или принудительным вращением инструмента, а также торцевое фрезерование (фрезоточение).

1.1 Специальные методы лезвийной обработки тел вращения

1.1.1 Особенности процесса формообразования при косоугольном точении

Косоугольное точение нашло свое применение при механической обработке валов из труднообрабатываемых, вязких материалов для которых необходимо обеспечить достаточно высокие параметры шероховатости [1-8]. Косоугольная токарная обработка существенно отличается от традиционной вершинной.

Схема внедрения режущей кромки инструмента в обрабатываемый материал при “бреющем” косоугольном точении представлена на рисунке 1.1

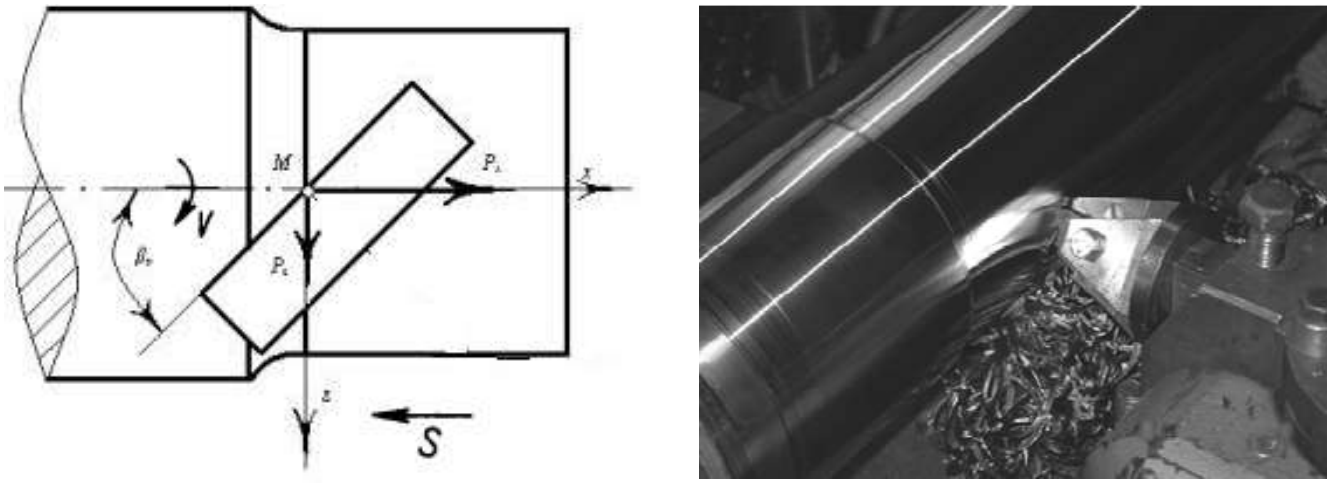


Рисунок 1.1 - Схема внедрения режущей кромки инструмента в обрабатываемый материал при “бреющем” косоугольном точении

При косоугольном резании процесс снятия припуска производится инструментом, режущая кромка которого при взаимодействии с заготовкой имеет угол наклона между нормалью режущей кромки и вектором продольной скорости резания. Практически это реализуется приемом заточки главной режущей кромки под углом наклона между нормалью режущей кромки и вектором продольной скорости резания, либо за счет дополнительного движения режущей кромки инструмента вдоль самой себя. В первом случае реализуется геометрическое косоугольное резание, во втором кинематическое косоугольное резание. Конечные результаты, по интенсивности деформационных процессов формирования стружки и возникающей силе резания, в обеих случаях принципиально не отличаются [9-17].

Особенностью процесса косоугольного точения является движение срезаемого слоя вдоль режущей кромки, вследствие изменения углов резания. Степень деформации, а также главная составляющая силы резания, при увеличении угла наклона главной режущей кромки в пределах от нуля до пятидесяти градусов, постоянной ширине среза и переменной длине режущей кромки, снимающей стружку, остаются практически постоянными и от угла наклона не зависят. Это подтверждается, в частности результатами исследований представленных в работе [11] (рисунок 1.2).

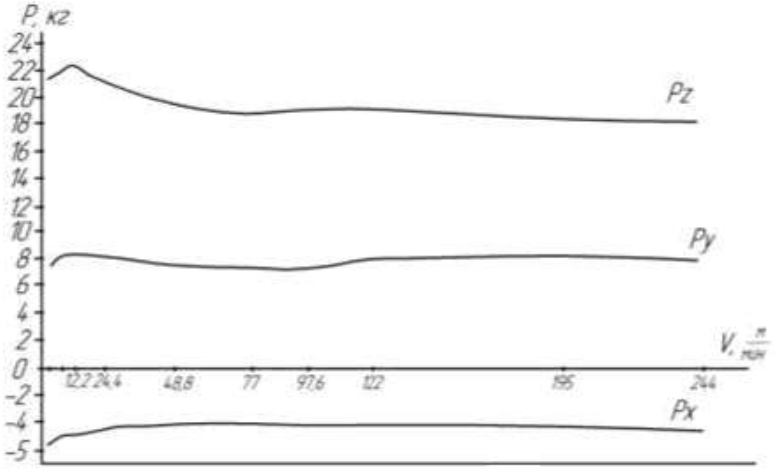


Рисунок 1.2 – Влияние скорости резания на составляющие силы резания при обработке сплава Д16Т при t=0,5 мм, s=0,11 мм/об [11]

Характер кривых свидетельствует также о том, что при косоугольном точении, также как при ротационном [11] возникают отрицательные значения осевой составляющей силы резания Px то есть инструмент не отжимается от поверхности. При увеличении подачи все составляющие силы резания Pz, Px, Py монотонно возрастают. Для процесса косоугольного безвершинного точения характерно отношение составляющих силы резания P_y/P_z близкое к единице и больше единицы, причем это отношение увеличивается с ростом твердости обрабатываемого материала.

Как было справедливо отмечено в многочисленных исследованиях [18-25], при косоугольном точении на поверхностях детали не образуется винтовой линии (шероховатость Ra = 0,6÷1,25мкм), что делает возможным использования данного метода в качестве финишной обработке. Обеспечивается также существенное повышение производительности процесса чистовой обработки по сравнению с точением вершинными резцами или шлифованием, особенно при обработке цветных металлов и сплавов [3]. Численные значения высоты остаточных микронеровностей могут быть определены аналитическими расчетами исходя из геометрических параметров режущей части и режимов резания [16] (рисунок 1.3)

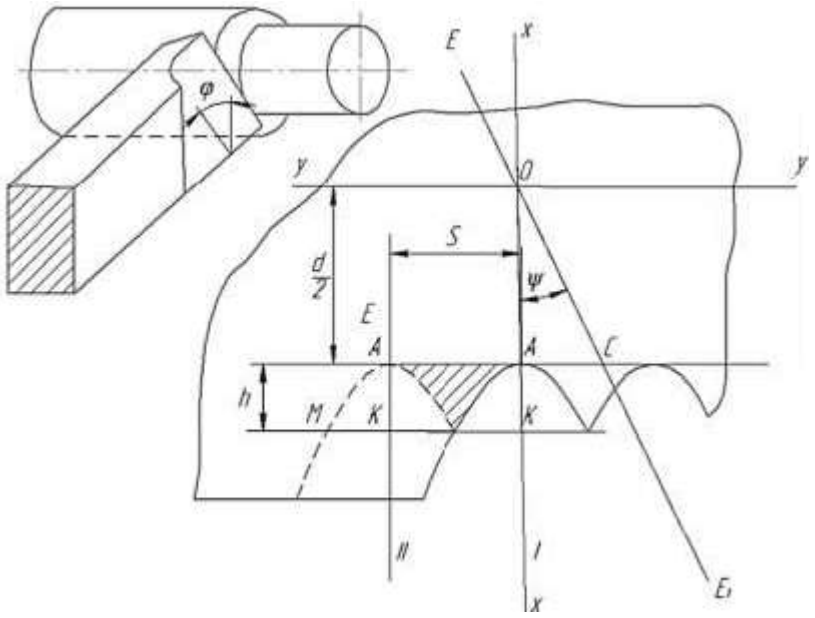


Рисунок 1.3 – Схема для расчетного определения высоты остаточных микронеровностей [16]

Отсутствие вершины режущего лезвия, как потенциально слабого места, обеспечивает плавность врезания, нет жестких требований по регулировке инструмента относительно оси заготовки [7, 26]. Однако, при резании происходит объемная деформация срезаемого слоя материала по нескольким направлениям и образуется сливная стружка, а значит, повышаются силы трения и температуры в зоне резания [27, 28], снижается стойкость инструмента и качество поверхностного слоя [2, 21, 25].

Метод косоугольного точения имеет ограничения с точки зрения возможных глубин резания, общей толщины срезаемого слоя, а значит производительности процесса. Только если угол наклона режущей кромки достигает значений больше пятидесяти градусов можно существенно повысить силы, мощность резания и степени деформации [3, 25]. Поэтому его использование оправдано только на чистовых операциях.

При обработке материалов дающих сливную стружку, а также легкоплавких материалов могут возникать технологические проблемы, связанные с низкой стойкостью инструмента из-за высоких значений сил трения и температур [1, 2], требуется использование токсичных и дорогостоящих СОТС.

Особенности кинематики косоугольного точения, как правило, не позволяют обрабатывать ступенчатые поверхности валов. Известны новые конструкции инструмента (Mass Tools) позволяющие реализовать обработку таких поверхностей, однако они пока не нашли широкого применения. Неравномерная нагрузка на режущей кромке приводит к снижению стойкости косоугольных резцов [1, 3, 7], не могут быть обеспечены высокие скорости резания при обработке крупногабаритных валов. Метод требует обеспечения высокой статической и динамической жесткости станков и инструментальной оснастки.

1.1.2 Анализ известных схем и методов ротационного точения. Результаты исследований и практического применения

Для ротационного точения характерны соизмеримые по скорости вращения движения инструмента и заготовки. Сущность способа заключается в том, что резцу кроме поступательного движения вдоль оси заготовки придается вращение вокруг оси, не пересекающейся с осью вращения заготовки. При этом ось вращения резца перпендикулярна или наклонена под углом к оси заготовки [29-34]. При переходе от традиционного резания к ротационному относительное скольжение в контакте рабочих поверхностей инструмента с обрабатываемым материалом заменяется на качение с проскальзыванием. Доля проскальзывания характеризует степень реализации основного принципа ротационного резания в конкретном инструменте и определяется кинематическим коэффициентом K, равным отношению линейных скоростей резания v_p и детали v_o при резании: $K=v_p/v_o$. [31, 35].

Известные данные по ротационному точению систематизированы в работах Е.Г. Коновалова и П.И. Ящерицына [31, 35], где предложена обобщенная классификация в виде двух геометрических схем ротационного резания, отличающихся функциями, которые выполняют торец и боковая поверхность режущей чашки. При первой геометрической схеме торец чашки выполняет функции передней поверхности, а боковая часть – соответственно задней поверхности лезвия инструмента, как показано на рисунках 1.4, а,б,в, 1.5 [31-33, 34] При установке по схеме, представленной на рисунке 1.4 а, режущая кромка и вершина резца соответственно располагаются на уровне оси центров станка, вращение инструмента осуществляется, как правило, принудительно. Наклон оси резца относительно направления подачи на угол λ обеспечивает его самовращение при обработке. В зависимости от направления поворота различают прямую и обратную схему установки ротационного инструмента. При прямой схеме, представленной на рисунке 1.4 б, поворот оси осуществляется в направлении, совпадающем с направлением вектора подачи. Ротационный резец,

ось которого наклонена противоположно вектору подачи, считается установленным по обратной схеме, представленной на рисунке 1.4 в.

Первая геометрическая схема по П.И. Ящерицыну [31] может быть использована для ротационной обработки наружных поверхностей, а также плоскостей. Она реализована на практике при точении [30, 31], строгании [37, 38], фрезеровании [35]. При противоположном выполнении функций торцом и боковой поверхностью чашки имеет место вторая геометрическая схема ротационного резания, представленная на рисунке 1.4 г,д,е,ж,з,и.[31-34], которая получила наибольшее распространение при различных схемах резания ротационный инструмент, определенным образом устанавливается относительно обрабатываемой поверхности. Во всех случаях для второй геометрической схемы ось резца имеет два угла наклона относительно координатных осей станка или заготовки: угол разворота оси резца φ относительно вектора подачи и угол наклона плоскости режущей кромки ω относительно вектора главного движения. Функции передней поверхности инструмента выполняет при этом боковая поверхность чашки, а функции задней – торец чашки. Вершина резца располагается на уровне линии центров станка, часть режущей кромки находится при этом выше линии центров [31, 34]. Как и для первой геометрической схемы ротационного резания имеет место прямая, представленная на рисунке 1.4 *г,* и обратная, представленная на рисунке 1.4 *д,* схемы установки.

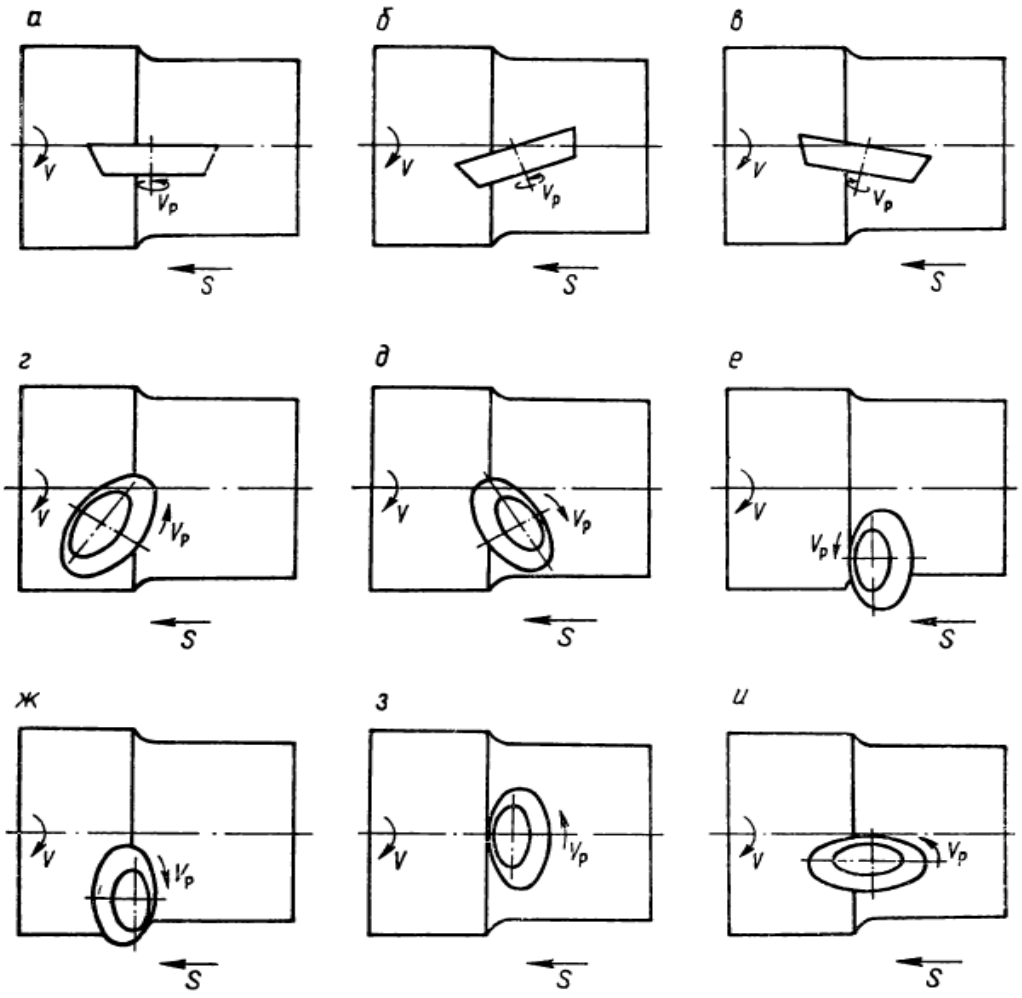


Рисунок 1.4 – Схемы ротационного резания материалов [31]

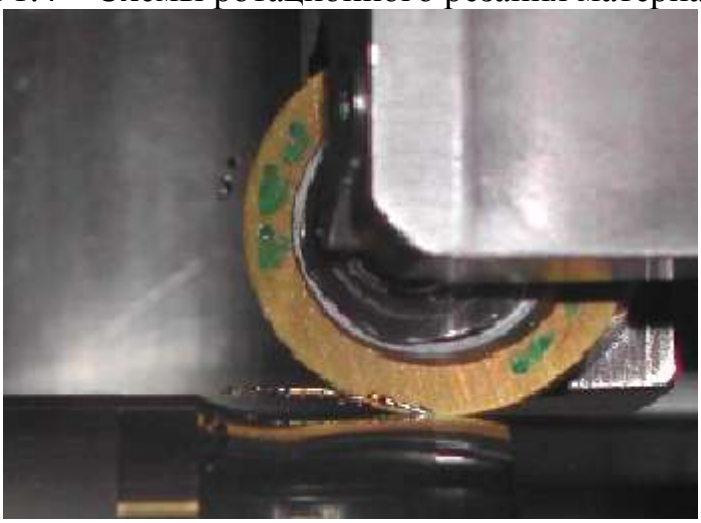


Рисунок 1.5 Ротационное точение по первой геометрической схеме.

Вариант исполнения второй геометрической схемы ротационного резания (одноповоротного) разработан в Физико-техническом институте Белоруссии [31, 35, 36] и отличается наличием одного угла разворота оси резца (угла φ

относительно вектора подачи). Установка инструмента в рабочее положение осуществляется плоскопараллельным смещением повернутого на угол φ резца на величину h, что обеспечивает появление угла ω между вектором главного движения v и плоскостью режущей кромки в нормальном сечении детали, проходящем через вершину резца (рис. 1.6).

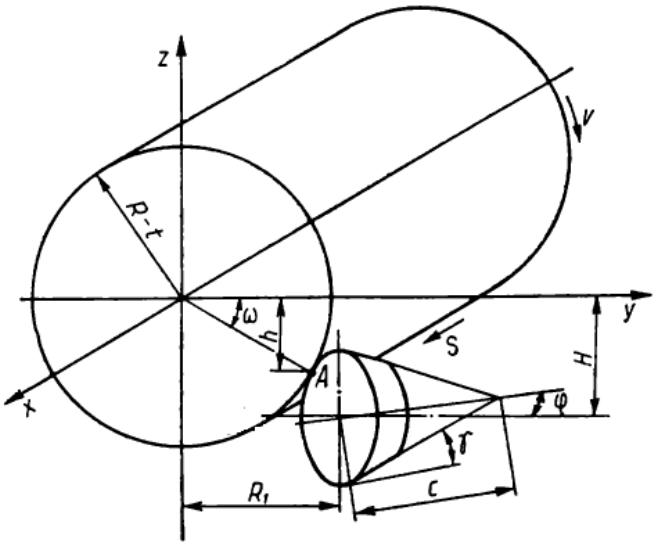


Рисунок 1.6 – Расположение режущей чашки инструмента относительно обрабатываемого вала (вторая геометрическая схема)

На рисунке 1.4 *е* представлена вторая одноповоротная прямая схема установки ротационного резца при точении, а на рисунке 1.4 *ж* – обратная. По аналогии с прямой одноповоротной схемой ротационного резания инструмент работает по методу отслаивания, как показано на рисунке 1.4 *з*. Вершина круглого резца при этом расположена на уровне оси вращения заготовки, а угол разворота оси φ имеет небольшие значения (φ до 10^0). Обработка таким инструментом применяется чаще на обдирочных операциях на оборудовании с вертикальной компоновкой, мощным приводом и высокой жесткостью. Вращение режущей части инструмента осуществляется принудительно с небольшой частотой вращения. В случае, когда ось резца скрещивается с осью вращения заготовки под прямым углом, а вершина резца расположена на уровне линии центров станка, как представлено на рисуноке 1.4, имеет место так называемое тангенциальное точение [31]. Такая схема установки реализуется при принудительном вращении

режущей чашки и в чистовых не вращающихся резцах. При резании по прямой схеме обработанная поверхность не повреждается сходящей стружкой, а при обратной схеме стружка сходит в сторону обработанной поверхности, что может послужить причиной повреждения обработанной поверхности

При ротационном точении обработка заготовки происходит с усадкой стружки по длине и по толщине. Усадка стружки возрастает с увеличением угла наклона между нормалью режущей кромки и вектором продольной скорости резания при монотонном снижении нормальной составляющей силы трения и коэффициента трения. При постоянном суммарном относительном сдвиге, это свидетельствует о том, что усадка стружки не является показателем степени деформации металла при стружкообразовании. Эффективный отвод стружки из зоны резания будет производиться за счет вращения режущего инструмента [31].

В процессе ротационного резания происходит непрерывная смена контактных поверхностей заготовки и инструмента. Кроме того, происходит непрерывное обновление активных участков режущего лезвия, которое периодически участвует в снятии стружки. Известно, что при периодическом прерывании процесса резания улучшаются условия работы режущих инструментов, а также условия контакта и теплоотвод из зоны резания, снижаются усилия резания [34, 39-40]. В процессе ротационного резания сочетаются два эффективных способа повышения режущей способности инструмента и производительности обработки резанием: снижение относительного скольжения в контакте инструмента с деталью и периодизация процесса резания элементарным участком режущего лезвия без прерывания этого процесса. Участки режущей кромки периодически участвуют в съеме припуска с заготовки и, следовательно, охлаждаются вне зоны резания, что также способствует существенному повышению стойкости ротационного инструмента [40]. В результате при образовании стружки уменьшается степень деформации материала, снижается температура в зоне резания, а стойкость инструмента увеличивается [31, 35].

Значительное практическое значение с точки зрения понимания интенсивности деформационных процессов в зоне резания, износа режущего инструмента и качества обработанной поверхности [41-49] имеет изучение тепловых процессов в зоне резания и характера распределения температур на поверхности режущей части ротационных инструментов. Эффективным средством управления процессами теплообмена и снижения температуры на лезвиях является переход от схем непрерывного точения к дискретному периодическому срезанию слоя материала, в том числе применения различных методов ротационного точения и торцевого фрезерования [50, 51]. Применительно к методу торцевого фрезерования валов наиболее важным отличительным преимуществом от известных является снижение времени контакта каждой отдельной режущей кромки инструмента с обрабатываемым материалом. Низкие значения температур, как при ротационном точении, так и при фрезоточении валов на поверхности инструмента объясняются [39, 50] постоянным обновлением участков режущей кромки в зоне резания, дискретностью процесса и спецификой формирования нового элементного типа стружки. В соответствии с кинематикой этих процессов между стружкой и передней поверхностью отсутствует постоянный контакт. Однако, при использовании фрезоточения возможно возникновение кинематической волнистости. Большие радиальные силы приводят к появлению вибраций и ударных нагрузок на элементы технологической системы, что делает применение данного метода не целесообразным при финишной обработке.

В многочисленных исследованиях отечественных и зарубежных авторов, посвященных этой проблеме, приводятся данные по методам моделирования, методикам и аппаратуре для численной оценки и измерения температур [39, 40, 50, 51]. Было показано, что вследствие высоких скоростей вращающегося инструмента при ротационном точении удается достоверно измерять среднюю температуру в зоне резания. Причем, большинство исследователей приводят данные о том, что интегральная температура как минимум на 200^0 С ниже, чем при вершинном и косоугольном точении [39, 50]. Это объясняется постоянным

обновлением участков режущей части инструмента в зоне резания и замещением трения скольжения на трение качения с проскальзыванием стружки по передней поверхности [41, 42, 49]. Однако, температура в зоне резания даже при ротационном точении чашечными резцами может быть достаточно высокой (650-800^0 С) по причине формирования сливной стружки и значительных сил трения на передней поверхности. Для уменьшения сил трения необходимо обеспечивать прерывистый характер резания, как при фрезоточении или PTMP.

Результаты экспериментальных работ [39, 50] свидетельствуют о существующих ограничениях при измерении температуры в системе «инструмент – заготовка – стружка» с помощью камеры инфракрасного тепловизора. Главным его недостатком является низкое разрешение. Диапазон режимов резания (по скорости), в пределах которых могут быть исследованы температуры в зоне резания (особенно на стружке) ограничен. В работах [39, 40, 50] предложены несколько усовершенствованных методик проведения экспериментальных исследований температуры для получения более достоверных результатов. В частности, в работе [50] показана возможность достаточно точного определения температуры на поверхностях детали и режущей части ротационного инструмента (рисунок 1.7).

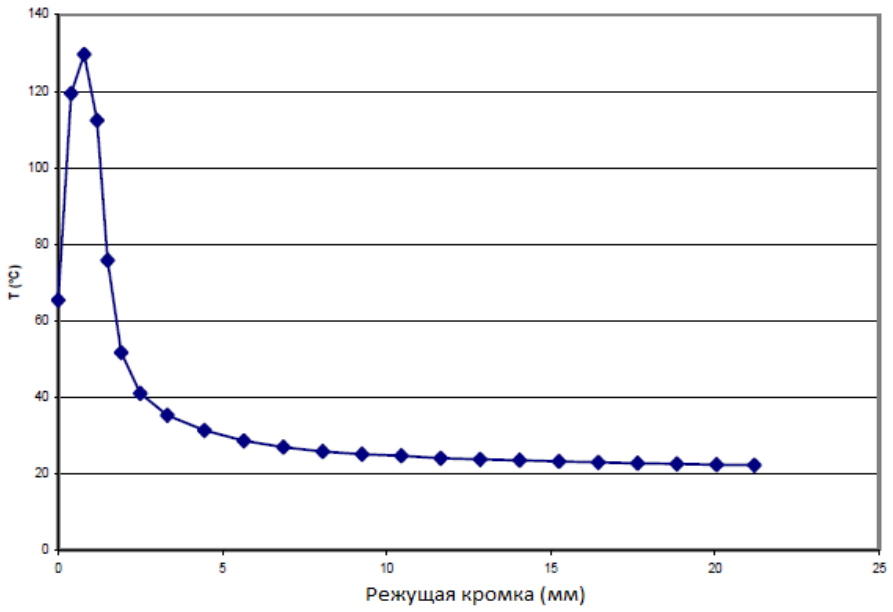


Рисунок 1.7 - Распределение температуры вдоль режущей кромки ротационного резца.

Авторы [39, 50] утверждают, что использование тепловизора при высокоскоростных методах механической обработки, является приемлемым для интегральной оценки температур в зоне резания (рисунок 1.8).

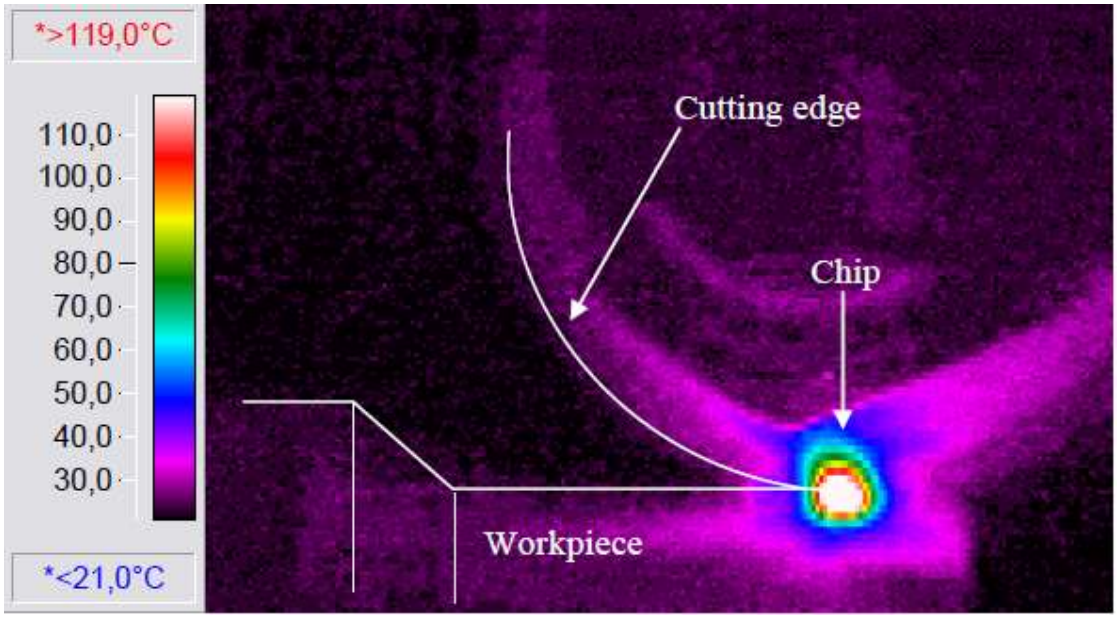


Рисунок 1.8 - Распределение температуры в системе «инструмент-деталь-стружка» при ротационном точении [50]

Ротационное точение, в отличие от косоугольного, может применяться при черновой и чистовой обработке деталей типа тел вращения (валов). При ротационном точении углеродистых сталей стойкость инструмента повышается до 3-х порядков, т.е. в тысячу раз (по сравнению с безвершинным косоугольным точением) вследствие снижения тангенциальной составляющей силы и скорости резания [35]. Обеспечение кинематического стружкообразования и периодизация процесса резания позволяют увеличить производительность обработки в 3 раза [52, 53]. Кинематика ротационного точения позволяет использовать метод при обработке строительных и композиционных материалов [54, 55]. Процесс ротационного точения может сопровождаться одновременным дроблением сливной и вьюнообразной металлической стружки (рисунок 1.9) за счет деления режущей кромки на сектора путем специальной насечки [113].

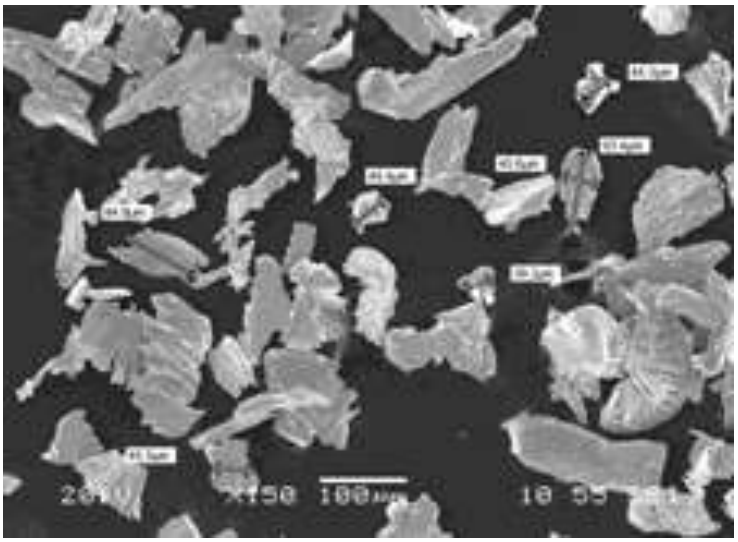


Рисунок 1.9 - Морфология стружки, формирующейся при ротационном точении.

Одним из основных преимуществ ротационного точения является также возможность снижения трения, результирующей силы резания и ее главной составляющей P_z за счет больших значений угла наклона режущей кромки при постоянной длине рабочего участка. Преимущественным отличием методов ротационного точения, в том числе РТМР, является относительно низкие силы резания, действующие на лезвие. Поэтому, большинство исследователей уделяют значительное внимание особенностям деформационных процессов, выбору и обоснованию необходимых углов резания, геометрии режущей части для обеспечения минимальных нагрузок на инструмент. В частности, в работах [31, 35] было показано, что изменяя углы наклона чашки ротационного резца можно существенно снижать усилия резания. Это обеспечивается, за счет перераспределения общей нагрузки, появления отрицательной радиальной, составляющей силы резания [31] (рисунок 1.10).

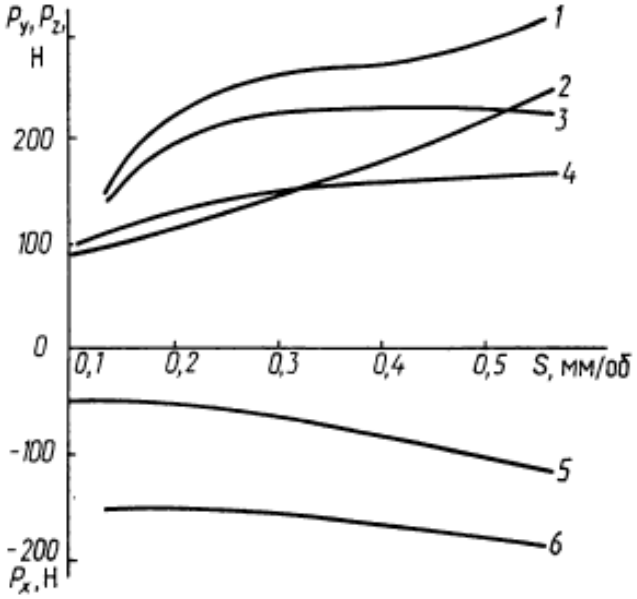
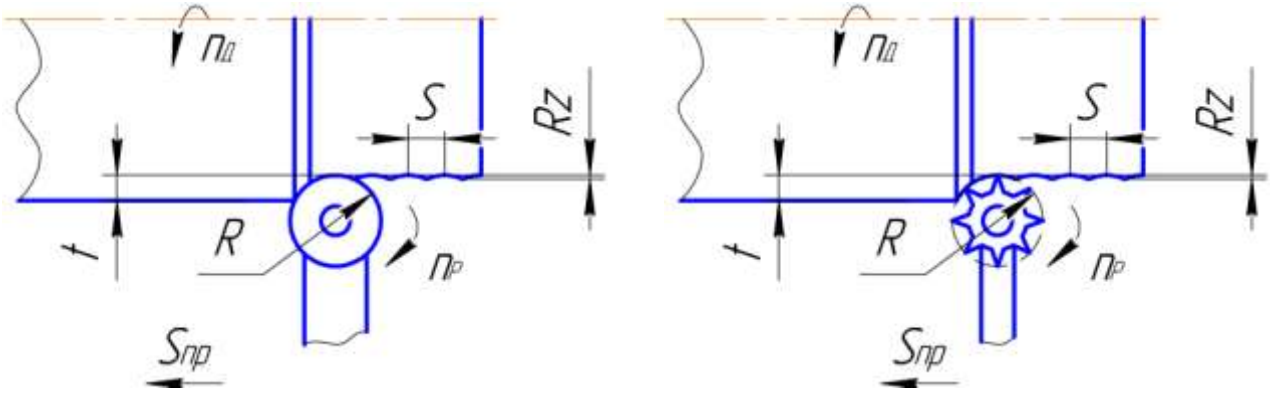


Рисунок 1.10 - Зависимость составляющих сил резания от подачи: 1- Ру; 3 - Pz; 6 – Рх при V=9,6м/с, t=0,34мм; 2- Ру; 4 - Pz; 5 – Рх при V=6,0м/с, t=0,1мм.

Анализ влияния режимов резания на составляющие силы резания показал [30, 37, 39], что при увеличении скорости резания в полтора раза (от 6,0 до 9,6 м/с) увеличиваются значения составляющих силы резания. Принципиально важным отличием ротационного и косоугольного точения от вершинного точения является соотношение составляющих силы резания P_y/P_z больше единицы, причем оно увеличивается с ростом продольной подачи и глубины резания.

Высокое качество поверхности полученной ротационным точением с величинами шероховатости Ra 0,32-1,6 [57] позволяет исключить из технологического процесса последующие трудоемкие финишные операции (шлифования, шабрения и, особенно, сухое шлифование) [35, 54].

Высоту остаточных микронеровностей Rz, образующихся в процессе обработки (рисунок 1.11а), можно рассчитать по формуле $Rz = R \cdot \sqrt{R^2 \cdot \left(\frac{0{,}5 \cdot Sм}{n_P \cdot Z} \right)^2}$, с учетом того что подача S может быть определена через минутную подачу Sм и число оборотов режущей пластины n_P с учетом числа режущих зубьев Z [52].



а) б)

$n_Д$ – число оборотов детали, $n_Р$ – число оборотов инструмента, S – подача, t – глубина резания, Rz – шероховатость, R – радиус режущей пластины резца

Рисунок 1.11 - Кинематика резания ротационным резцом: а) чашечным; б) с разделительной режущей кромкой [52].

Преимуществом ротационных видов точения является возможность существенного увеличения стойкости режущего инструмента за счет постоянного обновления режущей кромки инструмента и увеличение производительности из-за возможности увеличения подачи S без потери качества обрабатываемой поверхности Rz. Образование сливной стружки можно устранить за счет разделения режущей кромки на отдельные сектора (рисунок 1.11б).

В качестве недостатков ротационного точения стоит отметить большие значения радиальной составляющей силы резания, что приводит появление больших прижимных сил по базовой посадочной поверхности отверстия в пластине, зачастую самовращение режущей чашки не происходит из-за заклинивания (или, по крайней мере, нарушается плавность вращения), появляются вибрации технологической системы [34, 37]. По этим причинам предъявляются повышенные требования к статической и динамической жесткости оборудования и оснастки для ротационного точения. Одной из проблем ротационного точения являются сложности, возникающие при механической обработке ступенчатых валов и малый диапазон изменения глубины резания. Отсутствие необходимой стандартной инструментальной оснастки для крепления ротационных резцов также ограничивает области их применения.

1.1.3 Особенности торцевого фрезерования тел вращения (фрезоточение)

Эффективным методом обработки деталей из труднообрабатываемых материалов является метод торцевого фрезерования [58-60], при котором оптимальная скорость главного движения обеспечивается самостоятельным приводом инструмента, а прерывистый характер резания обеспечивает гарантированное дробление стружки. Этот метод получил особенно широкое распространение в последнее время в связи с активным использованием современных многоцелевых трех и пяти координатных станков с ЧПУ, расширением возможностей по кинематике формообразующих движений инструмента и заготовки [61, 62]. Торцевое фрезерование тел вращения (фрезоточение) является аналогом точения многолезвийным вращающимся резцом [58, 59, 61-67]. В этом случае вместо токарных резцов применяют фрезы или набор фрез, когда одна или несколько режущих кромок резцов заменяются большим количеством режущих кромок зубьев фрезы. Каждый из зубьев фрезы участвует в резании очень короткое время по сравнению с непрерывной работой режущей кромки резца вершинного точения. Преимущественные отличия метода заключаются в возможности использования стандартных фрез и перпендикулярном расположении оси фрезы относительно оси заготовки (что упрощает кинематику и наладку технологической системы), как показано на рисунке 1.12.

Фрезерование тел вращения выгодно отличается от традиционной токарной обработки тем, что процесс резания производится с большей производительностью за счет интенсивности дробления и отвода стружки из зоны резания. Это особенно важно при выполнении черновых и получистовых операций, когда резание проходит со значительными сечениями стружки.

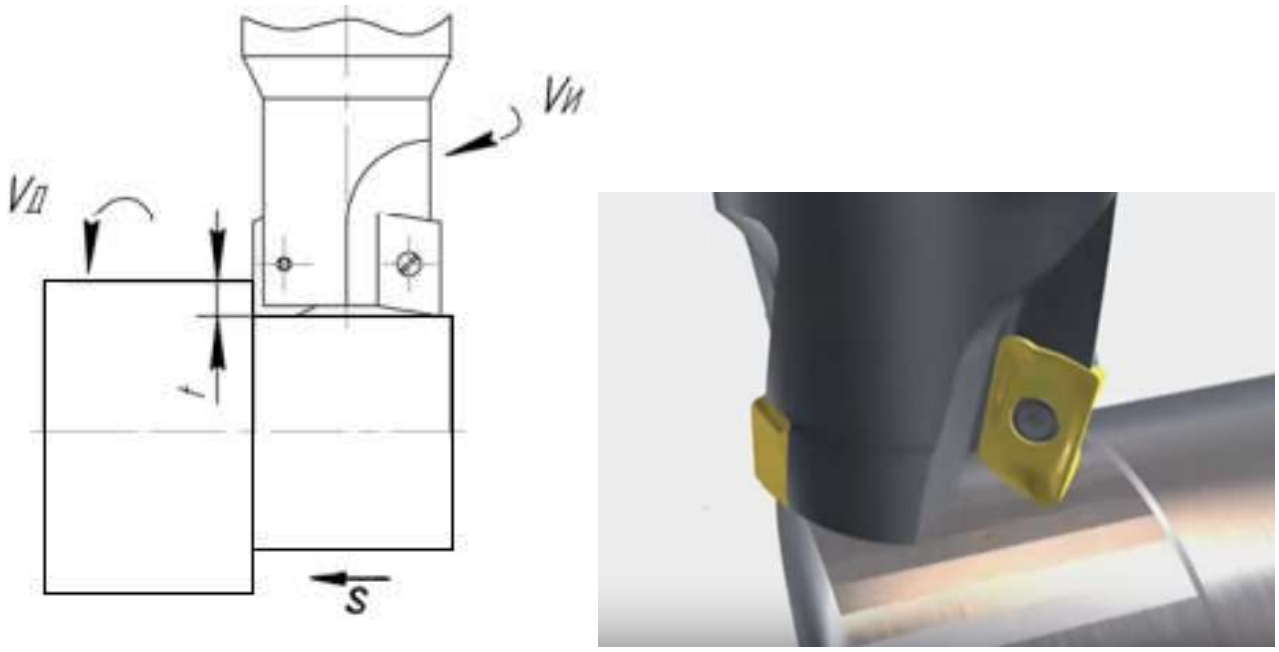


Рисунок 1.12 – Торцевое фрезерование тел вращения (фрезоточение) [52]

По Э.Л. Мархасину [58] направление линейных скоростей вращения заготовки и инструмента при фрезоточении может быть как однонаправленным, так и в противоположных направлениях. Прерывистый характер резания обеспечивает гарантированное дробление и отвод стружки из зоны резания, увеличивается эксплуатационная стойкость инструмента. Расширяются возможности для управления и изменения (диапазона регулирования) скорости главного движения резания, которая обеспечивается самостоятельным приводом инструмента, а мощность, потребляемая на резание, равномерно распределяется между приводами вращения заготовки и фрезы. При использовании торцевого фрезерования существенно снижается влияние температурных факторов, снижаются адгезионный и диффузионный виды износа, обеспечивается высокая производительность обработки [68, 69]. Большинство зарубежных исследователей процессов фрезоточения и ротационного точения особое внимание уделяют изучению формы и размеров стружки, поскольку это позволяет оценить степень и характер деформационных процессов по длине режущей кромки, установить их влияние на интенсивность износа и шероховатость обработанной поверхности. В частности, в работе [70-73] было показано, что дискретность этих процессов резания приводит к формированию различных по форме и размерам элементов

стружки на разных участках траектории вращающегося режущего лезвия (рисунок 1.13). Очевидно, что эти различия имеют отклик на структуре обработанной поверхности, размерах и форме микронеровностей, следа инструмента в виде кинематической волнистости, локальных неоднородностей в виде раковин, микротрещин и т.д. Таким образом, как отмечают большинство исследователей, изучение морфологии стружек позволяет напрямую или косвенно оценивать и их влияние на качество поверхностного слоя при разной геометрии режущей части и режимах резания [72]. Кроме того, существуют разработанные методики оценки интенсивности и характера деформационных процессов по размерам и форме элементов и поверхностей сдвига (рисунок 1.13), по величине усадки, коэффициента интенсивности дробления и другим характеристикам [65]. Это обязательно учитывается при проведении оптимизационных исследований по назначению режимов резания, проектировании и назначении кинематических и геометрических параметров различных инструментов.

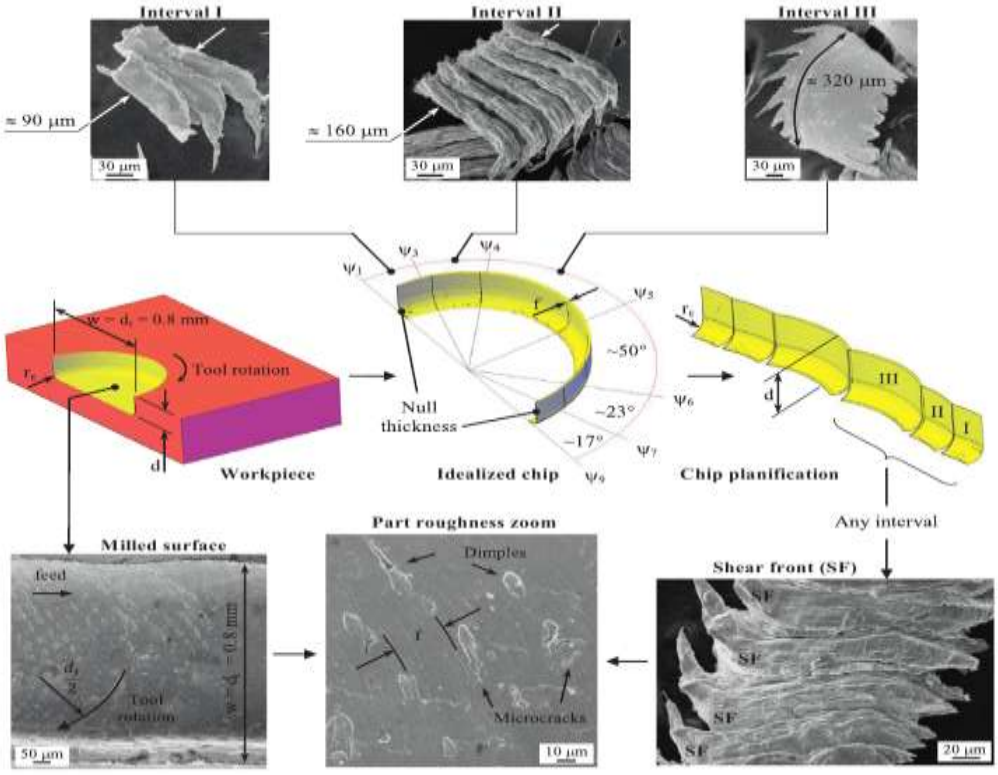


Рисунок 1.13 - Формы стружек на разных участках поверхности резания фрезы и их влияние на параметры шероховатости обработанной поверхности [65]

Особенности процесса торцевого фрезерования при обработке тел вращения и прерывистый характер резания приводят к формированию на поверхности детали кинематической волнистости [58, 63-67]. Наличие ударных нагрузок на инструмент (отдельные режущие кромки) и вибрации технологической системы снижают качество обработанной поверхности и исключают возможность использования этого метода на чистовых операциях.

Высотные размеры расчетных микронеровностей при фрезоточении (рисунок 1.12) могут быть достаточно просто рассчитаны аналитически по формуле $R_Z = \frac{R_Д}{\sin\cdot\left(90 - \frac{90 \cdot S_Z}{\pi \cdot R_Д}\right)} - R_Д$, где Sz подача на зуб, Rд радиус детали [66].

Очевидные ограничения по использованию фрезоточения существуют при обработке крупных и ступенчатых валов, длинномерных заготовок из-за больших радиальных сил, приводящих к прогибу обрабатываемого вала, дополнительным вибрациям, снижению качества обработки.

1.2 Сравнительная характеристика кинематики специальных методов токарной обработки. Преимущества и недостатки

Особое внимание отечественные и зарубежные исследователи уделяют вопросам изучения кинематических и геометрических параметров различных процессов формообразования. Очевидно, что кинематика сложных совмещенных перемещений (вращения и подач) инструмента и заготовки существенным образом влияет на все силовые характеристики, интенсивность и разнонаправленность деформационных процессов, форму и размеры срезаемого слоя, распределение температуры, высоту микронеровностей обработанной поверхности и т.д. Поэтому, для эффективной реализации новых методов ротационного точения необходимо проанализировать особенности кинематики известных, достаточно широко используемых в производственной практике материалообработки методов. Понимание изученных закономерностей и взаимосвязей между кинематическими, геометрическими параметрами

специальных процессов точения и температурно-силовыми, деформационными процессами, качеством обработки при их использовании позволяет осознанно и целенаправленно проектировать соответствующие кинематические и геометрические характеристики новых методов ротационного точения.

Косоугольное наружное продольное точение осуществляется резцом с прямолинейным лезвием, повернутым по отношению к оси заготовки на угол наклона лезвия λ [1-11]. «Безвершинным» называется резец, у которого в работе участвует небольшой участок главной режущей кромки, а вспомогательные кромки и вершина отсутствуют [3, 4, 7].

Основными направлениями исследований по совершенствованию процессов косоугольного безвершинного точения является определение влияния статических и кинематических углов на качество обработанной поверхности и силу резания в процессе обработки. Авторы работ [2-4] отмечают, что изменяя в широком диапазоне скорости резания и подачи можно снижать шероховатость поверхности, обработанной безвершинными резцами различной конструкции (в сравнении с обработкой обычными вершинными резцами на аналогичных режимах).

Как установлено Д. В. Кожевниковым и С.В. Кирсановым [3] при «бреющей» косоугольной обработке происходит обкатывание инструмента по детали, при этом наклонно установленная режущая кромка срезает припуск с вращающейся заготовки. За счет наложения движений инструмента и заготовки точка резания последовательно смещается по образующей линии детали. Таким образом, реализуются благоприятные условия для режущей кромки, возникающие силы резания существенно снижаются [7]. При косоугольном точении движения резания осуществляют по сравнительно простому по кинематике способу свободного строгания широким резцом с углом наклона главной режущей кромки $\lambda \neq 0$, как показано на рисунке 1.8 [1, 3, 7].

В работах [3, 7, 9] показано, что сечение срезаемого слоя при бреющем точении неравномерно распределено на сравнительно большой длине режущей кромки. При этом толщина срезаемого слоя материала значительно меньше его

ширины. Большая часть срезаемого материла (рис. 1.14), удаляется участком режущей кромки расположенным ниже оси вращения заготовки. Если изменить угол наклона лезвия λ с отрицательного на положительный (либо изменить направление подачи), то изменится схема резания. Срезание материала будет производиться участком режущей кромки расположенным выше оси вращения. Но при этом форма сечения и объем срезаемого слоя материала не изменятся.

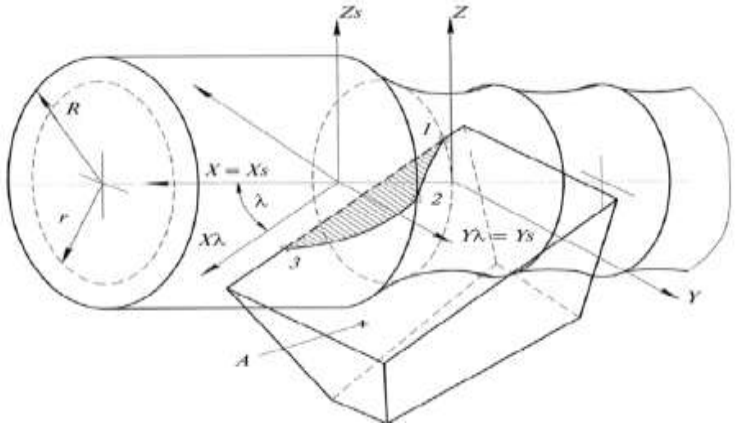


Рисунок 1.14 – Свободное косоугольное резание

При использовании свободного косоугольного резания толщина сечения срезаемого слоя изменяется от минимума (a=0) до максимума, достигая величины a=t при больших значениях подачи и угла наклона лезвия. Ширина также имеет переменное значение и изменяется в большом диапазоне. Таким образом, форма сечения срезаемого слоя, образованная при точении бреющим резцом, принципиально отличается от сечения, полученного при работе традиционным вершинным инструментом.

При косоугольном точении в отличие от прямоугольного резания реализуется объемная (трехмерная), а не плоская (двухмерная) деформация. Описанные выше кинематические особенности и геометрические параметры процессов ротационного резания определяют условия стружкообразования, качество обработки, работоспособность режущего инструмента и являются исходными данными для выбора режимов резания и геометрии инструмента.

Все кинематические схемы резания, могут быть классифицированы на VIII групп (по классификации Грановского Г.И [67], Коновалова Е.Г. [35] и Ящерицына П.И [31]) в зависимости от сочетания, количества и вида

составляющих формообразующих движений. В соответствии с этой классификацией к IV группе относятся схемы обработки, характеризуемые одним вращательным и одним прямолинейным движениями. К этой группе относятся такие способы обработки ротационным резанием, как долбление, протягивание и строгание, причем лишь последний из них нашел практическое применение [30, 31, 35, 37]. Большинство ротационных инструментов работает по схемам VII группы, в этом случае одно из двух вращательных движений сообщается режущей части инструмента, а другое – либо инструменту (фрезерование), либо заготовки (точение, растачивание). Совокупность этих вращений и определяет сложный характер результирующих формообразующих движений. Практическое применение нашла лишь небольшая часть кинематических схем резания VII группы (рис. 1.15). Схема 1 реализована в конструкциях токарного ротационного инструмента с принудительным приводом [31, 35], схема 2 – в токарном само- и принудительно - вращающимся инструментом по первой геометрической схеме ротационного резания [31-35], а также при зенкеровании [31, 35]. Схемы 3, 4 используются при токарных и расточных операциях с инструментом, установленным по второй геометрической схеме ротационного резания [31, 35, 37, 39, 40]. Схемы 5,6 реализуются при использовании торцевых фрез с вращающимися режущими пластинами [31, 35, 47-49].

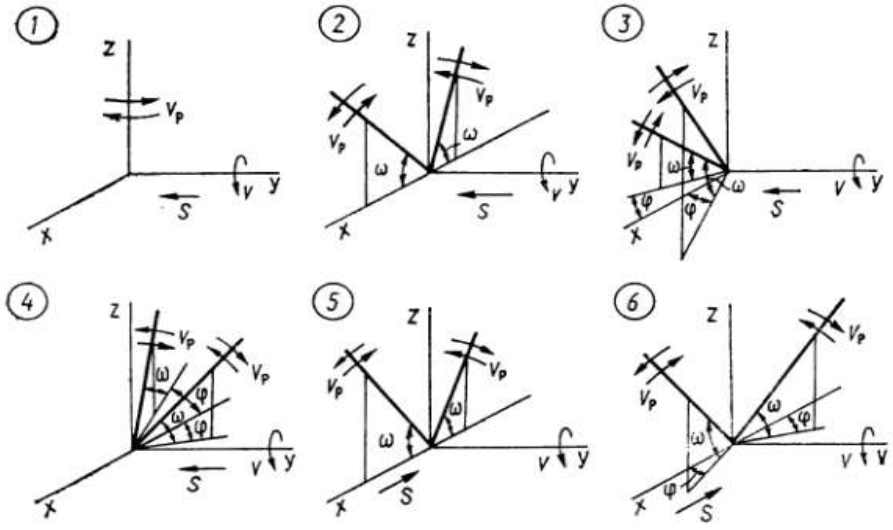


Рисунок 1.15 – Кинематические схемы резания VII группы, реализованные в ротационных режущих инструментах [31]

Во всех кинематических схемах ротационного точения соблюдается условие взаимосогласованного вращения заготовки и инструмента. Ведущим звеном в кинематической схеме является заготовка, а относительно заготовки вращается режущий инструмент [30, 31, 33, 35].

Важнейшей отличительной особенностью, ротационного резания является самопроизвольное вращение режущей чашки в подшипниковом узле под действием сил резания (либо принудительное вращение через механизмы станка) при сохранении других основных движений резания, то есть скорости и подачи.

Для ротационного точения ведущим звеном будет являться обрабатываемое тело, приводящее во вращение чашу в подшипниковом узле путем воздействия на нее тангенциальной составляющей силы трения, возникающей при перемещении одного тела относительно другого.

Поскольку, одним из основных критериев технико-экономической эффективности любого способа формообразования резанием является качество обработанной поверхности необходимо особое внимание уделять изучению процессов износа инструмента. Существенной проблемой, при реализации на практике кинематических схем ротационного точения, является появление больших прижимных сил по базовой посадочной поверхности отверстия в пластине, зачастую самовращение режущей чашки не происходит из-за заклинивания (или, по крайней мере, нарушается плавность вращения). Это приводит к локальному интенсивному износу на круговой режущей кромке (рис. 1.16), нарушению качества обработки [33, 34, 38, 41, 50].

Рисунок 1.16 – Износ круговой режущей кромки при ротационном точении

Способы торцевого фрезерования валов (фрезоточения) находятся в промежуточной области видов обработки резанием - между фрезерованием и

точением фрезой [58]. Анализ компоновок шпинделей заготовки и инструмента показывает, что наибольшую жесткость и наименьшие размеры рабочей зоны станка обеспечивает взаимно перпендикулярное расположение их осей [53, 58, 61].

Фрезерование тел вращения торцевыми фрезами может быть осуществлено тремя методами: фрезерование с принудительной продольной подачей $S_{пр}$, фрезерование с применением подачи по касательной к детали $S_Т$, фрезерование с применением подачи по радиусу детали $S_Р$. В основу фрезерования торцевыми фрезами положена кинематическая схема, представленная на рисунке 1.17.

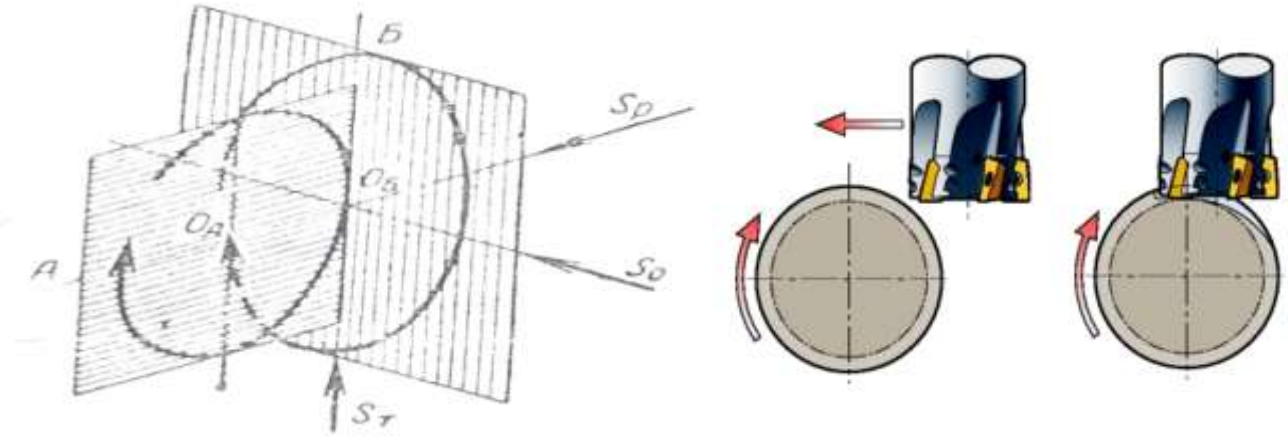


Рисунок 1.17 – Кинематическая схема торцевого фрезерования [58, 65]

Процесс резания осуществляется в результате одновременного вращения с различными угловыми скоростями обрабатываемой заготовки А и режущего инструмента Б (оси вращения которых взаимно перпендикулярны) и равномерное прямолинейное перемещение режущего инструмента.

Перемещение режущего инструмента может происходить вдоль оси вращения заготовки по $S_{пр}$, по касательной к обрабатываемой заготовке $S_Т$ либо вдоль оси фрезы по $S_Р$. Наиболее эффективным является перемещение инструмента вдоль оси вращения заготовки по $S_{пр}$. Э.Л. Мархасин и С.А. Сидоренко отмечают в своих работах [58, 61, 70, 72], что отношение окружной скорости заготовки и инструмента для приведенной кинематической схемы $i = \frac{V_A}{V_Б}$ варьируется в диапазоне от 0,001 до 0,01.

Обработка по данной схеме производится одной или двумя торцевыми фрезами, вращающейся вокруг своей оси, и перемещающейся вдоль оси вращающейся заготовки. Когда заданный линейный размер обработан, движение подачи прекращается. Однако обработка в целом заканчивается только после того, как обрабатываемая деталь повернется на угол 370^0 (или 185^0 при двухстороннем расположении режущего инструмента).

Кинематика процесса торцевого фрезерования предполагает дискретный, периодический характер врезания каждой пластины в заготовку. Это приводит к вибрациям, микроударным нагрузкам на режущие кромки, возможному их разрушению сколом [58, 61, 68, 71]. Следствием этих факторов является неизбежное появление случайных и регулярных микро и макронеровностей на поверхности деталей (волнистость, отклонения размеров за пределы полей допусков). Кроме того, существуют объективные ограничения при обработке габаритных деталей (валов большого диаметра и длины), а также нежестких длинномерных заготовок. По этим причинам этот способ и кинематическая схема имеют ограничения по производительности и качеству обработки поверхностного слоя. Как правило, инструмент и кинематические схемы торцевого фрезерования применяют в современных многоцелевых станках с ЧПУ, которые имеют необходимые инструментальные и шпиндельные узлы, однако небольшие размеры рабочего пространства.

Метод ротационного точения многогранными резцами (РТМР) был впервые предложен (на уровне технического решения) специалистами Брянской школы технологии машиностроения – Рыжов Э.В., Индаков Н.С., Петровский Э.А. [74], как один из вариантов ротационного точения. Однако уникальные ресурсы метода РТМР по возможным скоростям резания, интенсивности и производительности обработки не получили развития. По сути, они остались нереализованными и малоизученными как теоретически, так и экспериментально. Это объясняется тем, что на тот период времени (1986-2000гг.) отечественное (а отчасти и зарубежное) машиностроение не было обеспеченно оборудованием с необходимыми для эффективной реализации метода РТМР технологическими и кинематическими

возможностями (по скоростям приводов, компоновке шпиндельных и инструментальных узлов, конструкциям и инструментальным материалам для высокоскоростного резания). По этим причинам метод РТМР не мог получить достойного развития и применения на практике. Ситуация в металлообработке кардинально изменилась по мере широкого распространения и применения на практике 3-х и 5-ти координатных многоцелевых станков с ЧПУ, имеющих кинематику, компоновку шпиндельных и инструментальных узлов, позволяющих реализовать высокие скорости главного движения резания, подач, дополнительных приводов вращения инструмента и, самое главное, возможности их совмещения. Поэтому появились возможности и реальные предпосылки для развития и совершенствования высокопроизводительных методов РТМР с целью их расширенного и эффективного применения в практике материалообработки. Дополнительным аргументом является и тот факт, что современные методы компьютерного моделирования (CAD, CAM технологии) позволяют с большой эффективностью производить проектирование и изготовление сложных по форме, геометрии режущей части и кинематике пластины для оснащения инструментальных модулей РТМР. В последние годы резко увеличилось количество публикаций по исследованию и практическому использованию методов и инструмента для ротационного точения, особенно в зарубежных изданиях [68, 69], презентационных материалах ведущих фирм – производителей инструмента и станков [68, 69]. В последние годы существенный, качественный скачок сделан в области разработки и применения новых твердосплавных композитов на основе субмикронных карбидов [75, 76]. Эффективным направлением для повышения трещиностойкости, прочности, теплостойкости твердосплавных материалов является дополнительное легирование кобальтовой прослойки наночастицами карбидов (хрома, ванадия), нитридов, оксидов [75]. Использование твердых сплавов с субмикронными карбидными зернами и дополнительно модифицированных добавками наночастиц оксидной, карбидной, нитридной фазы, является общепризнанной мировой тенденцией [76]. Режущий инструмент, оснащенный пластинами из таких материалов, производится

ведущими зарубежными фирмами (Sandvik Coromant (Швеция), Iscar (Израиль), Pramet (Чехия), ZCC (Китай). Kermametal Inc. (США), Krupp Widia GmbH, Hertel Kermametal AG (Германия), Tizit AG (Австрия), Exstra-met (Швейцария), Bohlerit GmbH (Австрия), Mitsubishi Metal Corp. и Sumitomo Electric (Япония), Boart Int. (Германия)) и уже широко применяется при высокоскоростной обработке материалов групп (P, M, N). Уровень комплекса свойств твердых сплавов позволяет воспринимать (выдерживать) одновременно не только высокие скорости резания, температуры, но и ударные нагрузки (причем на самых разных материалах заготовок). Именно этот набор свойств необходим для высокоскоростных и дискретных процессов деформации, характерных для РТМР.

Таким образом, можно утверждать, что существующая общемировая тенденция на расширенное использование высокопроизводительных методов ротационного точения в современных станках определяет актуальность выбранного направления исследований.

Естественно, влияние всех перечисленных выше факторов на эффективность процессов механической обработки следует оценивать и изучать не только по отдельности, изолировано (по методу независимых частных экспериментов). Общепризнано, что между ними существуют вполне определенные функциональные взаимосвязи, изменение любого из параметров режимов резания, геометрии режущей части, материалов инструмента и заготовки и т.д., будет иметь отклик на температуру, усилия, интенсивность деформации в срезаемом слое. В конечном итоге (в совокупности) это определяет требуемое сочетание производительности и качества обработки поверхностного слоя. Поэтому, проведение комплексных параметрических теоретических и экспериментальных исследований является необходимым условием для практической реализации нового перспективного метода РТМР.

1.3 Выводы. Постановка целей и задач исследования

Проведенный анализ накопленных данных по результатам исследований и практическому применению специальных методов безвершинного косоугольного

точения, ротационного точения с принудительным и самовращением инструмента, а также торцевого фрезерования позволяет утверждать, что ни один из представленных методов при обработке труднообрабатываемых материалов и габаритных заготовок не позволяет обеспечить одновременно и высокую производительность и требуемое качество обработки поверхности. Существуют значительные резервы по совершенствованию методов, основанных на схемах ротационного точения, повышению их технико-экономической эффективности.

Выводы по разделу:

1. 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.

2. Известные теоретические схемы процесса ротационного точения не дают полного представления о характере деформационных процессов в слое материала, функциональных взаимосвязях между геометрией режущей части инструмента и кинематикой процесса, силовыми характеристиками РТМР и конечными показателями качества и производительности обработки.

3. Общепризнанным является тот факт, что различные методы формообразования, основанные на схемах ротационного точения, имеют преимущества перед традиционным вершинным точением, поскольку изменяется характер контактного взаимодействия между режущей кромкой инструмента и поверхностью заготовки. Вращение режущей кромки обеспечивает постоянную смену поверхностей и точек врезания, что создает более благоприятные условия для отвода температуры из зоны резания, снижения износа инструмента.

4. Известные методы не в полной мере реализуют возможности дробления стружки (особенно длинной, сливной), что негативно сказывается на эксплуатационной стойкости, поскольку интенсивность износа увеличивается вследствие большой поверхности контакта инструмента со стружкой, росту температур на режущей части. По этим же причинам ухудшается качество поверхностного слоя детали, появляется необходимость использования смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС).

5. При фрезоточении оптимальная скорость главного движения обеспечивается самостоятельным приводом инструмента, а прерывистый характер резания способствует дроблению стружки. Однако дискретность процесса резания приводит к формированию кинематической волнистости, возникновению ударов и вибраций технологической системы, что снижает качество поверхности и исключает возможность использования такого фрезерования в качестве финишного способа обработки. Кроме того, фрезоточение имеет низкую производительность, особенно при обработке валов большого диаметра.

6. Многочисленными исследованиями достоверно показано, что изменяя геометрию инструмента, кинематику и режимы резания можно обеспечить снижение волнистости и шероховатости поверхностного слоя. Однако, существующие возможности для управления качеством обработки ротационным точением далеко не исчерпаны, метод РТМР с этой точки зрения является потенциально весьма перспективным.

На основании выявленных преимуществ и недостатков известных методов определены перспективные направления для проведения теоретических и экспериментальных исследований, сформулированы цели и задачи работы.

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

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.

Решение поставленных задач осуществляется путем проведения экспериментальных и теоретических исследований, конструкторских разработок и внедрения результатов исследования.

Раздел 2. Теоретическое исследование процессов формообразования при РТМР

2.1 Кинематическая схема процесса РТМР. Определение режимов резания.

Кинематическая схема (рис. 2.1), исследуемого в диссертационной работе метода РТМР, может быть по классификации Грановского Г.И [67] и Коновалова Е.Г. [35] отнесена к VII группе, в которой одно из двух вращательных движений сообщается инструменту, а другое обрабатываемой заготовке (рисунок 2.1).

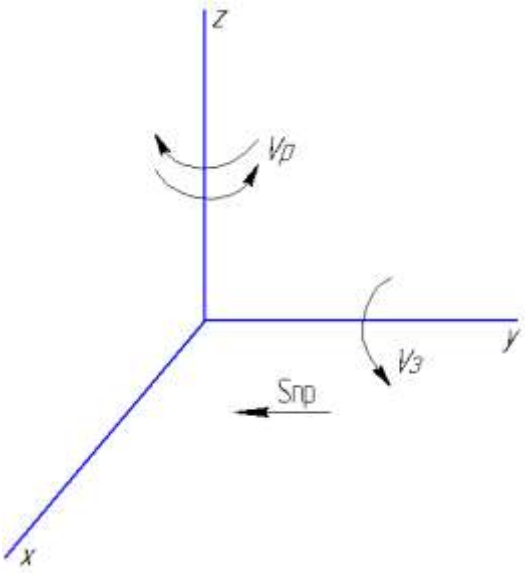


Рисунок 2.1 – Кинематическая схема

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 со скоростью V_p и имеет продольную подачу $S_{пр}$ относительно вращающейся заготовки, что приводит к постоянному обновлению режущей кромки в зоне резания. Главным движением резания является вращение

инструмента. Причем, скорость вращения инструмента должна быть на порядок больше скорости вращения заготовки [77-81]. Схема обработки многогранным ротационным резцом приведена на рисунке 2.2.

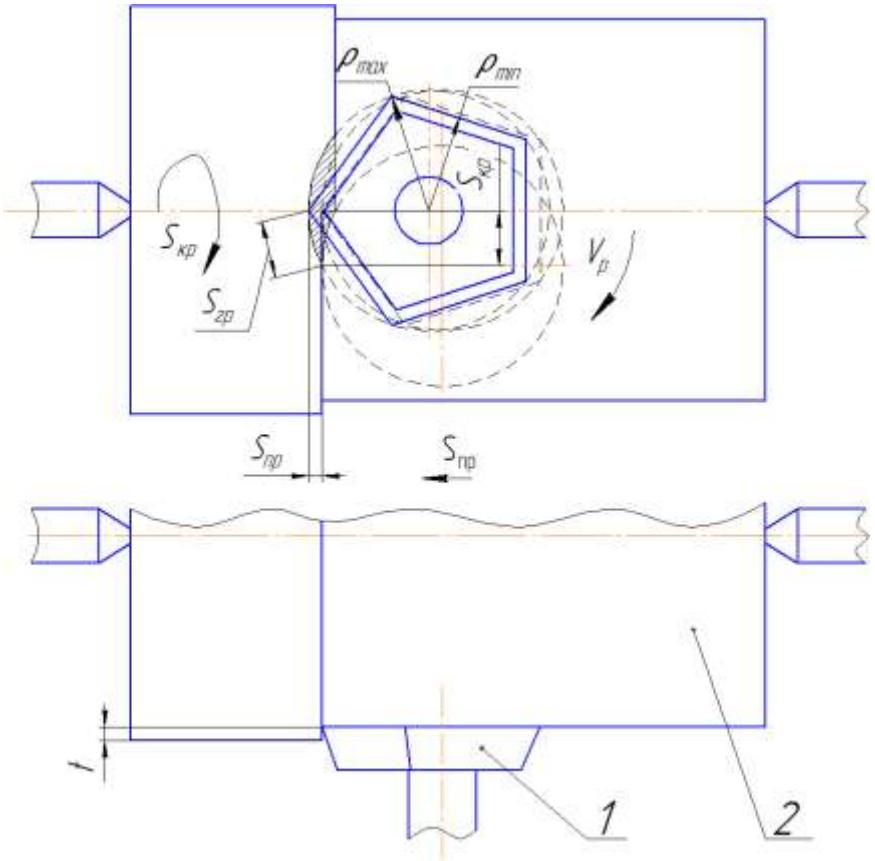


Рисунок 2.2 - Схема процесса обработки многогранным ротационным резцом (1 – ротационный резец, 2 – заготовка).

В формировании обрабатываемой поверхности участвуют три движения: главное движение V_p, прямолинейное движение или продольная подача $S_{пр}$ и круговая подача $S_{кр}$ [82-85].

Продольная подача для РТМР на грань резца определится по формуле:

$$S_{пр_{гр}} = \frac{S_{пр_{ст}} \cdot n_з}{n_р \cdot N}; \quad (1)$$

где: $S_{пр_{ст}}$ – продольная подача резца на оборот обрабатываемого вала, $[мм/об]$;

$n_з$ – число оборотов заготовки, $[об/мин]$;

$n_р$ – число оборотов инструмента, $[об/мин]$;

N – число граней профиля резца.

Круговая подача на грань резца находится по формуле:

$$S_{кр_{гр}} = \frac{\pi \cdot d_3 \cdot n_3}{n_p \cdot N}; \quad (2)$$

где: d_3 – диаметр заготовки, $[мм]$.

Характерной особенностью метода РТМР является возникновение конструктивной подачи S_k на участке профиля с возрастающим радиус-вектором [77, 78, 82, 83]. При этом срезаемая стружка, формирующаяся в виде отдельных участков клинового типа, сходит по передней поверхности со скольжением вдоль режущей кромки лезвия.

Конструктивная подача исходя из геометрических соображений определяется по формуле:

$$S_к = (\rho_{\max} - \rho_{\min}) = (\rho_{ср} + e) - (\rho_{ср} - e) = 2e, \quad (3)$$

где: $\rho_{\max}$ – максимальный радиус-вектор контура режущей кромки, $[мм]$;

$\rho_{\min}$ – минимальный радиус-вектор контура режущей кромки, $[мм]$;

$\rho_{ср}$ – средний радиус-вектор контур режущей кромки, $[мм]$;

e – эксцентриситет профиля инструмента, $[мм]$.

Соответственно, подача на одну грань профиля резца находится по формуле:

$$S_{гр} = \sqrt{S^2_{кр_{гр}} + S^2_{пр_{гр}}}; \quad (4)$$

Скорость главного движения резания находится по формуле:

$$V_p = \frac{2\pi \cdot \rho \cdot n_p}{1000}; \quad (5)$$

где: ρ – радиус-вектор контура режущей кромки, [мм].

При сложном сочетании трех и более одновременно осуществляемых движений, дополнительное движение, которое появляется у метода РТМР определяет особенности процессов формообразования.

Скорость дополнительного движения формообразования или круговая подача $S_{кр}$ определится по формуле:

$$S_{кр} = \pi \cdot d_З \cdot n_З; \quad (6)$$

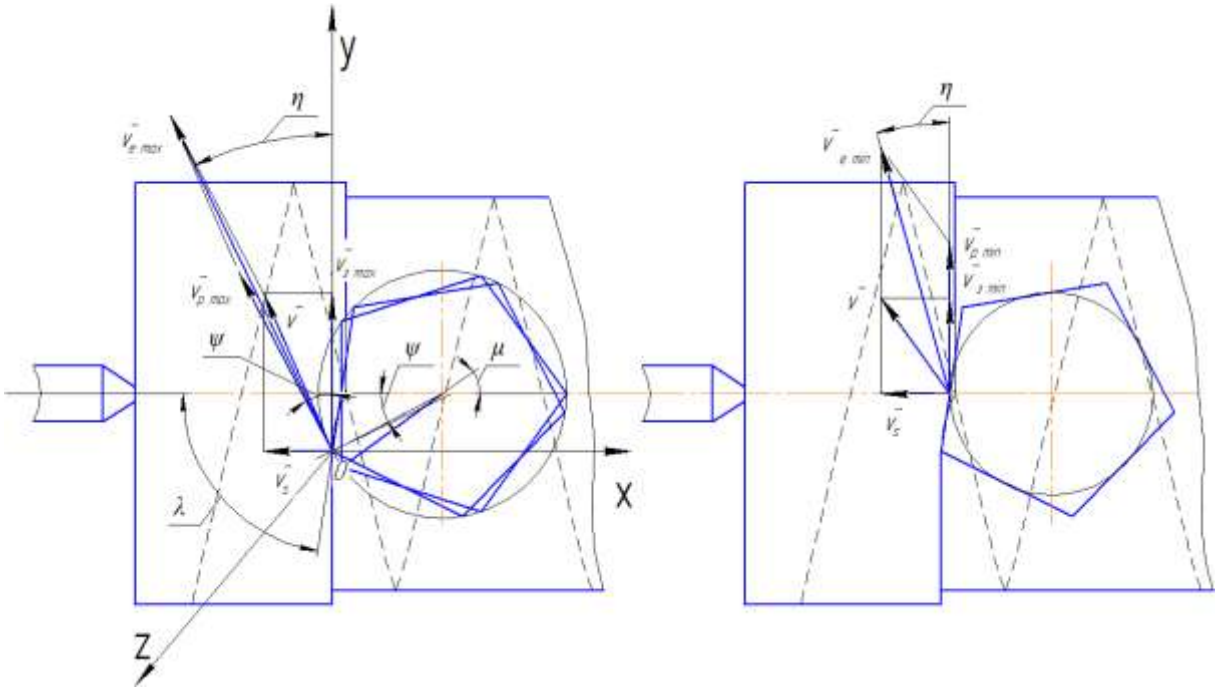


Рисунок 2.3 - Схема определения вектора скорости результирующего движения резания

Многогранная форма режущей кромки приводит к изменению скорости резания в каждой точке на гранях режущего профиля резца, образованного всеми точками на гранях в пространстве: от $V_{p\min} = \frac{2\pi \cdot \rho_{\min} \cdot n_p}{1000}$ до $V_{p\max} = \frac{2\pi \cdot \rho_{\max} \cdot n_p}{1000}$.

Так как, точки режущей кромки во время ротационного точения находятся на разном удалении от оси вращения заготовки, то возникает необходимость в определении максимальной и минимальной круговой подачи:

$$S_{кр\,max} = \pi \cdot d_{З\max} \cdot n_З; \quad (7)$$

$$S_{кр\,min} = \pi \cdot d_{З\min} \cdot n_З = \pi \cdot d_д \cdot n_o; \quad (8)$$

где: $d_{З_{\max}}$ – диаметр обрабатываемой заготовки, $[мм]$;

$d_{З_{\min}}$ – диаметр обработанной заготовки, $[мм]$;

Одновременно действующие главное, вспомогательное и дополнительное движения при РТМР в совокупности определяют пространственную траекторию результирующего движения резания [82, 83].

Скорость результирующего движения резания в этом случае определяется по формуле:

$$\bar{\upsilon}_e = \bar{\upsilon}_з + \bar{\upsilon}_s + \bar{\upsilon}_р; \tag{9}$$

$$\begin{aligned} \bar{\upsilon}_e &= (0; \frac{S_{kp}}{1000}; 0) + (\frac{-S_{np} \cdot n_3}{1000}; 0; 0) + (-V_p \cdot \sin\psi; V_p \cdot \cos\psi; 0) = \\ &= (\frac{-S_{np} \cdot n_3}{1000} - V_p \cdot \sin\psi; V_p \cdot \cos\psi + \frac{S_{kp}}{1000}; 0); \end{aligned} \tag{10}$$

$$\left|\bar{\upsilon}_e\right| = \sqrt{(\frac{-S_{np} \cdot n_3}{1000} - V_p \cdot \sin\psi)^2 + (V_p \cdot \cos\psi + \frac{S_{kp}}{1000})^2}; \tag{11}$$

где: $\bar{\upsilon}_з$ – вектор скорости круговой подачи заготовки, [м/мин];

$\bar{\upsilon}_s$ – вектор скорости продольной подачи инструмента, [м/мин];

$\bar{\upsilon}_р$ – вектор скорости главного движения (движения формообразования), [м/мин];

ψ – угол наклона между вектором скорости главного движения $\bar{\upsilon}_p$ и координатной осью y.

Так как вектор скорости главного движения $\bar{\upsilon}_p$ практически во всех случаях находится под углом к координатным осям, то возникает необходимость в определении угла наклона между ними.

$$\sin\psi = \frac{S_{kp}}{\rho_{\max}}; \tag{12}$$

Необходимо иметь в виду, что плоскость резания в каждый момент времени изменяет свое положение, перемещаясь касательно к заготовке, что является следствием действия сил резания как выше, так и ниже оси центров.

Угол подъема винтовой траектории η связан с круговой подачей и результирующей скоростью резания следующей зависимостью:

$$\cos\eta = \frac{V_p \cdot \cos\psi + (S_{kp}/1000)}{\left|\bar{\upsilon}_e\right|}; \qquad (13)$$

Так как различные точки режущей кромки находятся на разном удалении от оси вращения заготовки то, согласно уравнению (13), вектор результирующего движения резания $\bar{\upsilon}_e$ в каждой точке режущей кромки имеет различные значения по величине и углу подъема. При ротационном точении вектор окружной скорости резца является переменным по величине и направлению. Во всех точках лезвия вектор скорости υ будет разнонаправленным и располагается в разных плоскостях [77, 78, 83]

2.2 Определение геометрических параметров режущей части инструмента при РТМР.

Предложенный новый метод РТМР принципиально отличается от других известных методов точения [3, 31, 35, 58], как по форме режущей части инструмента, так и по способу срезания слоя материала, кинематическим и силовым параметрам процессов деформации [84-86, 87]. Для его эффективной реализации необходимо получить аналитические расчетные формулы для определения рациональных геометрических параметров режущей части, которые впоследствии позволят рассчитывать и оптимизировать режимы резания и силовые характеристики РТМР. Для описания конструктивных особенностей инструмента РТМР предложена привязка к статической и кинематической системе координат и разработана методика определения (расчета) углов режущей части инструмента, где значения угловых кинематических параметров определяют как результат относительного движения резца и заготовки в каждый точке по всей длине режущей кромки [86, 87].

Ротационный резец для РТМР представляет собой многогранное тело чашечной формы с посадочным отверстием и режущей частью, состоящей из N режущих лезвий. Каждое лезвие в виде прямолинейной режущей кромки

образовано пересечением задней и передней поверхностей. Режущие кромки, размещенные в плоскости, перпендикулярной оси вращения ротационного резца, образуют режущий многоугольник [86, 88, 89].

Режущая кромка при взаимодействии с заготовкой имеет постоянно изменяющийся угол наклона λ (рисунок 2.4).

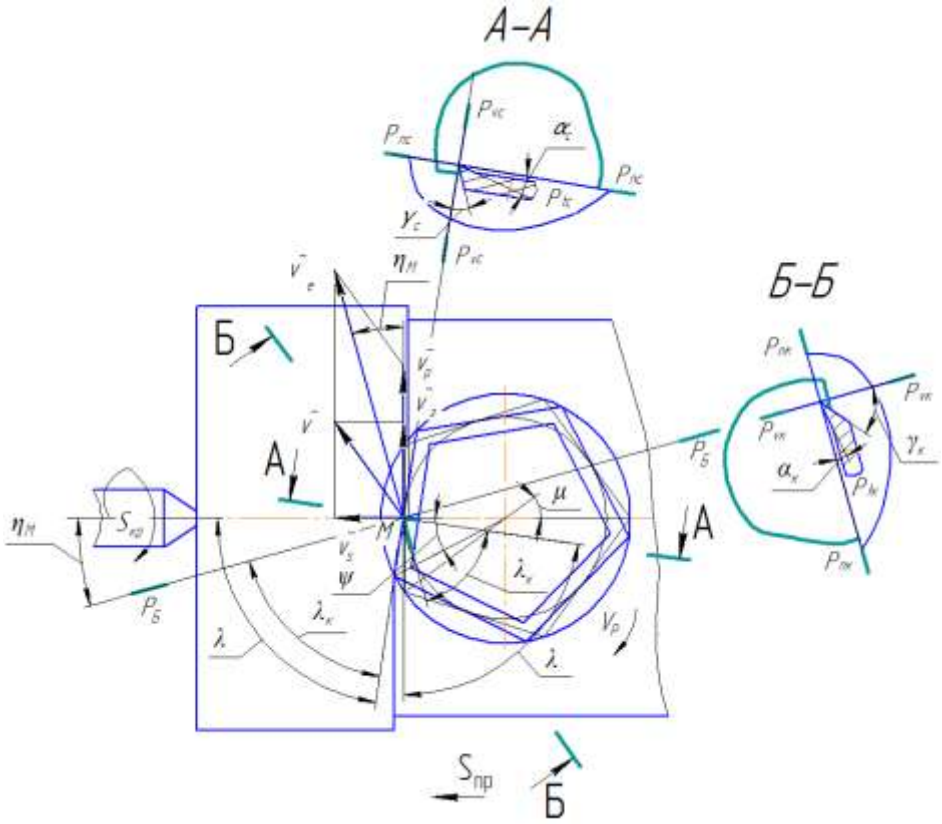


Рисунок 2.4 - Статическая и кинематическая система координат при ротационном точении многогранными резцами

Угол наклона режущей кромки λ (рис. 2.4) определяется по формуле:

$$\lambda = 90^0 - \mu \pm \psi; \qquad (14)$$

где: μ – угол наклона максимального радиус-вектора контура режущей кромки при положении лезвия симметрично относительно оси центров;

ψ – угол наклона максимального радиус-вектора контура режущей кромки относительно плоскости оси центров.

Угол ψ является положительным, когда резание происходит ниже плоскости оси центров и отрицательным когда выше.

Угол наклона μ может быть рассчитан из формулы:

$$\sin\mu = \frac{l}{2\cdot\rho_{\max}}; \tag{15}$$

где: l – длина режущего лезвия, [мм];

$\rho_{\max}$ – максимальный радиус-вектор контура режущей кромки, $[мм]$.

Угол наклона ψ находится по формуле:

$$\sin\psi = \frac{S_{kp}}{\rho_{\max}}; \tag{16}$$

где: S_{Kp} – круговая подача заготовки, $[мм/мин]$.

Кинематический угол наклона $\lambda_к$ находится между плоскостью, перпендикулярной вектору скорости результирующего движения резания υ_e и режущей кромкой находящейся в зоне резания [86, 87].

$$\lambda_к = \eta_м; \tag{17}$$

где: $\eta_м$ – угол подъема винтовой траектории результирующего движения в точке М.

Угол подъема винтовой траектории результирующего движения в точке М, определяется по формуле:

$$\cos\eta_M = \frac{V_p\cdot\cos\psi + (S_{kp}/1000)}{\left|\bar{\upsilon}_e\right|}; \tag{18}$$

где: V_p – скорость резания, [м/мин];

$\left|\bar{\upsilon}_e\right|$ – скорость результирующего движения резания, [м/мин].

Результирующее движение резания определяется по формуле:

$$\left|\bar{\upsilon}_e\right| = \sqrt{\left(\frac{-S_{np}\cdot n_3}{1000} - V_p\cdot\sin\psi\right)^2 + \left(V_p\cdot\cos\psi + \frac{S_{kp}}{1000}\right)^2}; \tag{19}$$

где: $S_{\text{пр}}$ – продольная подача резца на оборот обрабатываемого вала, $[мм/об]$;

$n_з$ – число оборотов заготовки, $[об/мин]$.

Кинематический угол наклона при вершине резца $\lambda_к$ максимален при врезании в заготовку ниже оси центров и минимален при выходе из зоны резания

выше оси центров, что является следствием разнонаправленности вектора скорости главного движения $\bar{\upsilon}_p$ [86, 87].

В инструментальной системе координат различают передний и задний инструментальные углы, численные значения которых необходимы при изготовлении и заточке инструмента. Инструментальная система координат показана на рис. 2.5 [77, 78, 86, 87]

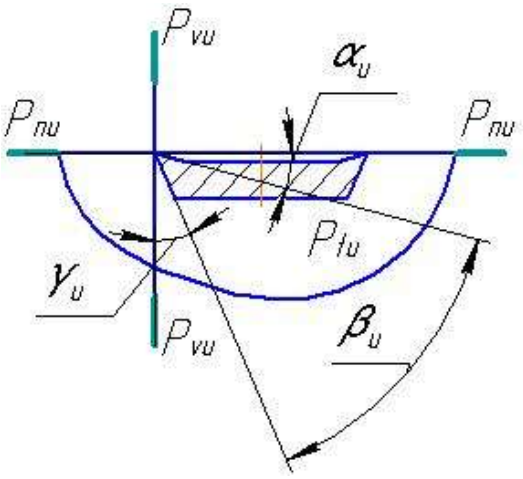


Рисунок 2.5 – Инструментальная система координат для многогранного ротационного резца

Исходя из способа установки ротационного резца относительно заготовки и для исключения затирания по задней поверхности необходимо соблюдать условие $\alpha \geq \alpha_{u\min}$. При ротационном точении по принятой схеме расположения, когда ось инструмента располагается перпендикулярно оси заготовки, минимальный задний угол $\alpha_{u\min}$ может быть определен на основании геометрической схемы (Рисунок 2.6).

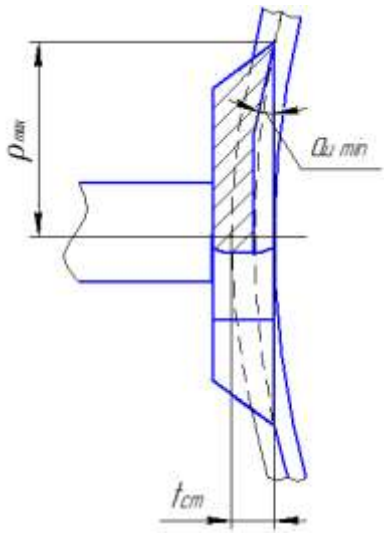


Рисунок 2.6 - Схема определения заднего угла

где: α – задний угол фактической заточки резца;

$\alpha_{u\min}$ – минимально необходимый задний угол во избежание затирания.

Минимальный задний угол резца (инструмента) $\alpha_{u\min}$ определяется:

$$tg\alpha_{u\min} = \frac{t_{cm}}{\rho_{\max}}; \qquad (20)$$

где: t_{cm} – глубина резания на линии оси центров [мм];

$\rho_{\max}$ – максимальный радиус-вектор контура режущей кромки, $[мм]$.

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 $P_{nк}$ [86, 87].

Для нахождения кинематического заднего угла необходимо произвести дополнительные построения (рисунок 2.7).

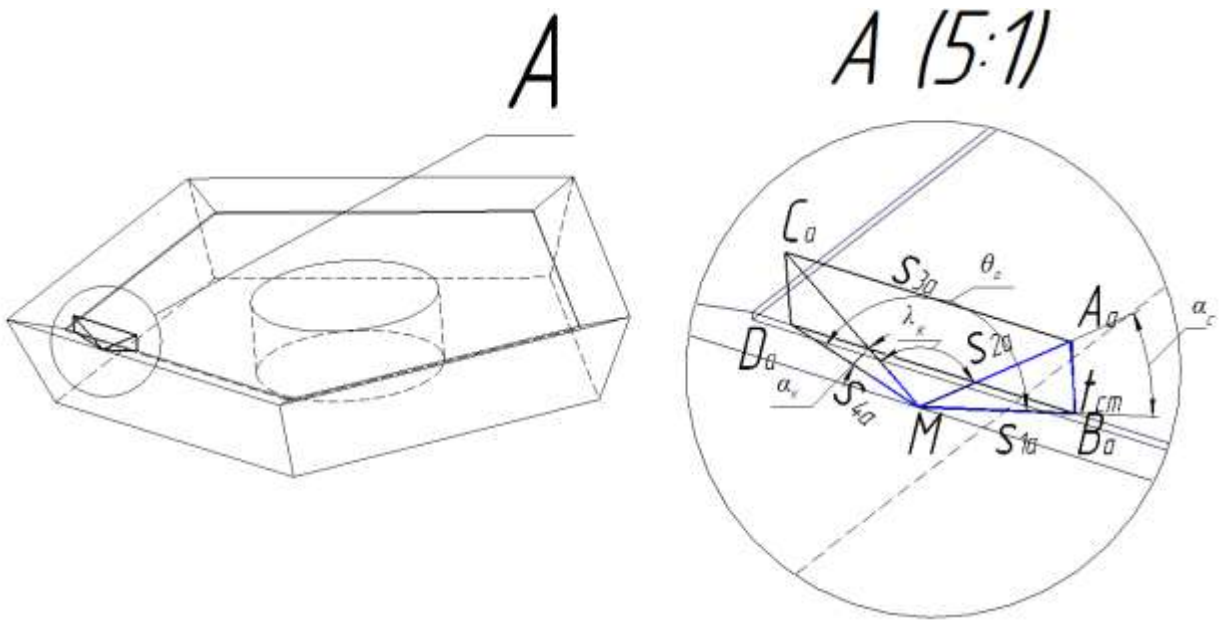


Рисунок 2.7 - Схема определения кинематического заднего угла

Из треугольника $MA_\alpha B_\alpha$ следует, что длина отрезка MB_α (s_{1a}) равна:

$$s_{1a} = \frac{t_{cm}}{\sin \alpha_c}; \tag{21}$$

Отрезок MA_α (s_{2a}) равна:

$$s_{2a} = \frac{t_{cm}}{tg\,\alpha_c}; \tag{23}$$

Через треугольник с вершинами $MA_\alpha C_\alpha$, находящийся в кинематической плоскости резания $P_{nк}$, находится длина отрезка $A_\alpha C_\alpha$ (s_{3a}):

$$s_{3a} = s_{2a} \cdot tg\lambda_к; \tag{24}$$

Достраиваем треугольник $MB_\alpha D_\alpha$ находящийся на задней поверхности. Так как отрезок $A_\alpha C_\alpha$=$B_\alpha D_\alpha$, то становится возможным определить угол между MB_α и MD_α.

$$tg\,\theta_a = \frac{s_{3a}}{s_{1a}}; \tag{25}$$

Длина отрезка MD_α (s_{4a}) находится по следующей формуле:

$$s_{4a} = \frac{s_{1a}}{\cos \theta_a}; \tag{26}$$

Кинематический задний угол определяется по формуле:

$$\sin\alpha_k = \frac{t_{cm}}{s_{4a}} = \sin a_c \cdot \cos\theta_a; \qquad (27)$$

Кинематический задний угол $\alpha_к$ постоянно изменяется в процессе резания: от момента врезания лезвия и до момента выхода лезвия из зоны резания происходит возрастание кинематического заднего угол $\alpha_к$ [86, 87].

Известно, что передний угол должен обеспечивать наиболее благоприятные условия для схода стружки вдоль режущей кромки с наименьшей усадкой [6]. В процессе РТМР статический передний угол γ_c измеряется в главной секущей плоскости между передней поверхностью лезвия и статической основной плоскостью P_{vc} [86, 87].

Кинематический передний угол $\gamma_к$ находится в главной секущей плоскости между передней поверхностью лезвия и кинематической основной плоскостью $P_{vк}$.

При его определении произведем необходимые дополнительные построения по схеме рисунок 2.8.

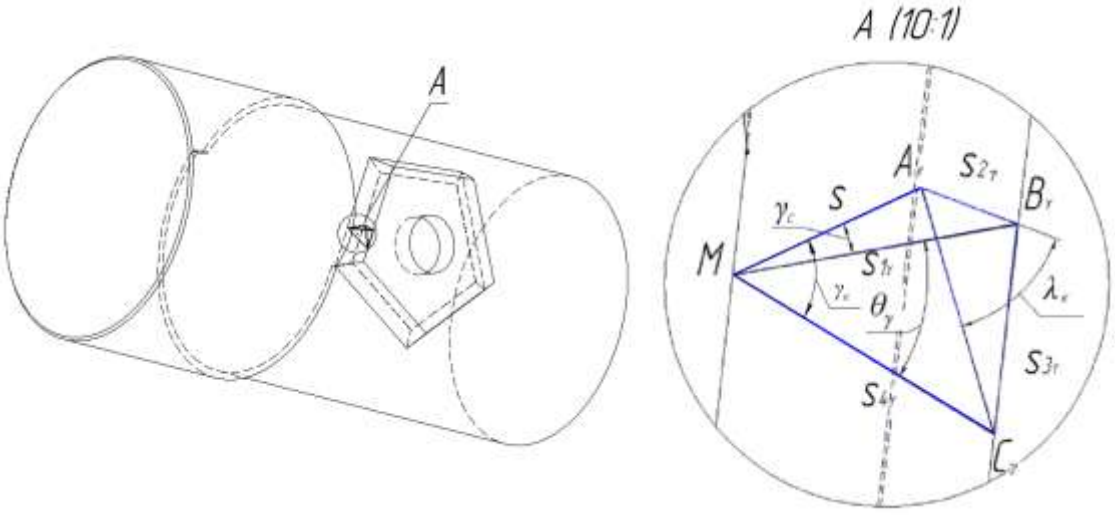


Рисунок 2.8 - Схема определения кинематического переднего угла

Из треугольника $MA_\gamma B_\gamma$ длина отрезка MB_γ ($s_{1\gamma}$) определяется:

$$s_{1\gamma} = \frac{s}{\cos\gamma_c}; \qquad (28)$$

где: s – ширина режущей кромки пластины (передней поверхности), [мм];

γ_u – передний угол инструментальный.

Длина отрезка $A_\gamma B_\gamma$ ($s_{2\gamma}$) может быть рассчитана по формуле:

$$s_{2\gamma} = s \cdot tg\gamma_c; \tag{29}$$

Отрезок $B_\gamma C_\gamma$ ($s_{3\gamma}$), в треугольнике $A_\gamma B_\gamma C_\gamma$ в свою очередь принадлежит еще и треугольнику $M B_\gamma C_\gamma$:

$$s_{3\gamma} = s_{2\gamma} \cdot tg\lambda_к; \tag{30}$$

Из треугольника $M B_\gamma C_\gamma$ лежащего на передней поверхности режущего лезвия определяем угол между отрезками $M B_\gamma$ и MC_γ:

$$tg\,\theta_\gamma = \frac{s_{3\gamma}}{s_{1\gamma}}; \tag{31}$$

Длина отрезка $M C_\gamma$ ($s_{4\gamma}$) определяется по следующей формуле:

$$s_{4\gamma} = \frac{s_{1\gamma}}{\cos\theta_\gamma}; \tag{32}$$

Кинематический передний угол вычисляется из формулы:

$$\cos\gamma_k = \frac{s}{s_{4\gamma}} = \cos\gamma_c \cdot \cos\theta_\gamma; \tag{33}$$

Проведенный анализ геометрии процесса РТМР показывает, что угол наклона режущей кромки в процессе обработки будет величиной переменной. Влияние угла наклона режущей кромки λ на передний γ_k и задний α_k кинематические углы иллюстрируются графиками на рисунке 2.9.

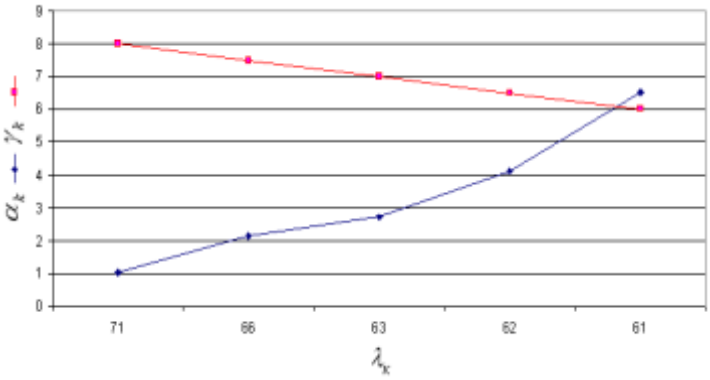


Рисунок 2.9 – Зависимость величин переднего γ_k и заднего α_k кинематических углов в точке М от угла наклона режущей кромки.

Кинематический передний угол при врезании максимален, а в дальнейшем стремится к значению равному статическому углу. Из этого следует, что при РТМР необходимо стремиться к тому, чтобы статический передний угол был равен минимальному значению переднего угла для обеспечения благоприятных условий схода стружки вдоль режущей кромки с наименьшей усадкой.

2.3 Разработка методики расчета высоты микронеровностей обработанной поверхности при РТМР.

Эффективность любого процесса резания в значительной степени оценивается по качеству обработанной поверхности, в том числе волнистости, шероховатости, состоянию поверхностного слоя материала [1, 30, 88-90].

В теоретической части исследований изучены возможности аналитического расчета и прогнозирования значений шероховатости поверхности обработанной РТМР (микронеровностей профиля). Высота и форма микронеровностей, в зависимости от геометрических параметров инструмента и режимов резания, определялась с учетом следующих условий (допущений):

1. Обрабатываемый материал (материал заготовки) абсолютно недеформируемый;

2. Система абсолютно жесткая;

3. Лезвие инструмента и форма профиля заготовки представляют собой геометрические линии.

На рисунке 2.10 приведена схема формирования микропрофиля цилиндрической поверхности полученной методом РТМР [91, 92]. Высота расчетных неровностей Δh определится по формуле:

$$\Delta h = \sqrt{\rho^2 \cdot \sin\kappa^2 + R_{\partial\min}^2} - R_{\partial\min}; \qquad (34)$$

где: ρ – радиус-вектор контура режущей кромки, $[мм]$;

$\rho_{\max}$ – максимальный радиус-вектор контура режущей кромки, $[мм]$;

$\rho_{\min}$ – минимальный радиус-вектор контура режущей кромки, $[мм]$;

$R_{д\min}$ – радиус обработанной заготовки, $[мм]$;

k – угол между осью центров и точкой контакта режущей кромки и обрабатываемой поверхности.

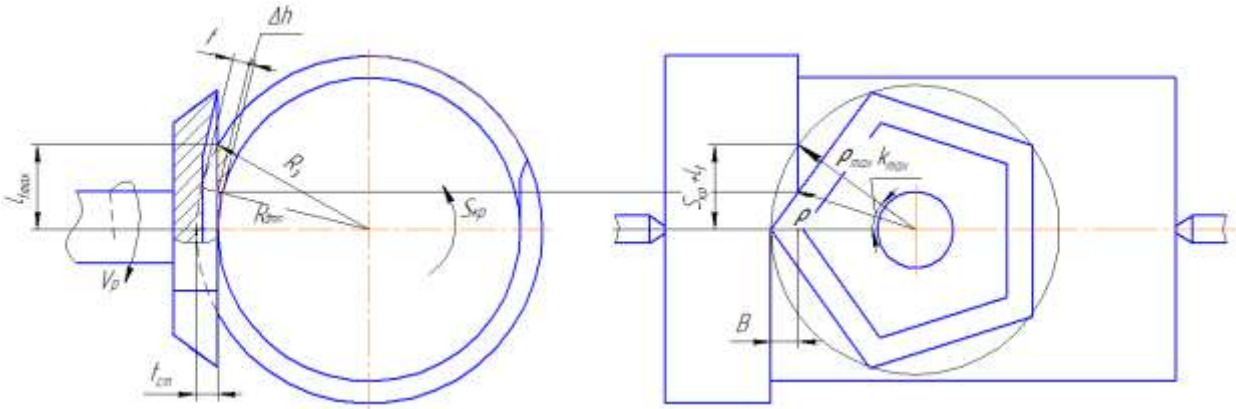


Рисунок 2.10 - Схема формирования микропрофиля поверхности при РТМР

Угол между осью центров и прямой к точке контакта режущей кромки и обрабатываемой поверхности находится по формуле:

$$\cos\kappa_{\max} = \frac{\rho_{\max} - B}{\rho_{\max}}; \tag{35}$$

Продольная подача на грань резца определяется:

$$S_{пр_{гр}} = B/2; \tag{36}$$

Продольная подача резца на оборот обрабатываемого вала рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{пр}_{ст}} = \frac{S_{пр_{гр}} \cdot n_p \cdot N}{n_з}; \tag{37}$$

Круговая подача на грань резца находится по формуле:

$$S_{кр_{гр}} = \rho_{\max} \cdot \sin\kappa_{\max}, \tag{38}$$

Число оборотов заготовки рассчитывается по формуле:

$$n_з = \frac{S_{кр\,гр} \cdot n_p \cdot N}{\pi \cdot d_з}; \tag{39}$$

Число оборотов инструмента определяется по формуле:

$$n_p = \frac{\pi \cdot d_з \cdot n_з}{S_{кр\,гр} \cdot N}; \tag{40}$$

Во избежание возникновения кинематической волнистости (см. схемы рис. 2.10, 2.11) необходимо круговую подачу назначать с учетом следующих рекомендаций:

$$l_{t\max} = \sqrt{R_з^2 - \left(R_з - t_{cm}\right)^2}; \tag{41}$$

$$l_{t\max} \geq S_{Kp_{гр}} + l_t \tag{42}$$

где: $l_{t\max}$ высота выхода режущего лезвия из зоны резания относительно плоскости центров, $[мм]$;

t_{cm} – глубина резания в плоскости оси центров, $[мм]$;

$R_з$ – радиус обрабатываемой заготовки, $[мм]$.

Длина участка l_t, зависящая от глубины резания определяется по формуле:

$$l_t = \sqrt{\rho_{\max}^2 - \left(\rho_{\max} - 2S_{пр_{гр}}\right)^2} - \mathrm{S}_{\mathrm{kp_{гр}}}; \tag{43}$$

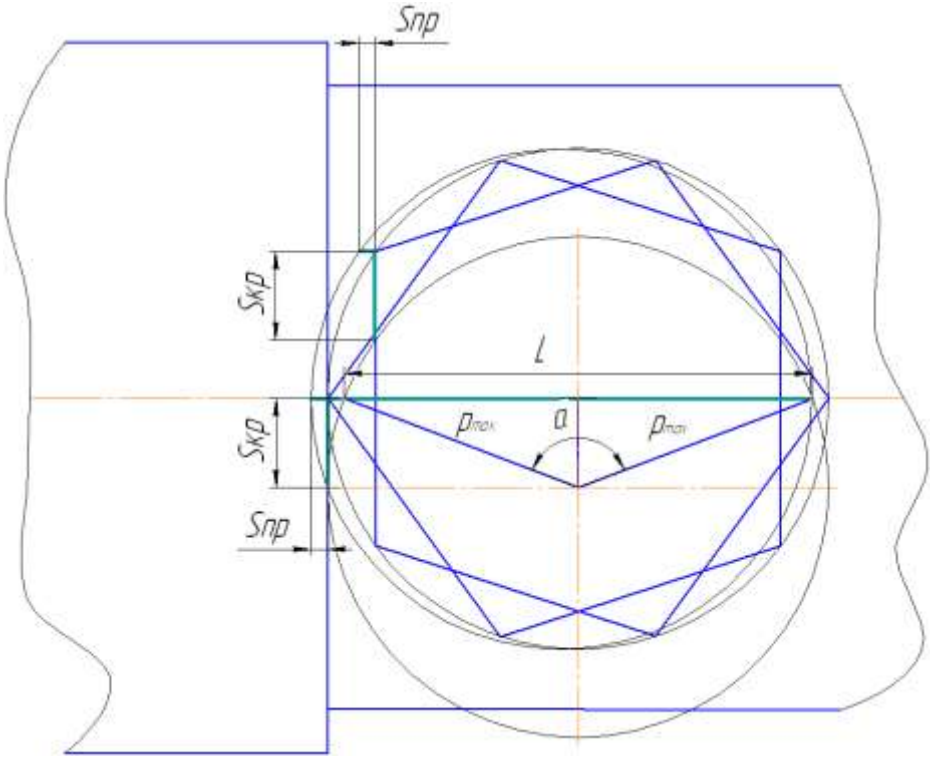


Рисунок 2.11 – Схема назначения подач для устранения кинематической волнистости

Круговая подача назначается исходя из следующей зависимости:

$$S_{кр\max} = \sqrt{\rho_{\max}^2 - \left(\rho_{\max} - S_{пр}\right)^2} = \sqrt{2\rho_{\max} \cdot S_{пр} - \mathrm{S}_{\mathrm{пр}}{}^2}; \tag{44}$$

При известной круговой подаче вычислить продольную подачу можно по формуле:

$$S_{\text{пр}\min} = \rho_{\max} - \sqrt{\rho_{\max}^2 - S_{кр}^2} = \rho_{\max} - \frac{L}{2}; \quad (45)$$

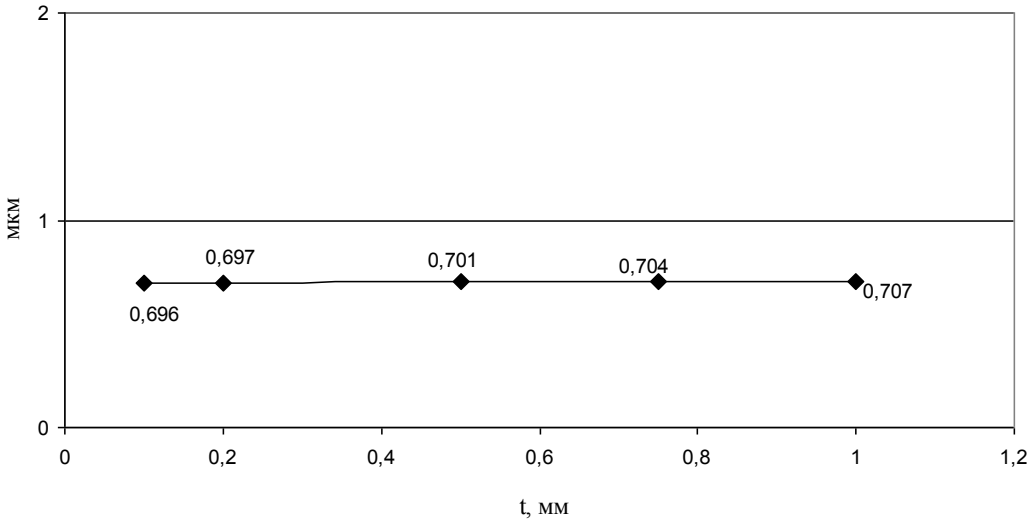
Для нахождения хорды L используем формулу:

$$L = 2 \cdot \rho_{\max} \cdot \sin(\alpha / 2); \quad (46)$$

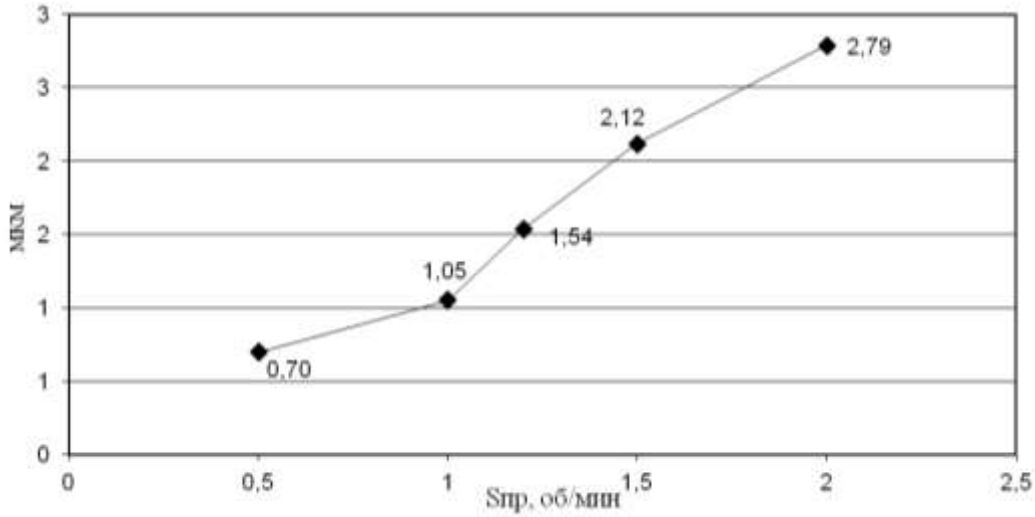
Тогда угол α:

$$\cos(\alpha/2) = \frac{S_{\text{кр}}}{\rho_{\max}}; \quad (47)$$

Исходя из полученных формул можно сделать вывод о том, что для устранения кинематической волнистости скорость вращения инструмента V_p должна быть как минимум на порядок выше, чем сумма подач заготовки (круговая подача) $S_{кр}$ и инструмента (продольная подача) $S_{пр}$. Кроме того, размеры и форма поверхности после РТМР зависят от диаметра обрабатываемой заготовки $d_з$: чем больше диаметр заготовки, тем меньше высота остаточных неровностей (Δh). На основании полученных расчетных выражений для определения численных значений микронеровностей при РТМР можно построить графики показывающие характер их изменения в зависимости от отдельных режимов резания (рисунки 2.12, 2.13). В перспективе это позволяет использовать полученные полуэмпирические зависимости при назначении и оптимизации режимов резания для обеспечения требуемого качества обработки [77, 92].



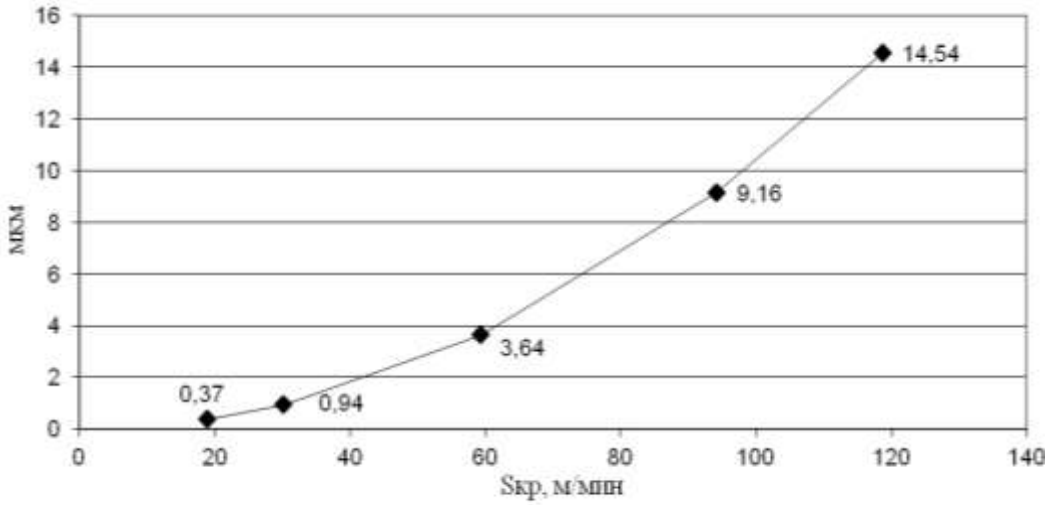
а)



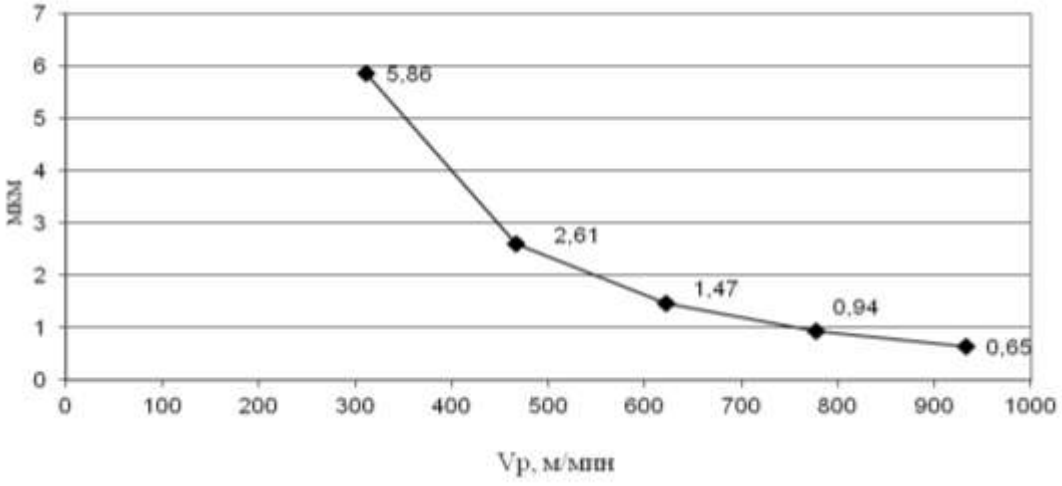
б)

Рисунок 2.12 – Влияние режимов резания на расчетную остаточную микронеровность: а) глубины резания t, б) продольной подачи *Snp*

Характер представленных на рисунке 2.12 численных значений расчетной остаточной микронеровности в зависимости от глубины резания и продольной подачи показывает, что при их увеличении остаточная микронеровность на обработанной поверхности также будет возрастать. Глубина резание не оказывает существенного влияния на микронеровность обработанной поверхности.



а)



б)

Рисунок 2.13 – Влияние круговой подачи $S_{кр}$ и скорости резания V_p на расчетную остаточную микронеровность: а) $S_{кр}$, б) V_p.

Увеличение круговой подачи $S_{кр}$ приводит к монотонному возрастанию расчетной остаточной микронеровности. Обратная зависимость наблюдается при увеличении главной скорости резания V_p (для метода РТМР эта скорость определяется вращением инструмента). Это можно объяснить уменьшением времени контакта отдельных точек режущей кромки с поверхностью заготовки, но, в то же время, повышением интенсивности деформационных процессов

2.4 Методика определения действительной площади среза и формы стружки при РТМР.

Для определения влияния углов заточки, диаметра режущей поверхности (окружности многогранника) и режимов резания при РТМР на площадь среза, используем схему пересечения ротационного резца 1 и заготовки 2 (рисунок 2.14) и получаемую при этом форму сечения стружки (рисунок 2.15).

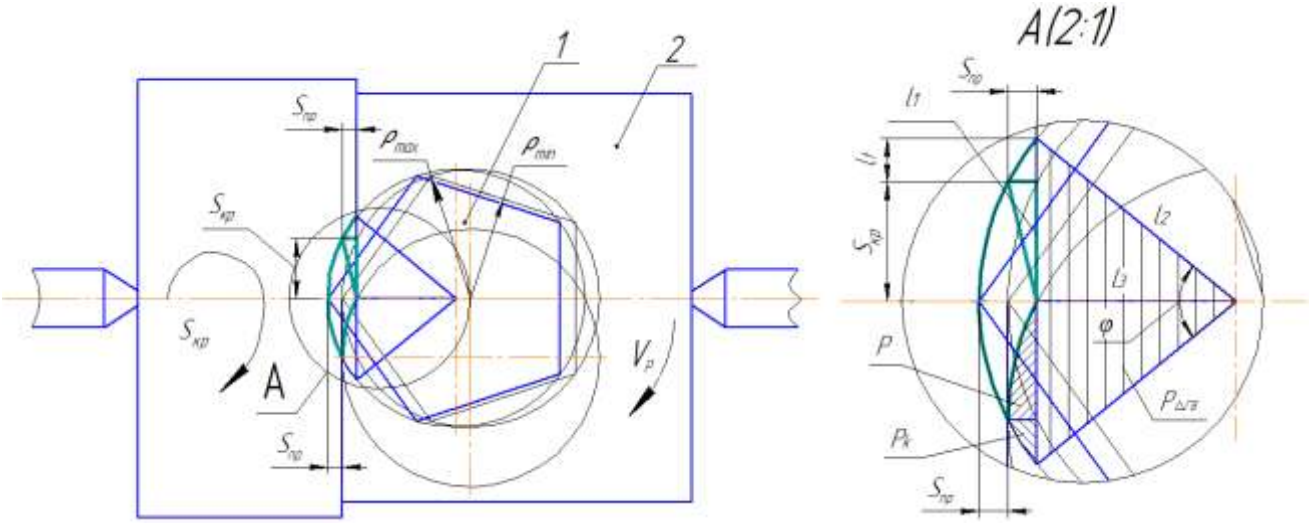


Рисунок 2.14 – Схема пересечения резца и заготовки при РТМР

Размер элементарных стружек можно охарактеризовать тремя параметрами: шириной, толщиной и длиной (рисунок 2.15) [82, 83, 93-95].

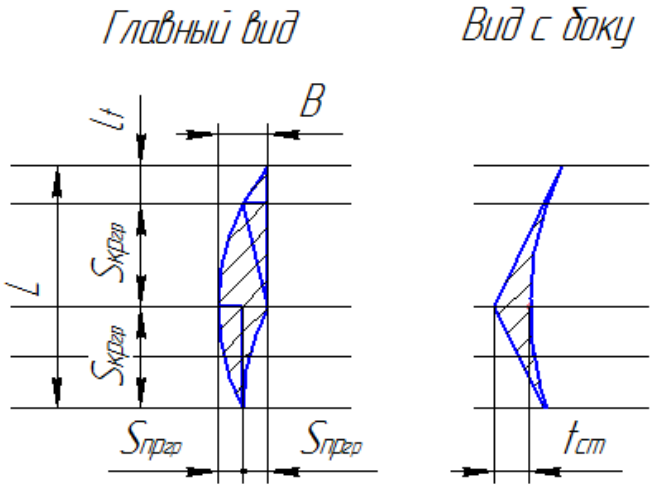


Рисунок 2.15 – Форма сечения стружки при РТМР

Ширина стружки определяется по формуле:

$$B = 2S_{пр_{гр}}; \quad (48)$$

где: $S_{пр_{гр}}$ – продольная подача на грань резца, $[мм/об]$.

Длина стружки:

$$L = 2S_{кр_{гр}} + l_t; \quad (49)$$

где: l_t – длина участка зависящая от глубины резания, $[мм]$;

$S_{Кр_{гр}}$ – круговая подача заготовки на грань резца, $[мм]$.

Толщина стружки (рис 2.10):

$$t = t_{cm} - \Delta h = t_{cm} - \sqrt{\rho^2 \cdot \sin\kappa^2 + R_{\partial\min}^2} + R_{\partial\min}; \quad (50)$$

где: t – глубина резания в каждом положении режущей кромки находящейся в зоне резания, $[мм]$;

t_{cm} – глубина резания в плоскости оси центров, $[мм]$;

Δh – высота возможных остаточных неровностей, $[мм]$.

$R_{\partial\min}$ – радиус обработанной заготовки, $[мм]$;

k – угол между осью центров и прямой из точки контакта режущей кромки и обрабатываемой поверхности до оси вращения.

Угол треугольника $\phi_{ГВ}$ определяется по формуле:

$$\cos\frac{\varphi_{ГВ}}{2} = \frac{(\rho_{\max} - B)}{\rho_{\max}}; \quad (51)$$

где: B – ширина срезаемого слоя;

$\rho_{\max}$ – максимальный радиус-вектор контура режущей кромки, $[мм]$.

Площадь $P_{\Delta ГВ}$ определяется по формуле [80, 93-97]:

$$P_{\Delta ГВ} = \frac{1}{2} \cdot (L + S_k) \cdot (\rho_{\max} - B); \quad (52)$$

где: S_K – конструктивная подача, обусловленная параметрами результирующего контура режущей кромки, $[мм]$.

Площадь участка обработанного предыдущим лезвием определяется по формуле:

$$P = \frac{1}{2} \cdot S_{пр} \cdot S_{кр}; \quad (53)$$

Площадь конструктивного участка P_k:

$$P_k = \frac{1}{2} \cdot S_{np} \cdot S_k; \quad (54)$$

Действительная площадь среза на главном виде определяется по формуле:

$$P_{действ} = \frac{\pi \cdot \rho_{\max}^{2}}{360} \cdot \varphi_{ГВ} - P_{\Delta ГВ} - P - P_k; \quad (55)$$

Угол треугольника ϕ_{BC} определяется по формуле:

$$\varphi_{BC} = \varphi_{BC1} + \varphi_{BC2}; \quad (56)$$

где: φ_{BC1} – угол треугольника над высотой центров рисунок 2.16;

φ_{BC2} – угол треугольника ниже оси центров рисунок 2.16.

Угол треугольника над высотой центров определяется по формуле:

$$tg\varphi_{BC1} = \frac{S_{kp} + S_k}{R_{d\min}}; \quad (57)$$

Угол треугольника ниже оси центров определяется по формуле:

$$tg\varphi_{BC2} = \frac{S_{kp}}{R_{d\min}}; \quad (58)$$

Площадь стружки на виде с боку определяется по формуле:

$$P_{\Delta BC} = \frac{1}{2} \cdot (2S_{kp} + S_k) \cdot (R_3 - t_{cm}); \quad (59)$$

где: R_3 – радиус заготовки.

Таким образом, используя приведенные выше расчетные формулы можно определить действительную площадь среза стружки:

$$P_{действ} = \frac{\pi \cdot R_3^{2}}{360} \cdot \varphi_{BC} - P_{\Delta BC}; \quad (60)$$

Из схемы определения глубины резания (рисунок 2.16) при обработке валов видно, что глубина резания при ротационном точении многогранными резцами $t \neq const$.

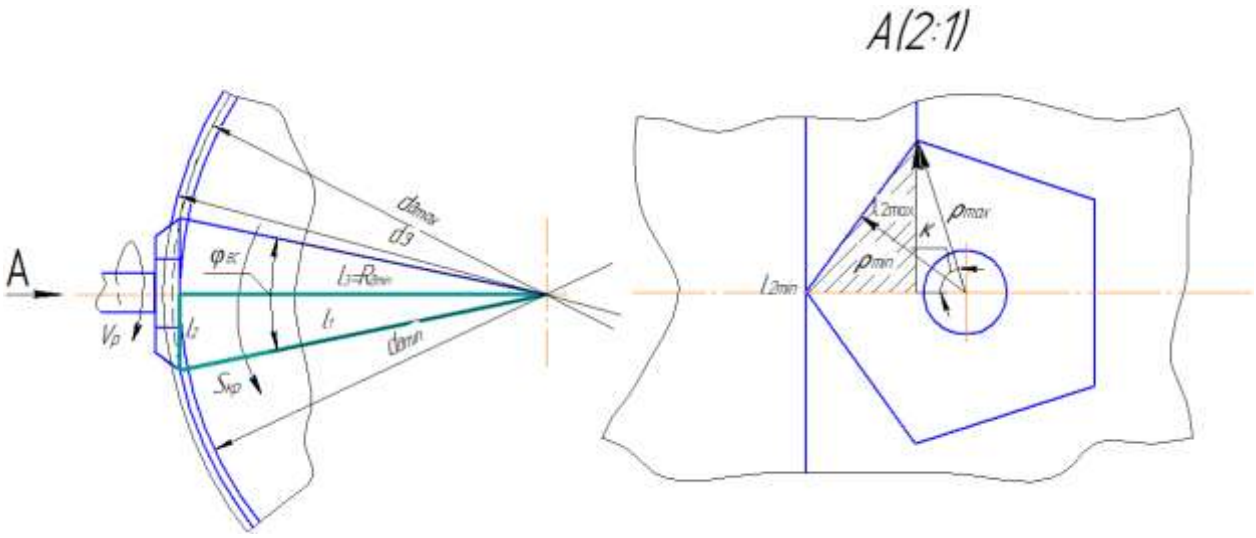


Рисунок 2.16 - Схема определения глубины резания при обработке валов

Точка контакта режущей кромки и обрабатываемой поверхности относительно высоты центров l_2 является переменной. Данная особенность ротационного точения многогранными резцами является следствием изменяющегося радиуса – вектора режущей кромки.

Полученные в результате проведенных тригонометрических преобразований расчетные формулы свидетельствуют, что с увеличением подач, глубины резания, а также с увеличением диаметра обрабатываемой заготовки пропорционально увеличивается площадь среза. Изменение диаметра окружности описывающей многогранник резца и изменение инструментальных углов на площадь среза снимаемого слоя заготовки, а также форму и размеры стружки, значительного влияния не оказывают.

2.5 Аналитическое определение физических составляющих усилий резания при РТМР.

Величина и направление сил резания, действующих на многогранный резец при РТМР, существенно отличаются от получаемых при наиболее близком по кинематике безвершинном косоугольном точении, а тем более от системы сил при традиционном вершинном точении. Вследствие особенностей процесса РТМР,

силы резания в процессе обработки будут изменяться как по величине, так и по направлению за счет принудительного вращения инструмента. На рисунке 2.17 изображен инструмент для РТМР (многогранный резец), срезающий слой металла толщиной a.

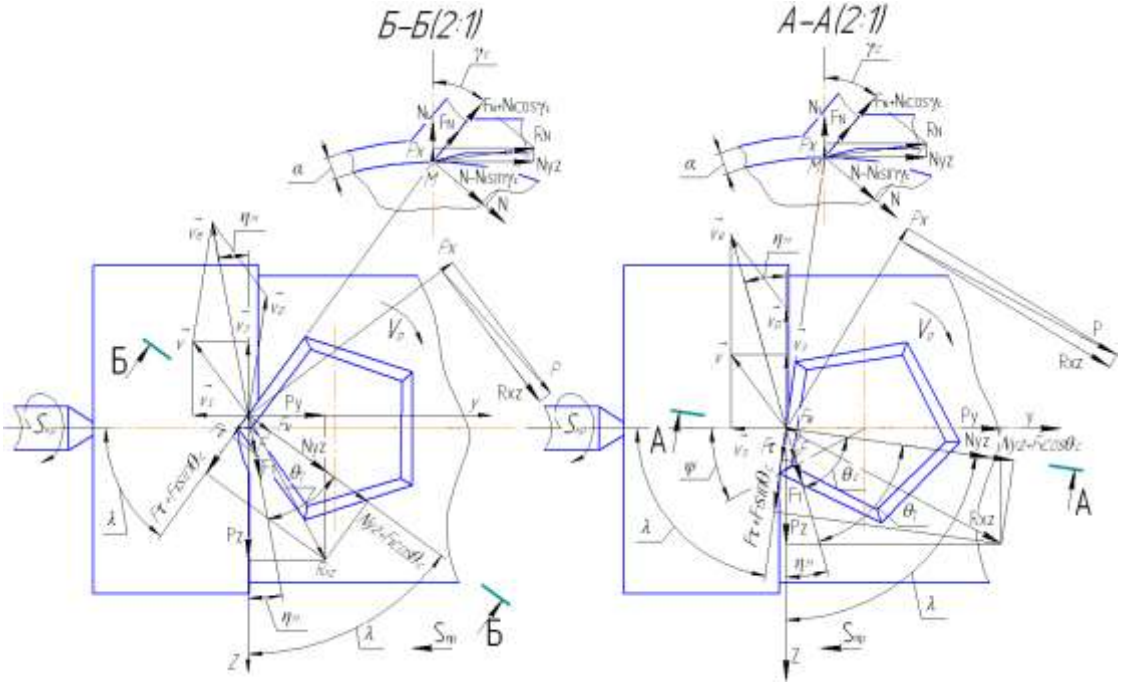


Рисунок 2.17 - Силы действующие на передней и задней поверхностях инструмента

Резец в условиях ротационного точения работает с постоянным обновлением режущего клина в зоне резания, причем режущий клин имеет изменяющиеся передний угол γ и угол наклона лезвия λ. Со стороны срезаемого слоя на переднею поверхность инструмента действует нормальная к ней сила N. При перемещении стружки по передней поверхности возникает сила трения $F = f \cdot N$, (f – коэффициент трения на передней поверхности). Так как угол наклона лезвия в процессе резания является переменным и всегда положительным, то обеспечивается благоприятное направление схода стружки с отклонением от нормали. Из этого следует, что сила трения F, совпадающая с направлением схода стружки, образует с нормалью к лезвию угол θ_γ. Сила трения F на передней поверхности может быть разложена на нормальную к лезвию силу F_N (нормальную составляющую силы трения) и силу, направленную вдоль лезвия F_τ (касательную составляющую силы трения) [1]

На контактную площадку задней поверхности со стороны поверхности резания действует сила N_1 упругого последействия, нормальная к поверхности резания. Сила N_1 вызывает касательную к поверхности резания силу трения $F_1 = f_1 \cdot N_1$, где $f_1 -$ средний коэффициент трения на задней поверхности; Направление силы трения F_1 совпадает с траекторией относительного рабочего движения инструмента в данной точке резания. [1, 6]

Величины составляющих сил резания P_x, P_y и P_z, определяются исходя из значений нормальных сил и сил трения. На основании схемы (рисунок 2.17) можно произвести несложные преобразования и получить расчетные формулы для их определения:

$$P_x = F_N \cdot \cos\gamma_c - N \cdot \sin\gamma_c + N_1; \quad (61)$$

где: $\gamma_c -$ статический передний угол, который измеряется в главной секущей плоскости между передней поверхностью лезвия и статической основной плоскостью P_{vc} [2, 3].

С учетом того:

$$F_N = F \cdot \cos\theta_\gamma; \quad (62)$$

Получаем:

$$P_x = F \cdot \cos\theta_\gamma \cdot \cos\gamma_c - N \cdot \sin\gamma_c + N_1 = F \cdot \cos\gamma_к - N \cdot \sin\gamma_c + N_1; \quad (63)$$

где: $\gamma_к$ - кинематический передний угол (находится в главной секущей плоскости между передней поверхностью лезвия и кинематической основной плоскостью $P_{vк}$) [2].

Аналогичным образом определяются выражения для определения сил P_y и P_z.

$$P_y = N_{yz} \cdot \sin\lambda - F_\tau \cdot \cos\lambda + F_1 \cdot \sin\eta_i; \quad (64)$$

где: $\eta_м -$ угол подъема винтовой траектории результирующего движения в точке М.

$$N_{yz} = N \cdot \cos\gamma_c + F_N \cdot \sin\gamma_c = N \cdot \cos\gamma_c + F \cdot \cos\theta_\gamma \cdot \sin\gamma_c; \quad (65)$$

$$F_\tau = F \cdot \sin\theta_\gamma; \tag{66}$$

$$P_y = \left(N \cdot \cos\gamma_c + F \cdot \cos\theta_\gamma \cdot \sin\gamma_c\right)\sin\lambda - F \cdot \sin\theta_\gamma \cdot \cos\lambda + F_1 \cdot \sin\eta_i; \tag{67}$$

$$\begin{aligned} P_z &= N_{yz} \cdot \cos\lambda + F_\tau \cdot \sin\lambda + F_1 \cdot \cos\eta_м = \\ &= \left(N \cdot \cos\gamma_c + F \cdot \cos\theta_\gamma \cdot \sin\gamma_c\right)\cos\lambda + F \cdot \sin\theta_\gamma \cdot \sin\lambda + F_1 \cdot \cos\eta_м; \end{aligned} \tag{68}$$

Полученные расчетные выражения не позволяют достоверно определять и рассчитывать физические составляющие усилий резания при РТМР в силу их постоянной изменяемости по величине и направлению. По этим причинам, для повышения точности в определении численных значений усилий резания при РТМР воспользуемся аналитическим подходом предложенным К.А. Зворыкиным в работе [95]. При рассмотрении системы сил, действующих в зоне стружкообразования на пластически деформируемый металл, можно представить сопротивление пластической деформации тремя приведенными силами: нормальной силой Q, силой внутреннего трения $f_1 Q$ и силой F, образованной касательными напряжениями, действующими в плоскости скалывания. (Рисунок 2.18).

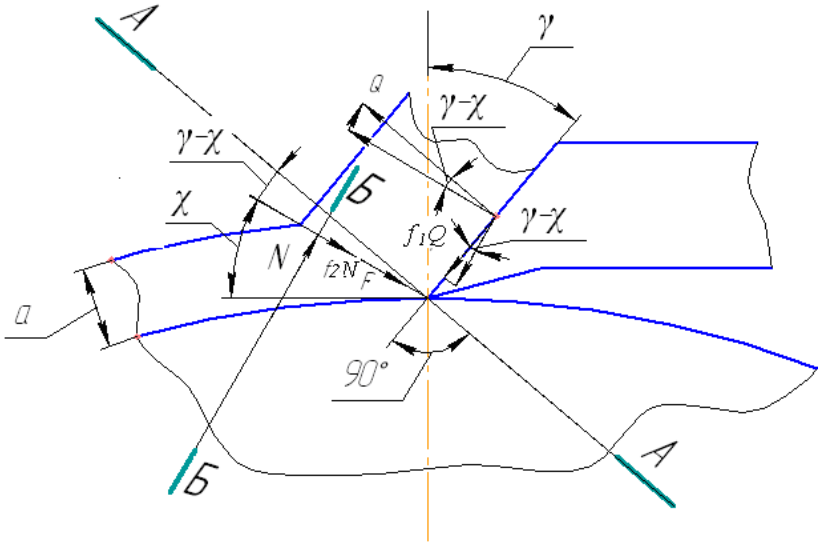


Рисунок 2.18 – Система сбалансированных сил при РТМР

Для определения нормальной силы N проецируем на линию Б-Б действующие в этой системе силы и из условия равновесия сил получаем:

$$\begin{aligned} N &= F_N \cdot \cos(\gamma - \chi) - Q \cdot \sin(\gamma - \chi) = F \cdot \cos\theta_\gamma \cdot \cos(\gamma - \chi) - \\ &- Q \cdot \sin(\gamma - \chi) = f_1 \cdot Q \cdot \cos\theta_\gamma \cdot \cos(\gamma - \chi) - Q \cdot \sin(\gamma - \chi); \end{aligned} \tag{69}$$

Сила внутреннего трения металла в плоскости скалывания равна:

$$f_2 N = f \cdot f_2 \cdot Q \cdot \cos\theta_\gamma \cdot \cos(\gamma - \chi) - f_2 \cdot Q \cdot \sin(\gamma - \chi); \quad (70)$$

где: f_2 – коэффициент внутреннего трения в пластически деформируемом металле;

χ – угол плоскости сдвига;

Силу F, действующую на металл в зоне стружкообразования определяем, проецируя действующие в этой системе силы на линию плоскости скалывания и из условий равновесия находим:

$$F = Q \cdot \cos(\gamma - \chi) + f_1 \cdot Q \cdot \cos\theta_\gamma \cdot \sin(\gamma - \chi) - f_1 \cdot f_2 \cdot Q \cdot \cos\theta_\gamma \cdot \cos(\gamma - \chi) + f_2 \cdot Q \cdot \sin(\gamma - \chi); \quad (71)$$

С учетом теоретических оценок по форме и размерам стружки (раздел 2.4), полученных расчетных выражений по определению геометрических параметров РТМР (раздел 2.2) можно в сочетании с физическими представлениями К.А. Зворыкина предложить новый усовершенствованный метод описания процессов деформации и расчета усилий резания (адаптированный применительно к РТМР). В плоскости скалывания по всей ее площади в тонком слое пластически деформируемого металла возникают касательные напряжения τ. Результирующая этих напряжений описывается силой $F = ab\tau / \sin\chi$. (рис. 2.18)

Нормальная сила, N действующая на переднею поверхность инструмента со стороны срезаемого слоя с учетом выражений для определения силы R, равна:

$$P = Q[(1 - f_1^2)\cos\gamma + 2 f_1 \sin\gamma];$$

$$Q = \frac{ab\tau}{\left[\left(1 - f \cdot f_2 \cdot \cos\theta_\gamma\right)\cos(\gamma - \chi) + \left(f \cdot \cos\theta_\gamma + f_2\right)\sin(\gamma - \chi)\right]\sin\chi}; \quad (72)$$

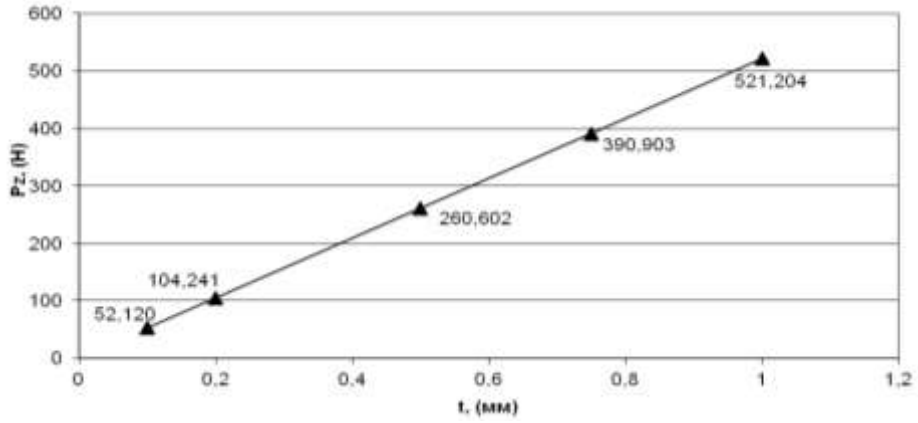
$$\text{å} = \frac{(1 - f_1^2)\cos\gamma + 2 f_1 \sin\gamma}{\left[\left(1 - f \cdot f_2 \cdot \cos\theta_\gamma\right)\cos(\gamma - \chi) + \left(f \cdot \cos\theta_\gamma + f_2\right)\sin(\gamma - \chi)\right]\sin\chi}$$

где: $a = t$ – толщина срезаемого слоя;

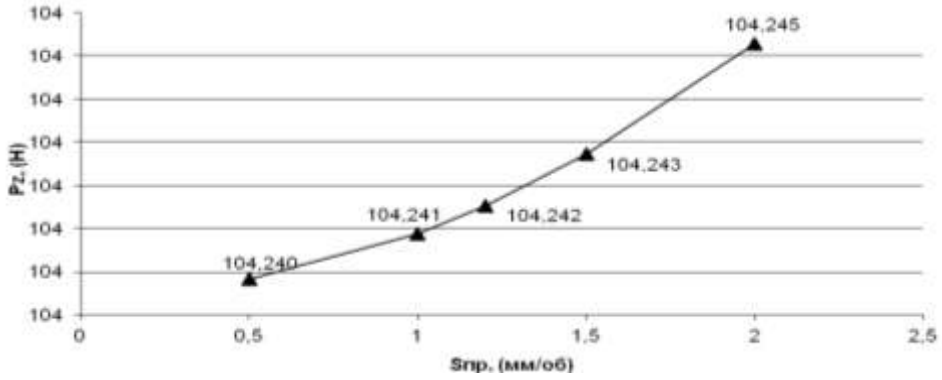
$b = S_{\text{ðä}}$ – ширина срезаемого слоя.

Используя полученное уравнение (72), можно определить главную составляющую силы резания: $P_z = \hat{E}_p \cdot \sigma_{\text{â}} \cdot t \cdot S_{\text{ðä}}$. При этом, для того чтобы учесть свойства материала заготовки, значения $\text{å}\tau$ могут быть заменены (как было

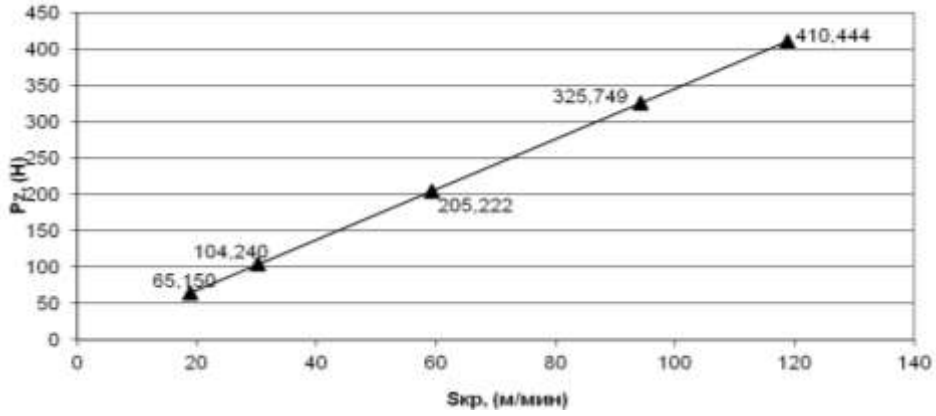
показано в работах [1, 67]) на эквивалентное значение $\hat{E}_p \cdot \sigma_{\hat{a}}$ где $\sigma_{\hat{a}}$ – предел прочности обрабатываемого металла на растяжения, $\hat{E}_p$ – коэффициент резания устанавливаемый экспериментально. Графические зависимости влияния режимов резания на главную составляющею силу резания, построенные на основании полученных расчетных формул, приведены на рисунках 2.19, 2.20.



а)



б)



в)

Рисунок 2.19 – Влияние режимов резания на главную составляющую силы резания: а) глубина резания t, б) продольная подача $S_{кр}$, в) круговая подача $S_{кр}$

Результаты расчетов показывают, что с увеличением глубины резания, продольной и круговой подач, главная составляющая силы резания P_z будет монотонно увеличиваться. Причиной этого является увеличение толщины срезаемого слоя и суммарной рабочей длины режущей кромки (огибающей всех точек режущей части многогранного ротационного резца).

Влияние скорости резания на изменение величины силы резания в графической форме представлено на рисунке 2.20. Уменьшение главной составляющей силы резания при возрастании скорости резания также объясняется уменьшением толщины срезаемого слоя и суммарной рабочей длины режущей кромки (огибающей всех точек режущей части многогранного ротационного резца).

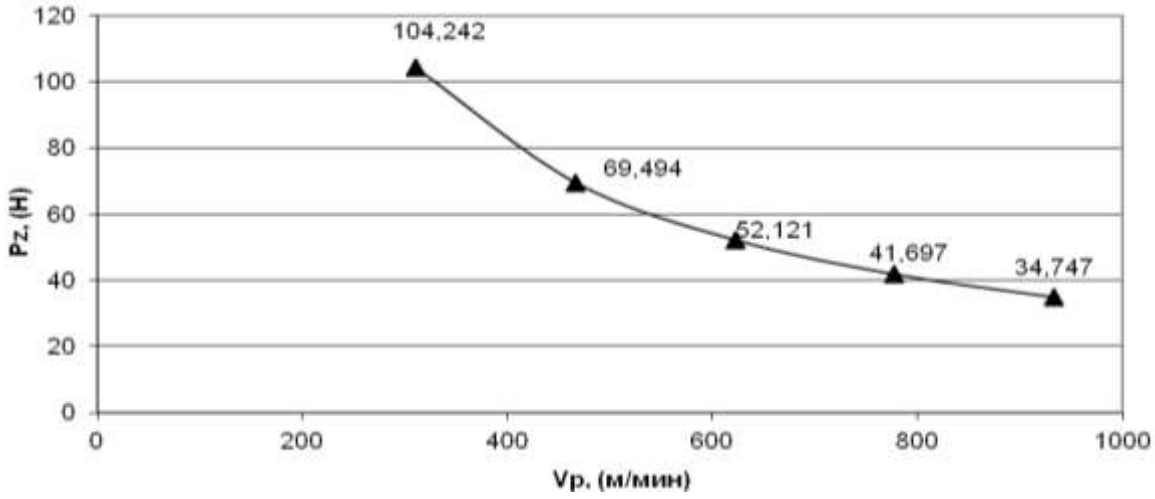


Рисунок 2.20 – Влияние скорости резания на главную составляющую силы резания

Таким образом, предложенные кинематические схемы процесса РТМР (рисунок 2.17, 2.18), расчетные формулы для определения составляющих сил резания и результаты расчетов показывают, что силы резания в процессе РТМР изменяются по величине и направлению. Расчеты показывают (рисунок 2.18 и формула (72)), что сила резания максимальна при врезании резца в заготовку на участке лезвия находящемся на линии оси центров, так как и нормальная составляющая силы N также имеет наибольшее значение (вследствие наибольших значений сечения срезаемого слоя).

Согласно правилам сложения векторов и зная величины составляющих P_x, P_y и P_z, можно определить величину результирующей силы резания [1, 4].

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}; \tag{73}$$

Так как резец совершает принудительное вращение, то на практике неизбежно возникает также необходимость расчета крутящего момента. Привод резца при вращении должен передавать каждой режущей кромке многогранного резца окружную силу необходимую для снятия припуска (стружки), которая должна быть больше либо равна силе резания P_z. Окружная сила резания создает крутящий момент $M_{кр}$, который необходимо сообщить приводу резца:

$$M_{кр} = \frac{P_z \cdot \rho_{\max}}{1000}[H \cdot м]; \tag{74}$$

Мощность резания (эффективная), кВт находится по формуле:

$$N_e = \frac{P_z \cdot \upsilon_e}{1020 \cdot 60}; \tag{75}$$

Необходимо подчеркнуть, что, в отличие от аналогичных формул для традиционного вершинного точения, в расчетных формулах используются параметры $\rho_{\max}$, υ_e присущие именно методу РТМР.

2.6 Выводы по разделу

1. Разработанная кинематическая схема метода РТМР сочетает в себе преимущества безвершинного косоугольного точения (основным достоинством, которого является движение срезаемого слоя вдоль режущей кромки) и ротационного точения (особенностью, которого является постоянное обновление участков режущей кромки), что сокращает время контакта любой точки режущей кромки с поверхностью заготовки. Это создает хорошие предпосылки для снижения температуры на поверхности инструмента.

2. Повышенная результирующая скорость резания при РТМР реализуется за счет сочетания вращательных движений инструмента и заготовки (которая является круговой подачей). Эта отличительная особенность РТМР обеспечивает

повышение производительности обработки в сравнении с другими известными методами.

3. Анализ геометрической модели процесса РТМР показывает, что в процессе обработки происходят постоянные изменения геометрии режущего лезвия: кинематический передний угол γ_k при врезании максимален, а в дальнейшем стремится к значению равному статическому переднему углу γ_c; значения кинематического заднего угла α_k изменяются от минимального до величины 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.

4. На основании предложенных расчетных геометрических и кинематических моделей установлено, что величина продольной подачи не должна превышать конструктивную подачу, умноженную на количество граней. Соблюдение этого необходимого условия исключает формирование кинематической волнистости и способствует снижению шероховатости поверхности.

5. Предложенные методы расчета и проектирования геометрических параметров режущей части инструмента и режимов резания позволяют прогнозировать требуемые параметры процесса РТМР с оптимальным сочетанием производительности и качества обработки. Изменяя кинематические параметры процесса РТМР можно в широком диапазоне регулировать режимы резания, влиять на интенсивность дробления, форму и размеры стружки, температурно-силовые процессы в зоне резания и управлять качеством обработки.

6. Кинематические особенности метода РТМР способствуют постоянному изменению силы резания по величине и направлению, что обеспечивает повышение интенсивности деформационных процессов при срезании слоя материала заготовки, изменению формы и размеров поперечного сечения

стружки. При этом удельная нагрузка на каждую режущую кромку существенно ниже, чем для вершинного и косоугольного точения.

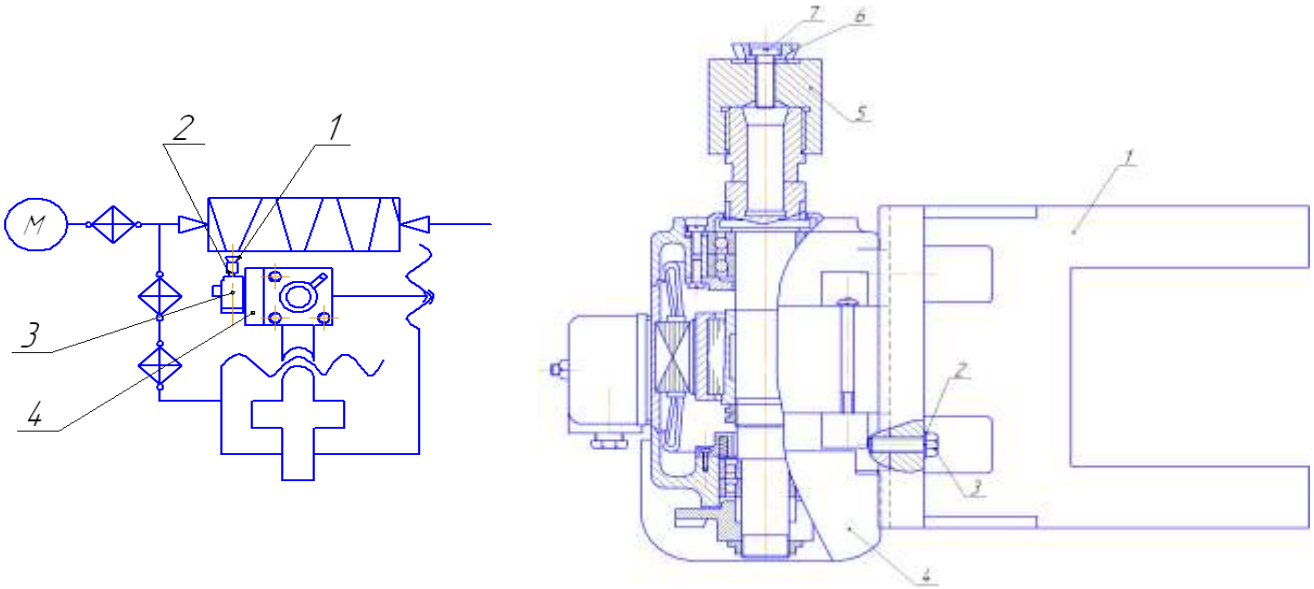
7. Теоретические оценки на основании разработанных кинематических моделей показывают, что формирование мелкой дробленой стружки способствует снижению высотных размеров микронеровностей на обработанной поверхности.

Раздел 3 Экспериментальное исследование процесса ротационного точения многогранными резцами

На основе использования методов математического планирования эксперимента проведены экспериментальные исследования по определению влияния геометрических и кинематических параметров инструмента и режимов резания (независимые однофакторные эксперименты и комплексный полнофакторный) на усилия резания, температуру в зоне резания, шероховатость обработанной поверхности при РТМР. Для определения интенсивности деформационных процессов при РТМР дополнительно определялся объемный коэффициент степени дробления стружки, и проводились электронно-микроскопические исследования морфологии и размеров стружки.

3.1 Методика и аппаратура проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились на токарно-винторезном станке высокой точности модель ИЖ250 ИТВМ.Ф1. с использованием инструментального модуля и многогранных твердосплавных пластин специально заточенных с учетом особенностей кинематики РТМР. Для реализации кинематической схемы РТМР, теоретически обоснованной в процессе диссертационных исследований (см. раздел 2.1), спроектированы и изготовлены оригинальные конструкции инструментальных модулей рисунок 3.1.



а) б)

Рисунок 3.1 – 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

Инструментальный модуль устанавливается в резцедержатель, что позволяет, используя приводы подач и главного движения станка, производить настройку и регулировку инструмента относительно заготовки. При этом точность изготовления базовых поверхностей инструментального модуля обеспечивает требуемые отклонения от перпендикулярности осей вращения инструмента и заготовки 0,02 мм на длине 100 мм и совпадения плоскостей главного и вспомогательного движения (вершина инструмента при врезании располагается на уровне оси вращения заготовки).

Компоновочная схема экспериментального стенда и инструментального модуля для РТМР установленного в резцедержатель токарно-винторезного станка ИЖ250 ИТВМ.Ф1 представлены на рисунках 3.2, 3.3.

Рисунок 3.2 – Общий вид установки инструментального модуля на токарно-винторезном станке ИЖ250 ИТВМ.Ф1

Рисунок 3.3 – Инструментальный модуль для ротационного точения многогранными резцами

Экспериментальные исследования проводились на образцах из стали 45 (ГОСТ 1050-88) и алюминиевого сплава Д16 (ГОСТ 4784-97), базирующихся на специальной оправке - рисунок 3.4.

Рисунок 3.4 - Оправки с образцами и инструментальная головка

На стадии отработки методик определён диапазон варьирования переменных режимов резания. Глубина резания изменялась в диапазоне от 0,1мм до 1мм. Вращение заготовки (круговая подача) - от 8м/мин до 20м/мин и продольная подача 0,12мм/об до 3 мм/об. Частота вращения инструмента от 6000 до 12000об/мин. Скорость резания изменялась в диапазоне от 310 м/мин до 620 м/мин.

Значения продольной подачи регулировались соответствующей настройкой коробки подач станка ИЖ250 ИТВМ.Ф1, круговая подача - настройкой коробки скоростей станка, скорость резания - изменением частоты питающего напряжения электрошпинделя посредством частотного преобразователя Альтивар 31.

В качестве базовых конструкции режущих пластин для оснащения оправки инструментального модуля использованы формы HNGX 0906ANSN-F (Pramet Чехия) и PNUM-130612 Кировоградский завод твердых сплавов (КЗТС) материал (Т15К6 и ВК6ОМ). Конструктивное исполнение режущей части отличается от стандартной (за счет дополнительной подточки - Пат.2463130) [88].

Определение параметров шероховатости поверхности образцов производилось измерением на профилометре-профилографе модели MarSurf M300 (диапазон измерений от -200 до + 150 мкм) и оценивалась по параметрам стандартизованным по ГОСТ 2789-73: Ra - среднее арифметическое отклонение профиля; Rz - высота неровностей профиля по десяти точкам; $R_{\max}$ - наибольшая высота профиля; S_m - средний шаг неровностей; t_m - относительная опорная длина профиля, где m - значения уровня сечения профиля (рисунок 3.5).

Рисунок 3.5 – Аппаратура для определения параметров шероховатости поверхности на профилометре-профилографе модели MarSurf M300

При подготовке к проведению экспериментальных исследований использовался метод планирования полного факторного эксперимента (ПФЭ) [98, 99], позволяющий получить адекватные математические зависимости исследуемых параметров шероховатости от технологических параметров обработки.

Выбор наиболее существенных факторов и уровней их варьирования осуществлялся на основании априорной информации и результатов предварительных однофакторных экспериментов.

В результате были использованы математические модели мультипликативного вида**:**

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{\kappa} b_i x_i, \qquad (76)$$

где: y – исследуемый выходной параметр;

x_i – технологические параметры;

b_i – коэффициенты и показатели степени уравнения регрессии.

Достоверность полученных результатов оценивалась с помощью методов математической статистики.

Контроль и измерение главной составляющей сил резания производился по оригинальной методике, приведенной в разделе 3.5.

3.2 Экспериментальное исследование влияния режимов резания на шероховатость поверхности при РТМР

Как известно из работ Суслова А.Г. [100, 101, 102], Рыжова Э.В. [103] и др. [104-108], эксплуатационные свойства деталей машин в значительной степени зависят от параметров качества поверхностного слоя, которые в свою очередь определяются режимами обработки.

Существуют методологические подходы, основанные на контроле и целенаправленном изменении условий и параметров процесса резания (режимы резания, геометрические параметры режущего инструмента и др.), а не конечных параметров качества поверхности. Такие подходы к оценке качества обработки является, по нашему мнению, даже более предпочтительными, поскольку позволяют заранее спрогнозировать конечные результаты (форму и размеры стружки, высоту микронеровностей, их распределение вдоль оси, волнистость – см. раздел 2.4 теоретической части диссертационной работы) и управлять качеством обработки поверхностного слоя непосредственно в процессе формообразования.

Поэтому, одной из основных задач экспериментальных исследований является определение функциональных взаимосвязей “условия точения многогранными резцами – параметры шероховатости” при обработке методом РТМР и, одновременно, экспериментальная проверка теоретических оценок.

Для проведения однофакторных экспериментов были определены уровни варьирования независимых переменных, в качестве которых приняты:

$S_{пр_{ст}}$ – продольная подача резца на оборот обрабатываемого вала, 0,04…1,2 мм/об;

$S_{кр}$ круговая подача заготовки, 8…25 м/мин;

$n_з$ – число оборотов заготовки, 25…160 об/мин;

$d_З$ – диаметр заготовки, 60мм;

$V_р$ – скорость главного движения 310…933м/мин;

n_p – число оборотов инструмента, 12000…18000 об/мин;

t – глубина резания, 0,1…1 мм.

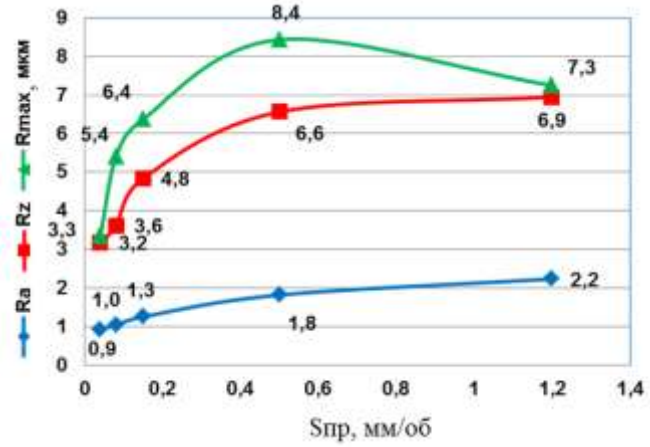
При этом число граней профиля резца определялось формой и размерами пяти и шестигранных пластин HNGX 0906ANSN-F (Pramet) и PNUM-130612 (КЗТС) материал (Т15К6 и ВК6ОМ). Результаты проведения однофакторных экспериментов представлены в таблице 1 и приведены на рисунках 3.6 – 3.9.

Таблица 1 – Влияние технологических факторов РТМР на параметры шероховатости поверхности

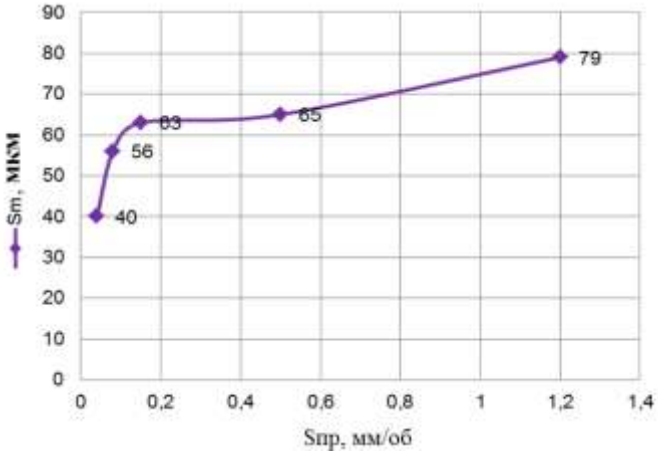
№ сборки	Номер образца	Условия обработки							Выходные параметры шероховатости				
		Sпр	$S_{кр}$		V_p		t	N	Ra мкм	Rz мкм	R_{max} мкм	S_m мкм	t_m %
			$n_з$	d_3	n_p	S_k							
I	1	0,04	63	50	18000	0,75	0,2	6	0,9236	3,182	3,345	40	61
	2	0,08							1,0486	3,6122	5,396	56	58
	3	0,15							1,257	4,841	6,378	63	56
	4	0,5							1,8198	6,5622	8,435	65	53
	5	1,2							2,235	6,945	7,25	79	50
II	1	0,3	50	50	18000	0,75	0,2	6	1,7576	7,4888	8,942	50	53
	2		63						2,2092	7,9592	11,4	65	51
	3		100						2,2104	7,302	12,31	68	50
	4		125						3,045	10,7678	16,4	78	49
	5		160						3,112	11,486	18,75	101	48
III	1	0,3	63	50	6000	0,75	0,2	6	1,9952	8,1718	15,56	79	47

	2				9000				1,866	7,6182	7,569	73	49
	3				12000				1,66	6,2086	7,495	69	51
	4				15000				1,534	6,0624	6,616	62	52
	5				18000				1,4366	5,4752	7,69	56	54
IV	1	0,3	63	50	18000	0,75	0,1	6	2,5878	9,8224	12,39	61	55
	2						0,2		2,2092	7,9592	11,4	67	55
	3						0,5		2,9066	10,5476	13,19	69	53
	4						0,75		1,9952	8,1718	12,56	72	51
	5						1		2,2104	7,302	12,31	70	52
V	1	0,3	63	45	18000	0,75	0,2	6	2,9066	12,5476	22,19	68	54
	2			50					1,9952	8,1718	15,56	67	55
	3			60					3,045	10,7678	8,942	65	55
VI	1	0,3	63	50	18000	2,2	0,2	5	1,8198	6,5622	8,435	58	54
	2					0,75		6	1,9952	8,1718	15,56	56	57

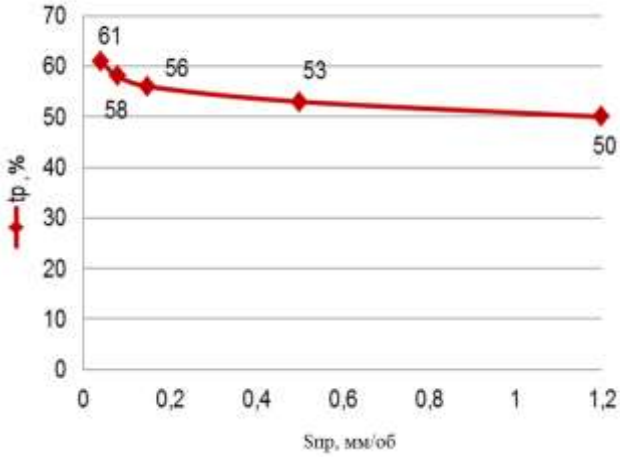
Характер изменения численных значений параметров шероховатости в зависимости от величины продольной подачи показывает, что она оказывает значимое влияние на Ra, Rz, $R_{\max}$, S_m, t_m в диапазоне от 0,04 до 0,5 (рисунок 3.6). В дальнейшем не монотонный характер кривых стабилизируется.



а)



б)



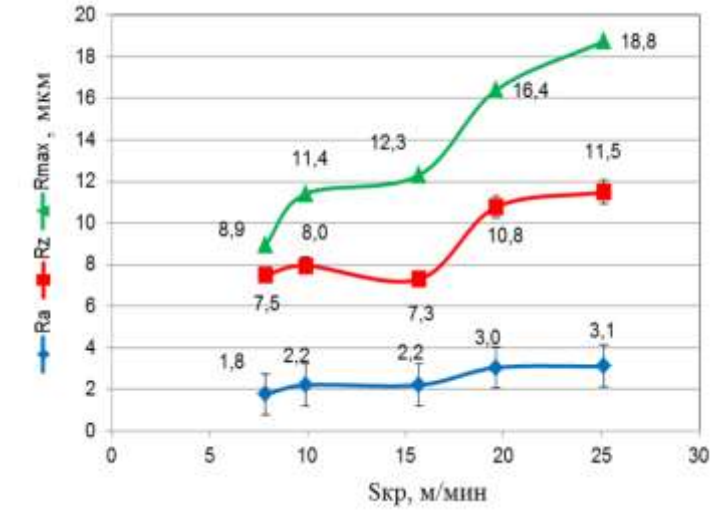
в)

Рисунок 3.6 - Влияние продольной подачи на характеристики шероховатости поверхности (Сталь 45) по ГОСТ 2789-73: а) по параметрам Ra, Rz, R_{max}; б) по параметру S_m; в) по параметру t_m.

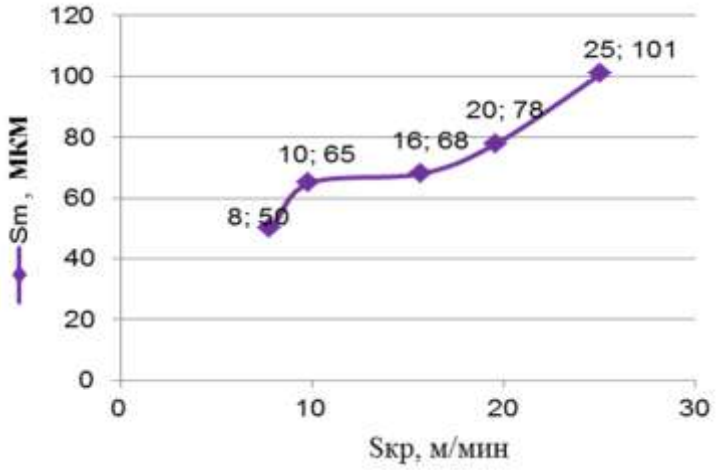
Обращает на себя внимание, что значения параметров шероховатости поверхности полученной методом РТМР не превышают 8 мкм, что соответствует 6, 7 квалитету точности. Ни один из известных методов точения, при таких значениях подач, шероховатость такого уровня обеспечить не может.

Необходимо подчеркнуть, что значения круговых подач назначаются только для методов ротационного точения с принудительным вращением инструмента. Известные методы реализуют отношения окружной скорости заготовки и инструмента $i = \frac{V_A}{V_Б}$ в диапазоне от 0,001 до 0,01, иначе возникает большая кинематическая волнистость поверхности. При РТМР соответствующие соотношения скоростей варьируется от 0,05 до 0,3, что также является преимущественным отличием от известных, позволяющим повысить производительность процесса резания при одновременном повышении качества обработки. Но, характер изменения кривых позволяет предположить, что увеличение круговой подачи свыше 15 м/мин нежелательно, поскольку численные значения шероховатостей Ra, Rz возрастают в 1,5-2 раза, одновременно увеличиваются значение шага S_m, уменьшается площадь опорной поверхности (почти в 3 раза). Это является признаком и предпосылкой появления кинематической волнистости (рисунок 3.7).

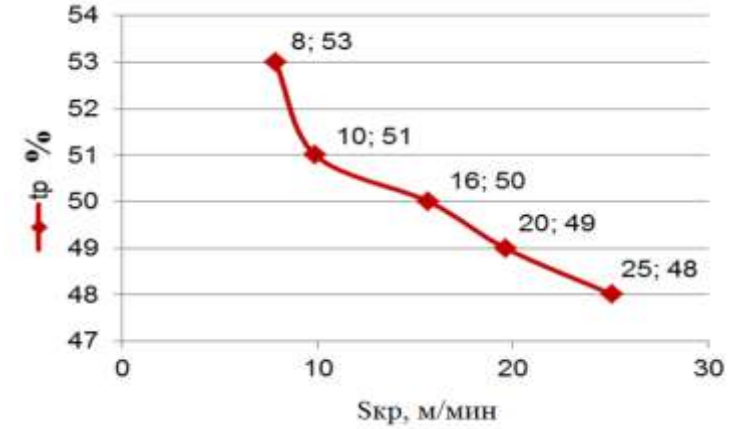
Увеличение главной скорости резания V_p (для метода РТМР это скорость определяется вращением инструмента) приводит к значимому изменению шероховатости в диапазоне от 310 до 620м/мин, затем процесс стабилизируется. Это можно объяснить устранением кинематической волнистости, которая возникает на относительно низких скоростях резания (рисунок 3.8).



а)

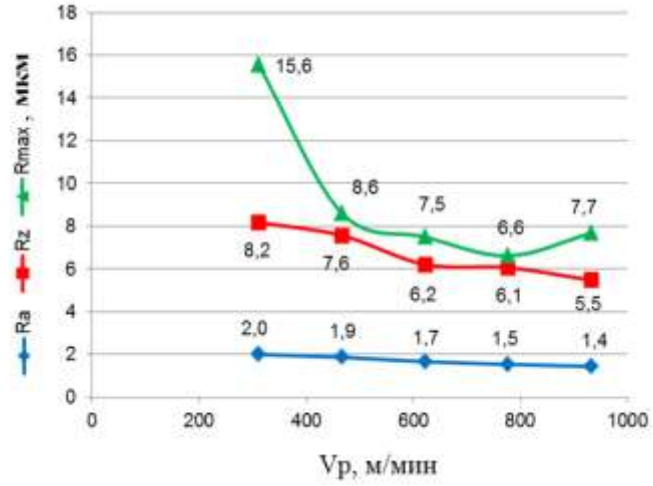


б)

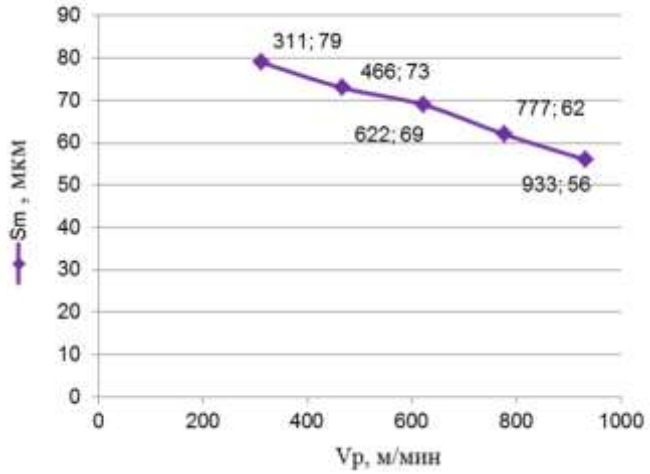


в)

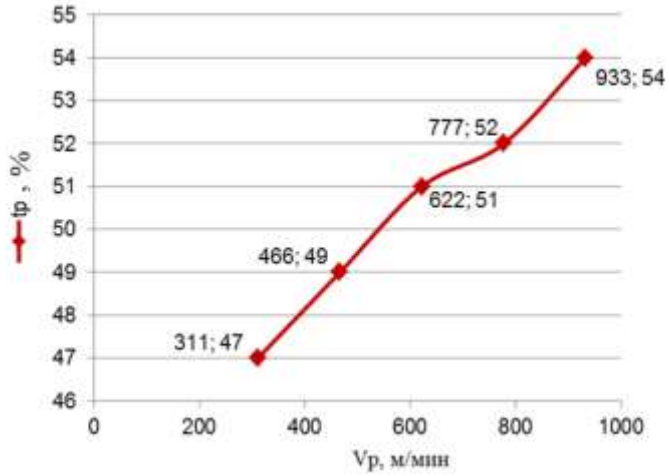
Рисунок 3.7 - Влияние круговой подачи на характеристики шероховатости поверхности (Сталь 45) по ГОСТ 2789-73: а) по параметрам Ra, Rz, R_{max}; б) по параметру S_m; в) по параметру t_m.



а)



б)

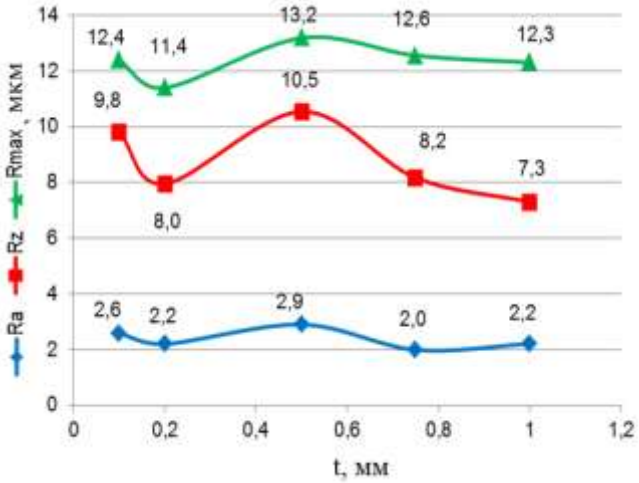


в)

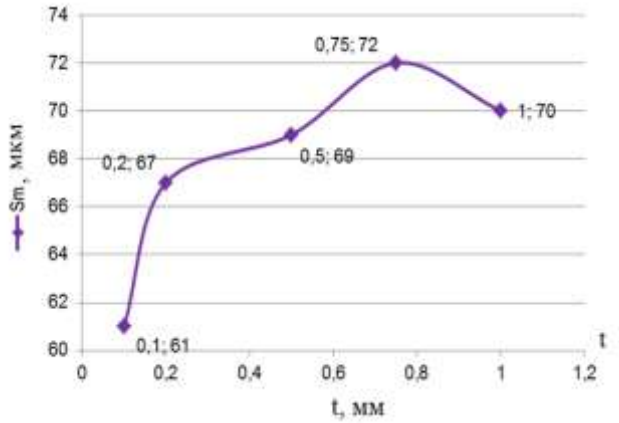
Рисунок 3.8 - Влияние скорости резания на характеристики шероховатости поверхности (Сталь 45) по ГОСТ 2789-73: а) по параметрам Ra, Rz, R_{max}; б) по параметру S_m; в) по параметру t_m.

Таким образом, можно говорить о том, что использование высоких скоростей резания при РТМР (от 620 до 933м/мин) является предпочтительным с точки зрения снижения шероховатости и устранения волнистости. Однако, необходимо иметь в виду, что чрезмерно высокие скорости в совокупности с микро-ударными нагрузками характерными для РТМР (из-за многолезвийности) могут привести к повышенному износу режущей части инструмента.

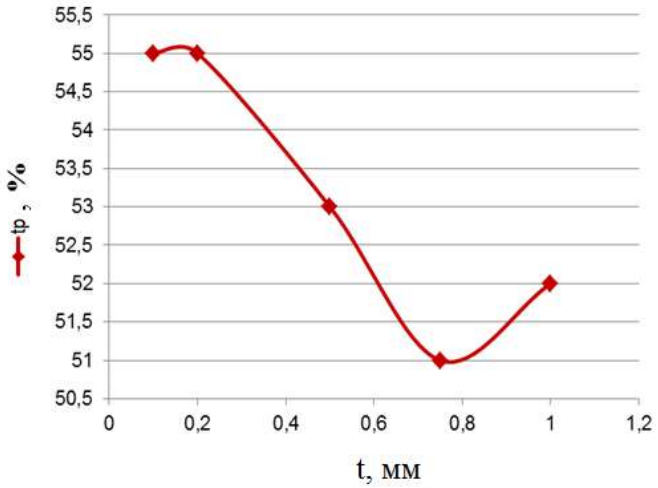
Глубина резание не оказывает существенного негативного влияния на параметры шероховатости вплоть до значения t равное 1мм (рисунок 3.9). Это объясняется также и особенностями кинематики процесса РТМР (см. раздел 2). С учетом этих результатов было высказано предположение, что для дальнейших экспериментальных исследований численные значения глубины резания могут быть увеличены, по крайне мере до 1,5мм. Дальнейшее увеличение глубины резания имеет ограничения из-за конструктивных (размерных) параметров режущей (свыше 1,5мм) пластины.



а)



б)



в)

Рисунок 3.9 - Влияние глубины резания на характеристики шероховатости поверхности (Сталь 45) ГОСТ 2789-73: а) по параметрам Ra, Rz, R_{max}; б) по параметру S_m; в) по параметру t_m.

Таким образом, однофакторными исследованиями метода РТМР было выявлено, что на шероховатость поверхности существенное влияние оказывают все режимы резания, за исключением глубины. На основании анализа однофакторных экспериментов были выбраны уровни варьирования независимых переменных для дальнейших экспериментальных исследований по плану ПЭФ: $S_{пр_{ст}}$ = 0,3…1,2 мм/об; $S_{Кр}$=9,891…19,625 м/мин; V_p= 310…621 м/мин; t=0,3…1,5мм. Матрица планирования полного факторного эксперимента типа 2^4 представлена в таблице 2.

Таблица 2 - Полный факторный эксперимент типа 2^4

Технологические параметры					Выходные параметры шероховатости				
Переменные	$S_{пр_{ст}}$	$S_{Кр}$	V_p	t	Ra мкм	Rz мкм	R_{max} мкм	S_m мкм	t_m %
В.У.	1,2	19,625	621	1,5					
Н.У.	0,3	9,891	310	0,3					
Оп. №1	-	-	-	-	2,31	8,98	15,09	79,68	47,85
Оп. №2	+	-	-	-	3,37	12,65	20,49	100,50	44,27
Оп. №3	-	+	-	-	3,19	11,48	22,66	112,75	45,37
Оп. №4	-	-	+	-	1,87	6,93	9,42	64,60	52,11
Оп. №5	-	-	-	+	2,12	8,00	15,58	87,95	45,44
Оп. №6	+	+	-	-	4,64	16,17	30,78	142,22	41,98
Оп. №7	+	-	+	-	2,72	9,76	12,80	81,48	48,21
Оп. №8	+	-	-	+	3,08	11,26	21,16	110,94	42,04
Оп. №9	-	+	+	-	2,57	8,86	14,16	91,41	49,41
Оп. №10	-	+	-	+	2,92	10,22	23,41	124,46	43,09
Оп. №11	-	-	+	+	1,71	6,17	9,73	71,31	49,49
Оп. №12	+	+	+	-	3,74	12,48	19,22	115,30	45,71
Оп. №13	+	-	+	+	2,49	8,69	13,22	89,94	45,79
Оп. №14	+	+	-	+	4,25	14,40	31,79	156,99	39,86
Оп. №15	-	+	+	+	2,36	7,89	14,62	100,90	46,92
Оп. №16	+	+	+	+	3,43	11,11	19,85	127,28	43,41

Зависимость параметров шероховатости поверхности от различных факторов (режимов резания) можно представить в виде уравнений регрессии степенного вида:

$$Ra,\ Rz,\ R_{max},\ S_m,\ t_m = C_o \cdot S^n_{пр} \cdot S^k_{кр} \cdot V^m_p \cdot t^p; \quad (77)$$

Представим зависимость для параметра *Ra* в линейном виде:

$$lnRa = lnC_o + n \cdot lnS_{пр} + k \cdot ln\ S_{кр} + m \cdot ln\ V_p + p \cdot ln\ t; \quad (78)$$

Введем обозначения:

$lnRa = \hat{y};\ lnC_o = b_0;\ n = b_1;\ k = b_2;\ m = b_3;\ p = b_4;\ S_{пр} = x_1;\ S_{кр} = x_2;\ V_p = x_3;\ t = x_4.$

Тогда:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot ln\ x_1 + b_2 \cdot ln\ x_2 + b_3 \cdot ln\ x_3 + b_4 \cdot ln\ x_4 \quad (79)$$

Уравнение (79) является постулированной эмпирической моделью зависимости среднеарифметического параметра шероховатости профиля *Ra* от режимов резания.

Преобразуем независимые переменные x_i в безразмерные переменные по формуле вида [73, 82, 83].

$$x_i = \frac{2(\ln \tilde{x}_i - \ln \tilde{x}_{i\max})}{\ln \tilde{x}_{i\max} - \ln \tilde{x}_{i\min}}; \quad (80)$$

Результаты кодирования сведены в таблицу.

При построении модели необходимо обеспечить хорошую воспроизводимость результатов. По этой причине выбрано необходимое число повторных опытов 2 (определяется значительной трудоемкостью проведения экспериментов и обработки результатов).

Таблица 3 - Матрица планирования и результаты опытов.

Уровень факторов	$S_{пр_{ст}}$		$S_{Кр}$		$V_р$		t		Ra_1 мкм	Ra_2 мкм	Ra_c мкм	$\overline{Ra}$ мкм	$ln\overline{Ra}$
	x_1	$ln\ x_1$	x_2	$ln\ x_2$	x_3	$ln\ x_3$	x_4	$ln\ x_4$					
В.У. (верхний уровень)	1,2	0,1823	19,6	2,977	621	6,431	1,5	0,405					
Н.У. (нижний уровень)	0,3	-1,204	9,89	2,292	310	5,737	0,3	-1,204					
Код обозначения.													
Оп. №1	-		-		-		-		2,331	2,287	2,31	2,31	0,837
Оп. №2	+		-		-		-		3,344	3,399	3,37	3,37	1,215
Оп. №3	-		+		-		-		3,227	3,163	3,19	3,19	1,160
Оп. №4	-		-		+		-		1,853	1,892	1,87	1,87	0,626
Оп. №5	-		-		-		+		2,14	2,096	2,11	2,12	0,751
Оп. №6	+		+		-		-		4,601	4,679	4,64	4,64	1,535
Оп. №7	+		-		+		-		2,694	2,747	2,72	2,72	1,001
Оп. №8	+		-		-		+		3,053	3,115	3,08	3,08	1,125
Оп. №9	-		+		+		-		2,585	2,56	2,57	2,57	0,944
Оп. №10	-		+		-		+		2,952	2,889	2,92	2,92	1,072
Оп. №11	-		-		+		+		1,728	1,692	1,71	1,71	0,536
Оп. №12	+		+		+		-		3,778	3,699	3,74	3,74	1,319
Оп. №13	+		-		+		+		2,513	2,465	2,49	2,49	0,912
Оп. №14	+		+		-		+		4,296	4,211	4,25	4,25	1,447
Оп. №15	-		+		+		+		2,339	2,378	2,36	2,36	0,859
Оп. №16	+		+		+		+		3,464	3,4	3,43	3,43	1,233

По формуле (80) находим:

$$x_1 = 1,44 \ln x_1 + 0,7374;$$

$$x_2 = 2,9197 \ln x_2 - 7,692; \quad (81)$$

$$x_3 = 2,882 \ln x_3 - 17,53;$$

$$x_4 = 1,243 \ln x_4 + 0,4966;$$

Уравнение с введением членов, учитывающих взаимодействие факторов, записывается в кодированных переменных:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{23}x_2x_3 + b_{34}x_3x_4 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + \\ + b_{24}x_2x_4 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{234}x_2x_3x_4 + b_{124}x_1x_2x_4 + b_{134}x_1x_3x_4 + b_{1234}x_1x_2x_3x_4; \quad (82)$$

Используя матрицу планирования и результаты опытов (таблица 3) определяют коэффициенты модели, представленной формулой (82). Формула (82) представляет собой полином первой степени.

Структура формулы для определения коэффициентов имеет вид [90, 99]:

$$b_i = \frac{\sum \ln \overline{Ra}}{N}; \quad (83)$$

Исходные значения для формулы (83) берутся из таблицы 3. Результаты расчета коэффициентов представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Числовые значения коэффициентов

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_{12}	b_{23}	b_{34}
1,036	0,1876309	0,1603691	-0,1070059	-0,0438691	-0,0002441	-0,0001191	-0,0002559
b_{13}	b_{14}	b_{24}	b_{123}	b_{234}	b_{124}	b_{134}	b_{1234}
-0,0003809	0,0005059	0,0001309	0,0000059	0,0001191	0,0002441	0,0005059	0,0000059

Подставив найденные коэффициенты в формулу (82) получаем:

$$y = 1,036 + 0,1876309x_1 + 0,1603691x_2 - 0,1070059x_3 - 0,0438691x_4 - 0,0002441x_1x_2 - 0,0001191x_2x_3 - \\ - 0,0002559x_3x_4 - 0,0003809x_1x_3 + 0,0005059x_1x_4 + 0,0001309x_2x_4 + 0,0000059x_1x_2x_3 + 0,0001191x_2x_3x_4 + \\ + 0,0002441x_1x_2x_4 + 0,0005059x_1x_3x_4 + 0,0000059x_1x_2x_3x_4; \quad (84)$$

Оценка достоверности полученной в результате эксперимента модели (84) была проведена с помощью методов математической статистики. При этом статистический анализ включал следующие этапы: определение дисперсии воспроизведения опытов, проверку однородности дисперсии по критерию Кохрена, проверку значимости коэффициентов модели с использованием t – критерия Стьюдента, проверку адекватности модели с использованием критерия Фишера, а также вычисление коэффициентов множественной корреляции.

Построчные дисперсии и дисперсию воспроизводимости вычисляли по формулам [90, 99]:

$$S_V^2 = \frac{1}{r-1}\sum_{j=1}^{r}(y_{vj} - \bar{y}_v); \tag{85}$$

$$S^2\{y\} = \frac{1}{N(r-1)}\sum_{V=1}^{N}\sum_{j=1}^{r}(y_{vj} - \bar{y}_v)^2; \tag{86}$$

где: r – число повторных опытов равно 2;

N – количество выборок равное 16.

Дисперсия воспроизводимости опытов с учетом формулы (86) равна:

$$S^2\{y\} = \frac{0,00018672}{16(2-1)} = 0,00001167; \tag{87}$$

Проверка однородности дисперсии по критерию Кохрена.

$$G = \frac{S_{V\max}^2}{S_V^2}\frac{0,0001347}{0,00018672} = 0,7214; \tag{88}$$

Расчеты построчной дисперсии (представлены в приложении А) проведены по стандартной методике и дают численные значения $S_{V\max}^2 = 0,0001347$ и $S_V^2 = 0,00018672$.

По таблице [90, 99] определяем критическое значение критерия Кохрена для уровня значимости $a = 0,05$.

Поскольку выполняется неравенство ($\sigma = 0,7214 < \sigma_{кр} = 0,734$), то гипотеза об однородности дисперсии принимается.

Проверку значимости коэффициентов модели (82) выполняли с использованием t – критерия Стьюдента в следующей последовательности. Находим дисперсию коэффициентов регрессии по формуле [90, 99]:

$$S^2\{b_i\} = \frac{S^2\{y\}}{N \cdot r} = \frac{0,00001167}{32} = 0,000000364688; \tag{89}$$

$$S\{b_i\} = \sqrt{S^2\{b_i\}} = \pm 0,000603894189;$$

В таблице [90, 99] находим критическое значение критерия Стьюдента для числа степеней свободы $f_E = N(r-1) = 16$ и уровня значимости $a = 5\%$.

$$t_{кр} = 2{,}12;$$

Половину длины доверительного интервала Δb_i определяли по формуле [90, 99]:

$$\Delta b_i = t_{кр} \cdot S\{b_i\} = 2{,}12 \cdot 0{,}000603894189 = 0{,}001280256; \quad (90)$$

Коэффициент считается значимым, если $|b_i| \geq \Delta b_i$. В уравнении такими коэффициентами является:

$$|b_0| = 1{,}036; |b_1| = 0{,}1876309; |b_2| = 0{,}1603691; |b_3| = 0{,}1070059; |b_4| = 0{,}0438691.$$

С учетом проверки коэффициентов с использованием t – критерия Стьюдента модель (82) в кодированных переменных будет иметь вид:

$$y = 1{,}036 + 0{,}1876309x_1 + 0{,}1603691x_2 - 0{,}1070059x_3 - 0{,}0438691x_4; \quad (91)$$

Проверку адекватности модели (91) выполняли с использованием F – критерия Фишера в следующей последовательности:

$$S^2_{ад} = \frac{r}{N-m}\sum(\bar{y}_v - y_v)^2; \quad (92)$$

где $m = 5-$ число членов аппроксимирующего полинома (85)

Расчетное значение y_v находим, подставляя в формулу (85) значения (+1) и (-1) в соответствии с матрицей планирования (таблица 3). Результаты расчетов $\bar{y}_v$, y_v, $(\bar{y}_v - y_v)$, $(\bar{y}_v - y_v)^2$ представлены в приложении А и дают необходимое численное значение $\sum(\bar{y}_v - y_v)^2 = 0{,}00001628252.$

С учетом формулы (92) дисперсия адекватности равна:

$$S^2_{ад} = \frac{2}{16-5} \cdot 0{,}00001628252 = 0{,}00000296046; \quad (93)$$

Расчетное значение критерия Фишера определим по формуле [127]:

$$F_p = \frac{S^2_{ад}}{S^2\{y\}} = \frac{0{,}00000296046}{0{,}00001167} = 0{,}254 \quad (94)$$

Критическое значение критерия Фишера для степеней свободы и $f_E = N(r-1) = 16$ (где число степеней свободы большей дисперсии; f_E - число

степеней свободы меньшей дисперсии) при уровне значимости $a = 0,05$ находим по таблице [90, 99]: $F_{кр} = 2,51$.

Поскольку выполняется неравенство $F_p < F_{kp}(0,254 < 2,51)$, то можно считать что модель (84) адекватна.

В качестве величины, характеризующей вклад коэффициентов регрессии в уравнение модели, используют множественный коэффициент корреляции, значение которого определяется по формуле [90, 99]:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum(\bar{y}_v - y_v)^2}{\sum(\bar{y}_v - \hat{y}_v)^2}} = \sqrt{1 - \frac{0,00001628252}{1,188773}} = 0,9999; \qquad (95)$$

Величина R может изменяться от 0 до +1. Если вклад, вносимый коэффициентом равен нулю, то $R = 0$; если же уравнение регрессии полностью описывает результат эксперимента, то $R = 1$; Результат расчета выражения $(\bar{y}_v - \hat{y}_v)^2$ представлены в приложении А.

Значение множественного коэффициента корреляции, рассчитанного по формуле (90) равно $R = 0,9999$. Следовательно, результаты расчета значения множественного коэффициента корреляции показало, что уравнение регрессии (85) полностью описывает результаты эксперимента. Таким образом, зависимость шероховатости поверхности от режимов резания РТМР с достаточной точностью можно представить уравнением (96)

Для перехода от кодированных значений факторов к натуральным в уравнение (91) подставим значение факторов x_1, x_2, x_3, x_4 рассчитанных по выражению (81).

После выполнения соответствующих преобразований получаем выражение вида:

$$\ln \overline{Ra} = \ln e^{1,7949} + \ln S_{i\delta}^{0,2701} + \ln S_{\hat{e}\delta}^{0,4679} + \ln V_p^{-0,3081} + \ln t^{-0,0548}; \qquad (96)$$

Потенцируя выражение (96), находим зависимость шероховатости поверхности от исследуемых факторов процесса ротационного точения многогранными резцами.

Расчетные полуэмпирические формулы с анализом степени влияния отдельных параметров режимов резания в виде ранговых диаграмм приведены ниже.

Для параметра среднего арифметического отклонения профиля Ra в пределах базовой длины получена формула:

$$Ra = 6,01\frac{S_{пр}^{0,2701} \cdot S_{кр}^{0,4679}}{V_p^{0,3081} \cdot t^{0,0548}}; \quad (97)$$

С целью выявления влияния каждого из независимых факторов на параметры шероховатости поверхности Ra было проведено их ранжирование рисунок 3.10

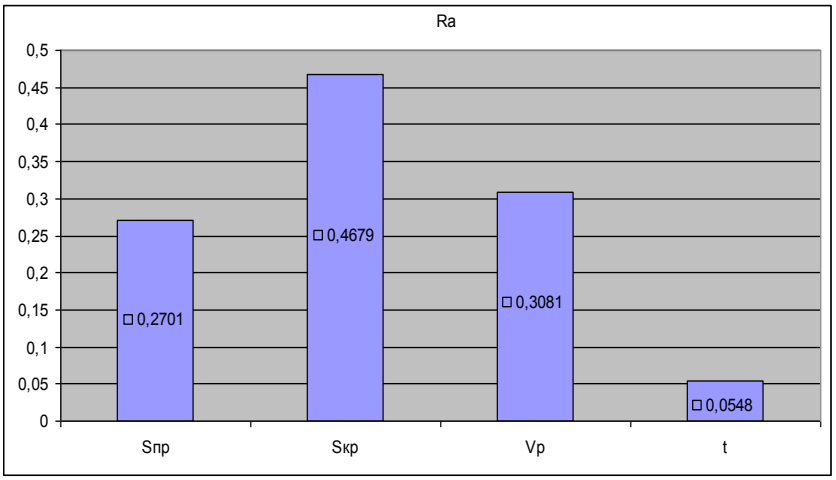


Рисунок 3.10 – Ранжирование факторов по степени их влияния на характеристики шероховатости поверхности по параметру Ra

Для параметра Rz высоты неровностей профиля по десяти точкам в пределах базовой длины получена формула:

$$Rz = 41,52\frac{S_{пр}^{0,2471} \cdot S_{кр}^{0,3583}}{V_p^{0,3733} \cdot t^{0,0721}}; \quad (98)$$

Влияние каждого из независимых факторов на параметры шероховатости поверхности Rz представлено на рисунке 3.11

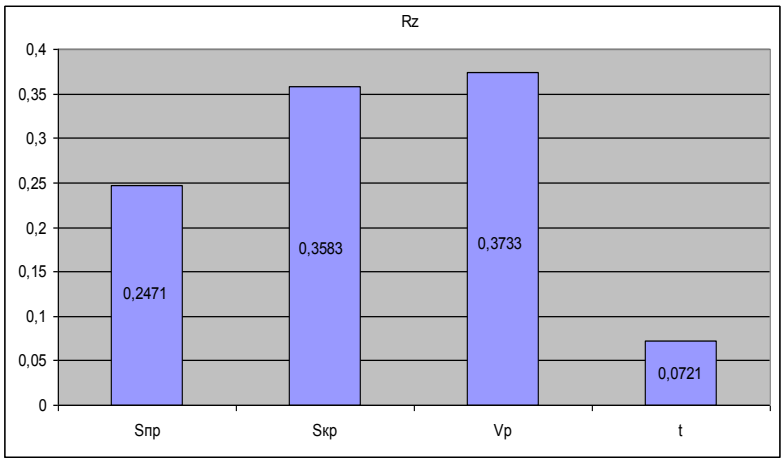


Рисунок 3.11 – Ранжирование факторов по степени их влияния на характеристики шероховатости поверхности по параметру Rz

Параметр $R\max$ (наибольшая высота профиля в пределах базовой длины) может быть рассчитана по формула:

$$R\max = 251,89\frac{S_{пр}^{0,2208}\cdot S_{кр}^{0,594}\cdot t^{0,02}}{V_p^{0,6775}}; \qquad (99)$$

Влияние режимов резания на параметр шероховатости поверхности $R\max$ представлено на рисунке 3.12

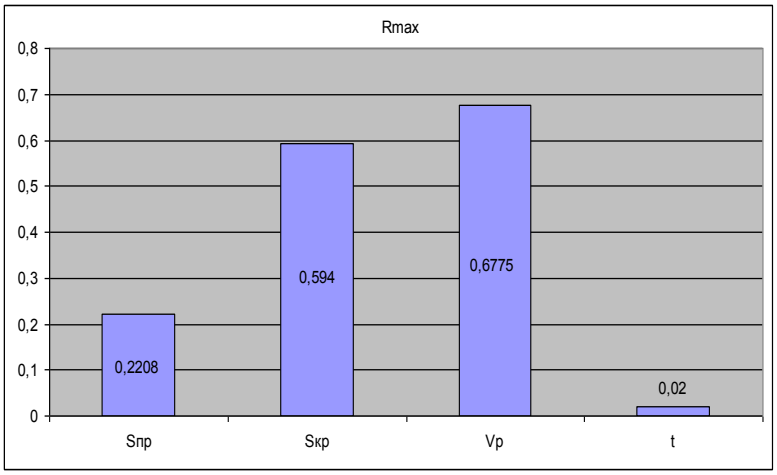


Рисунок 3.12 - Ранжирование факторов по степени их влияния на характеристики шероховатости поверхности по параметру $R\max$.

Анализ ранговых диаграмм показывает, что доминирующее влияние на формирование высотных параметров шероховатости Ra, Rz, $R_{\max}$ оказывают круговая подача $S_{кр}$ и число оборотов инструмента n_p, чуть менее значимым

фактором является продольная подача, $S_{пр}$. Глубина резания t РТМР практически не оказывает существенного влияния на изменение параметров шероховатости.

Расчетная полуэмпирическая зависимость параметра Sm (средний шаг неровностей в пределах базовой длины) в зависимости от режимов резания имеет вид:

$$Sm = 185,83 \frac{S_{пр}^{0,1675} \cdot S_{кр}^{0,5067} \cdot t^{0,0614}}{V_p^{0,302}}; \quad (100)$$

Для оценки влияния режимов резания на параметры шероховатости поверхности Sm было также проведено их ранжирование рисунок 3.13

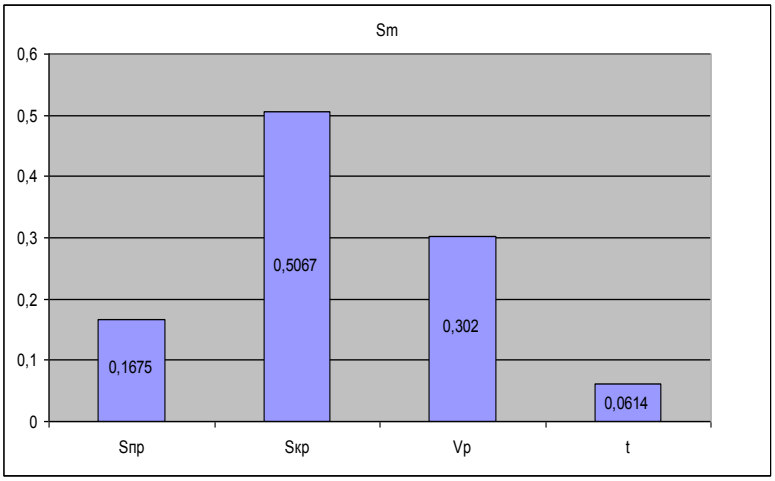


Рисунок 3.13 – Ранжирование факторов по степени их влияния на характеристики шероховатости поверхности по параметру Sm.

Превалирующее влияние на шаг микронеровности на уровне средней линии S_m оказывает круговая подача $S_{кр}$ и скорость главного движения V_p. Значимым параметром, влияющим на шаг микронеровности на уровне средней линии S_m, является также продольная подача $S_{пр}$.

Шаговый параметр t_m (относительная опорная длина профиля в пределах базовой длины) определяется:

$$t_m = 25,42 \frac{V_p^{0,1228}}{S_{пр}^{0,0561} \cdot S_{кр}^{0,0777} \cdot t^{0,0321}}; \quad (101)$$

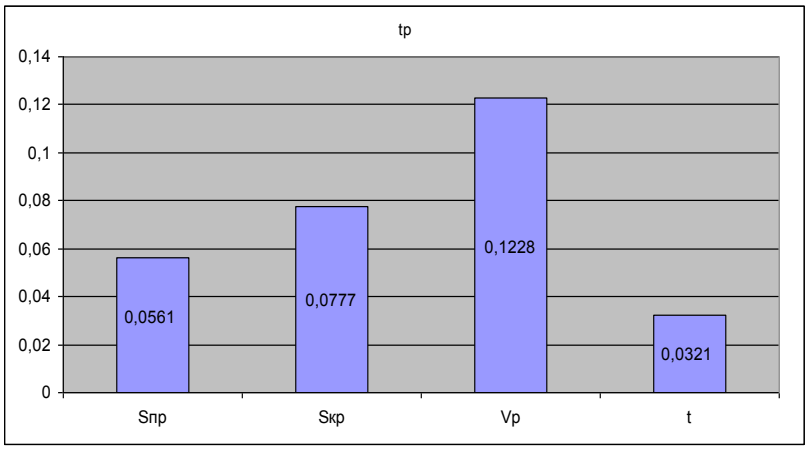


Рисунок 3.14 - Ранжирование факторов по степени их влияния на характеристики шероховатости поверхности по параметру t_m.

Относительная опорная длина профиля на уровне средней линии t_m увеличивается с ростом скорости главного движения V_p и уменьшается с увеличением круговой и продольной подач $S_{кр}$.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили установить характер влияния режимов резания при РТМР на показатели шероховатости обработанной поверхности. Полученные полуэмпирические зависимости позволяют при назначении режимов резания прогнозировать параметры шероховатости Ra, Rz, $R_{\max}$; S_m; t_m (устанавливать режимы резания с оптимальным сочетанием “производительность – качество обработки”).

3.3 Определение объемного коэффициента дробления стружки

Одним из показателей, характеризующих эффективность процесса лезвийной обработки, является степень дробления формирующейся стружки, которая оценивалась с помощью объемного коэффициента (ω), как отношения объема стружки к объему снятого металла [109]. При увеличении интенсивности измельчения стружки объемный коэффициент ω уменьшается. Другим критерием оценки стружки по степени ее дробления является тип получаемой стружки. По этому критерию стружка условно подразделяется на категории: непрерывная стружка в виде путаной (прямой) ленты или цилиндрической спирали $l > 100$ мм – нераздробленная (ω = 100…400); цилиндрическая спираль с $l < 100$ мм –

удовлетворительно раздробленная (ω = 30…50); части цилиндрической спирали – дробленая (ω= 5…20); кольцо или полукольцо – мелкодробленая (ω ≤ 5). Перечисленные признаки характеризуют также интенсивность и характер деформационных процессов при удалении с заготовки слоя материала в виде стружки. Естественно, форма и размеры стружки зависят от многих факторов: свойства материала заготовки, режимы резания, геометрия режущей части инструмента и т.д. При этом считается, что для повышения стойкости инструмента и обеспечения требуемого качества обработки поверхностного слоя изделия необходимо стремиться максимально измельчить стружку для снижения сил трения и температур в зоне контакта “инструмент – заготовка”, устранения диффузионных и адгезионных видов износа инструмента, уменьшить глубину дефектного слоя на обработанной поверхности и т. д.

Существующие методы дробления стружки можно условно разделить на два вида [109, 110, 111]: естественное дробление путем регулирования режимов резания и геометрии режущего инструмента и искусственное дробление с помощью различных устройств динамического и теплового воздействия, подачи СОТС в зону резания под большим давлением (в том числе через каналы в корпусе инструмента).

Проведенные в процессе выполнения диссертационной работы теоретические исследования, а также данные приведенные в работах [82, 83, 111, 112, 113] показали, что применение РТМР при обработке наружных поверхностей является перспективным способом для надежного гарантированного дробления стружки, а значит создания более благоприятных условий с точки зрения снижения сил трения, износа инструмента и перегрева трущихся поверхностей.

Для проверки достоверности полученных теоретических положений необходимо было произвести экспериментальную оценку степени дробления стружки в процессе РТМР с помощью объемного коэффициента ω. Экспериментальные исследования проводились на токарно-винторезном станке модели ИЖ250 ИТВМ.Ф1. с использованием инструментального модуля РТМР.

Описание конструкции инструментального модуля для ротационного точения многогранными резцами приведено в разделе 3.1.

В процессе проведения эксперимента объемный коэффициент определяли для стружки, полученной в процессе обработки методом РТМР заготовок из алюминиевых сплавов (Д16) и стали 45.

При проведении экспериментов использованы следующие численные значения режимов резани: $S_{пр_{ст}}$, продольная подача резца на оборот обрабатываемого вала - 1,2 мм/об; $S_{кр}$, круговая подача заготовки - 118м/мин; $n_з$, число оборотов заготовки - 630 об/мин; $d_З$, диаметр заготовки - 60 мм; $V_р$, скорость главного движения - 310 м/мин; $n_р$, число оборотов инструмента - 6000 об/мин; t, глубина резания - 1 мм;

Численные значения режимов резания были выбраны исходя из теоретических данных соответствующих формированию сечения стружки с наибольшими габаритными размерами и на основании обработки методики эксперимента.

Поскольку объем сплошного материала $Q_{мет}$ ($см^3$) определялся по формуле:

$$Q_{мет}=G\cdot 1000/\gamma \qquad (102)$$

где: G – масса стружки, кг;

γ - плотность материала, г/$см^3$.

То объемный коэффициент может быть определен по формуле:

$$\omega= Q_{стр}/ Q_{мет} \qquad (103)$$

где: $Q_{стр}$ – объем стружки, $см^3$.

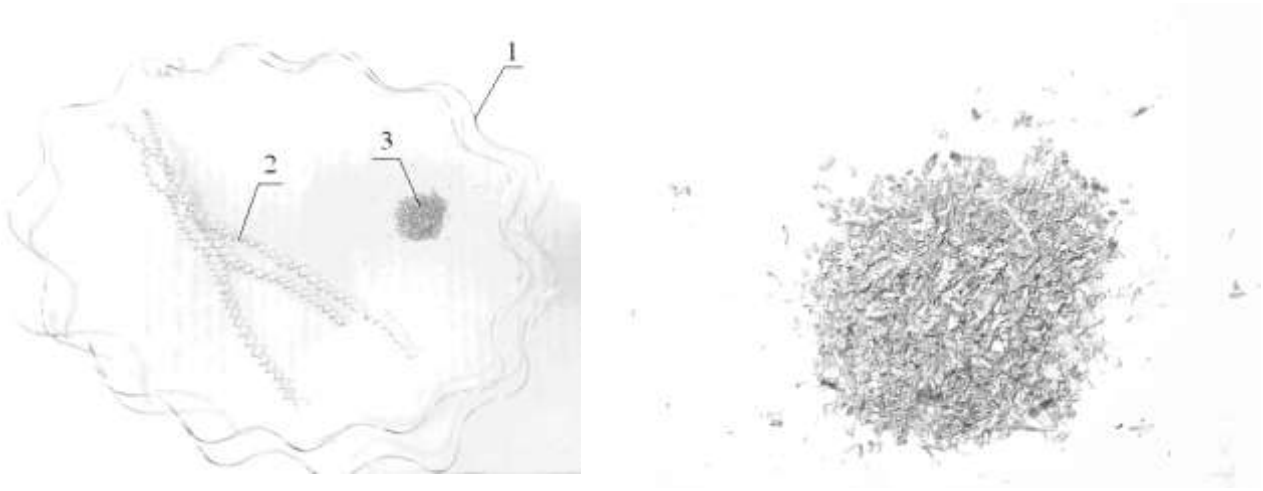
В результате проведенных экспериментов установлено:

- объемный коэффициент ω для стружки, полученной при обработке образцов из стали 45: ω=2;

- объемный коэффициент ω для стружки, полученной при обработке образцов из сплава Д16: ω= 3.

По классификации, предложенной в работе [107, 108], такая стружка может быть охарактеризована как мелкодроблёная. Результаты измерений объемного

коэффициента дробления стружки, полученной в процессе обработки методом РТМР заготовки из стали 45 и алюминиевых сплавов, подтверждают очень высокую степень измельчения слоя материала заготовки. На фотографиях (рисунок 3.15) приведены изображения стружек из алюминиевого сплава Д16, которые наглядно иллюстрируют, что при обычном вершинном точении (пластиной без стружколомающей канавки) формируется длинная сливная стружка (рисунок 3.15а, тип 1). При наличии стружколомающей канавки на режущей пластине характер схода стружки изменяется на витую спиралеобразную (рисунок 3.15а, тип 2). Однако, это принципиально не улучшает температурные и силовые условия трения в зоне деформации (контакта инструмента и заготовки). И наоборот, стружка сгенерированная при обработке методом РТМР относится к мелкодроблёной элементной (рисунок 3.15а, тип 3 и рис 3.15б) с размерами в основном до 1 мм. Это безусловно является положительным фактором с точки зрения повышения стойкости инструмента и качества обработки.

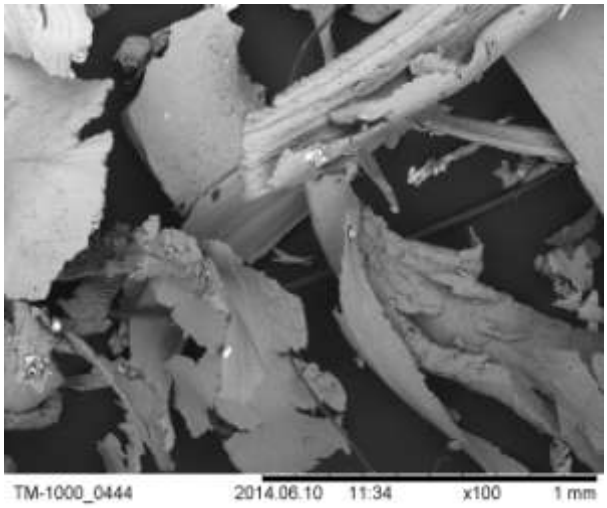


а) б)

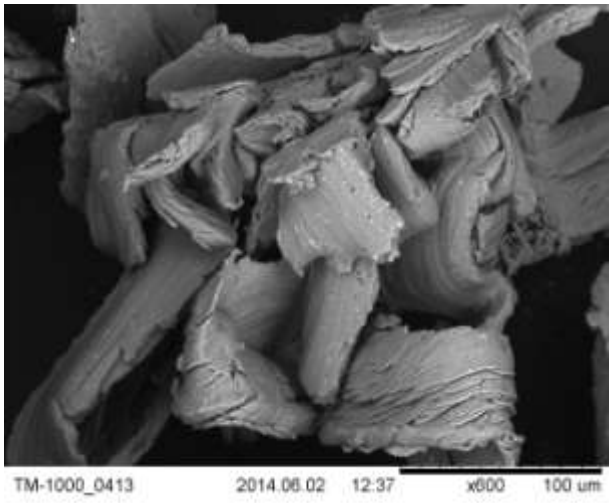
Рисунок 3.15 - Различные типы стружки при обработке алюминиевого сплава (Д16): а) – стружка, формирующаяся при обработке: проходным резцом без стружколомающей канавки (1), со стружколомающей канавкой (2), ротационным многогранным резцом (3); б) – стружка сформированная при РТМР.

Образование такого вида стружки не характерно для пластичных материалов (алюминиевых сплавов) при вершинной токарной обработке.

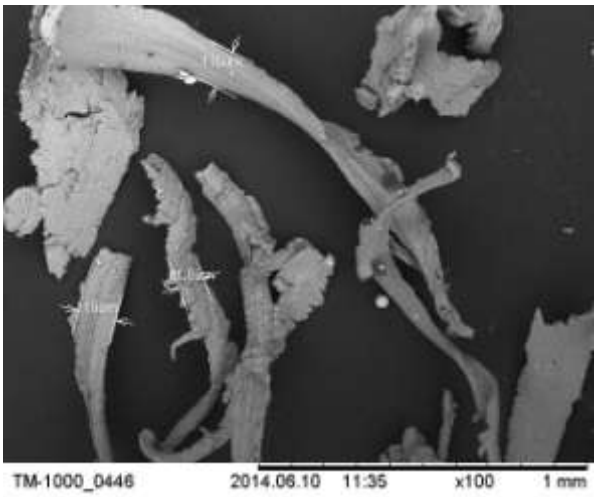
Причиной появления такой мелкодроблёной элементной стружки (рис 3.15б) является, по-видимому, дискретный характер процесса резания при РТМР. Изучение морфологии, структуры и размеров поперечного сечения стружки (рис 3,16 г, д, е) подтверждает высокую интенсивность сдвиговых деформаций при РТМР. Толщина слоев поверхностей сдвига изменяется в пределах 1 – 2 мкм (хотя они могут быть связаны в относительно устойчивые слои толщиной до 5 мкм).



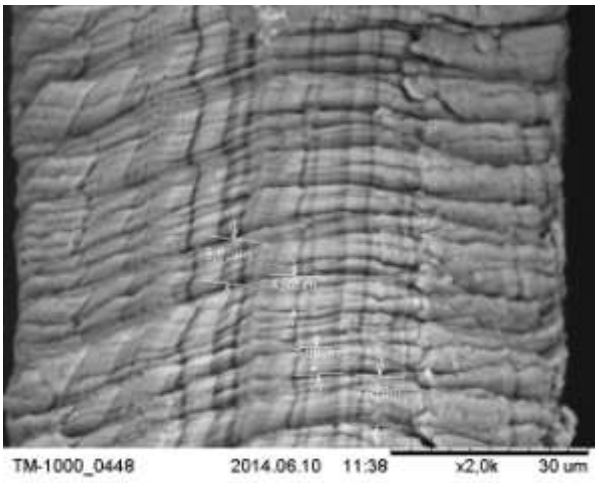
а)



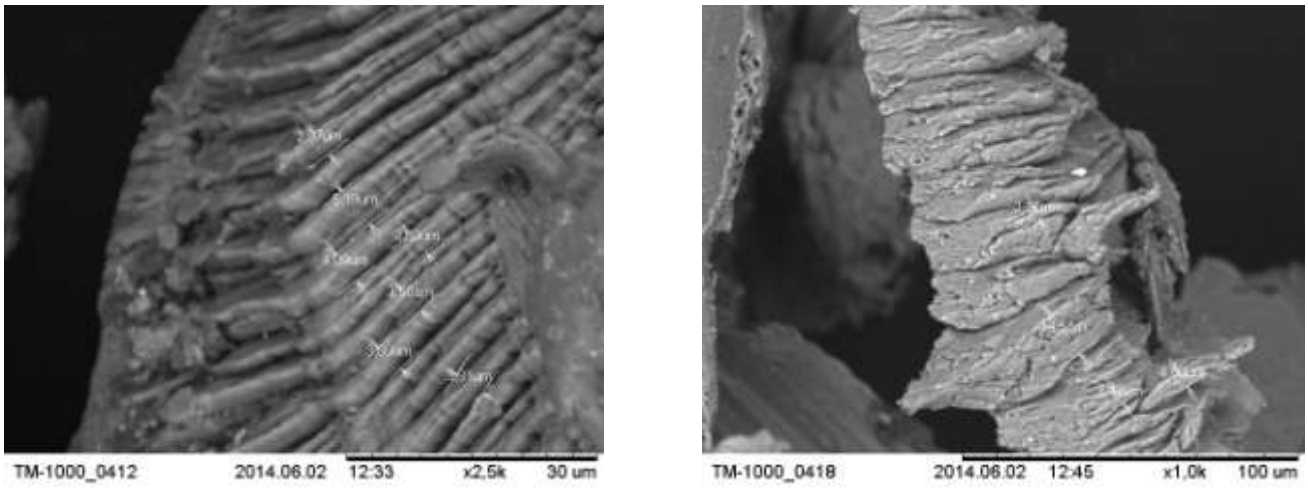
б)



в)



г)



д) е)

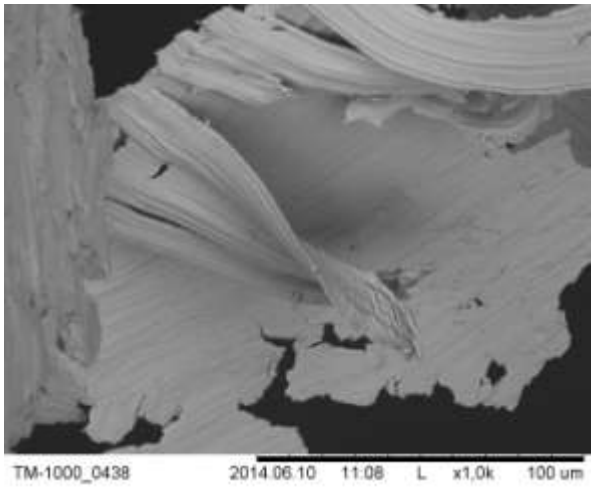
Рисунок 3.16 – Морфология стружек сформированных при РТМР алюминиевых сплавов: а, б, в) – изменения типа стружки получаемой на разных режимах резания; г, д, е) – следы поверхностей сдвига.

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$^{-1}$.

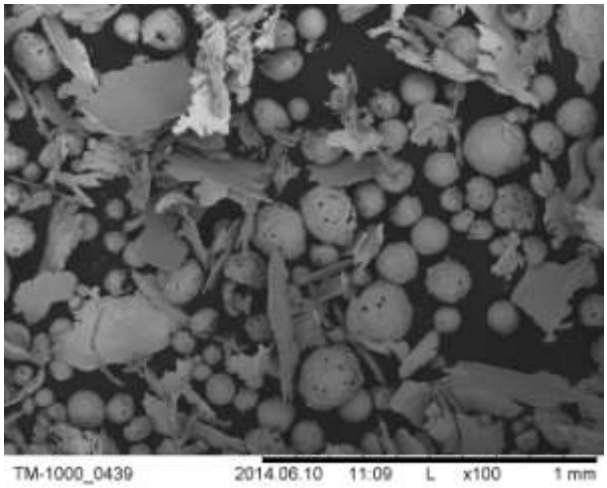
Еще более интересные результаты были получены при изучении морфологии стружки, полученной при обработке заготовок из конструкционной стали 45 (рисунок 3.17). Кроме элементной и мелкодроблёной стружки (с размерами элементов менее 1мм (рисунок 3.17 а)) наблюдаются аномальные образования в виде полых сфер диаметром от 100 до 300 мкм и толщиной стенки около 1…2 мкм (рисунок 3.17 б,в). Почти наверняка, это можно объяснить чрезвычайно высокими скоростями деформации сдвига при снятии слоя материала с заготовки, которые сопровождаются интенсивным выделением тепла, которое концентрируется в стружке (рисунок 3.18).

Поскольку (как было показано при теоретическом обосновании – разделы 2.1, 2.2) при РТМР появляются дополнительные кинематические касательные силы, отклоняющие срезаемый слой материала в сторону от оси вектора главного движения резания и передней поверхности режущего лезвия, то слой стружки начинает скручиваться в своеобразные витые кольца или полукольца. Но, поперечное сечение стружки сформированной при РТМР имеет несимметричный

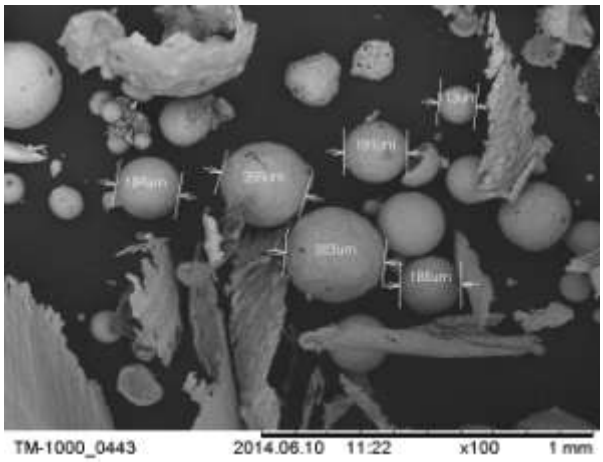
профиль (см. Рис. 2.15 раздел 2.4), поэтому происходит “схлапывание” разогретых до очень высоких, предплавильных температур “витых стружек – колец” в полую сферу.



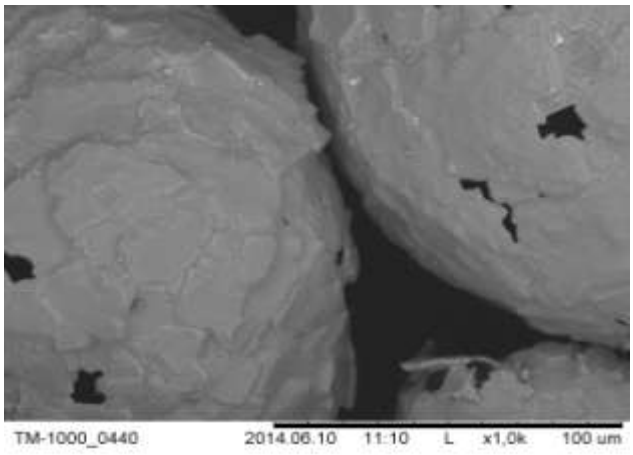
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.17 – Скручивание элементных стружек стали 45 при РТМР: а) элементная витая стружка; б, в, г) в виде полых сфер.

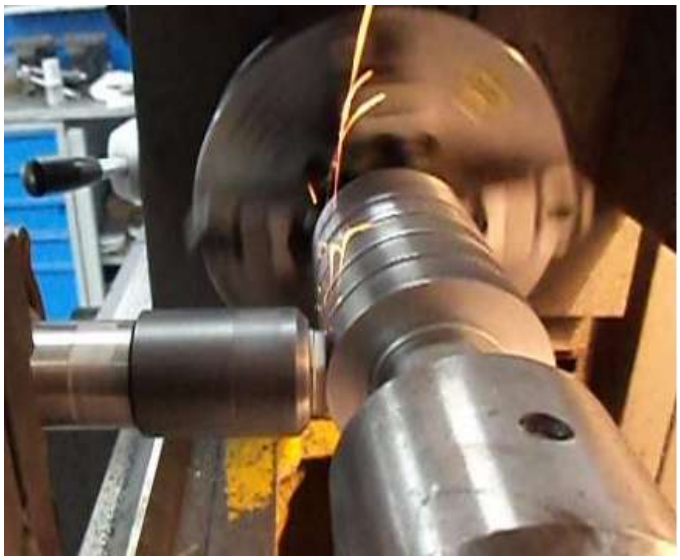


Рисунок 3.18 – Удаление разогретой дробленой стружки из зоны резания при РТМР

Конечно, эта стружка в виде полых сфер является непрочным образованием и легко разрушается при дроблении (размоле). Однако, этот факт не может считаться недостатком. В результате простого, не энергозатратного помола в обычных шаровых мельницах стружки в виде чешуйчатых сфер (рис. 3.17 г), образуется однородный по форме и распределению размеров частиц порошок (микронного размера), пригодный для дальнейшего использования в качестве товарного продукта, исходного сырья для технологий порошковой металлургии и композиционных материалов.

Изученные экспериментально особенности деформации срезаемого слоя материала заготовок при РТМР, в том числе формирование новых необычных типов структур стружек, свидетельствует о том, что процесс резания при РТМР происходит с очень высокой интенсивностью. Выделяемое тепло концентрируется в основном в материале стружки, мелкая дробленая и разогретая стружка быстро удаляется из зоны контакта. В результате обеспечиваются более благоприятные условия с точки зрения эксплуатационной стойкости инструмента и повышения качества обработки поверхности. Появляются перспективы более эффективного использования отходов процесса резания при РТМР в виде стружки. Мелкая дробленая стружка легко утилизируется и после несложной

дополнительной обработки посредством помола может быть использована в качестве товарного порошка в технологиях порошковой металлургии.

Морфология стружки, сгенерированной в процессе РТМР, убедительно подтверждает теоретические предположения о гарантированном дроблении и отводе стружки из зоны резания, вследствие особенностей кинематики метода РТМР и прерывистого характера резания.

3.4 Экспериментальная оценка температуры в зоне резания.

Изучение тепловых явлений в процессе резания представляет большой практический интерес, так как теплота, возникающая при обработке, оказывает влияние на износ и стойкость режущего инструмента, а также точность обработки [114 - 117]

В многочисленных отечественных и зарубежных исследованиях [117-118], направленных на изучение проблем повышения прочности и стойкости режущего инструмента, значительное внимание уделяется изучению тепловых явлений при резании, в том числе при ротационных видах точения. Общепризнанным является тот факт, что эффективным средством управления процессом теплообмена при лезвийной обработке является переход от схем непрерывного резания к прерывистому, кратковременному и периодическому резанию. Применение кинематических схем с прерывистым резанием позволяет снизить температуру в зоне резания, что благоприятно сказывается на повышении стойкости инструмента и производительности процесса обработки в целом.

Работоспособность (эксплуатационная стойкость) режущего инструмента во многом определяется температурными факторами, сопровождающими процесс лезвийной обработки металлов [119-121]. Применительно к методу ротационного точения многогранными резцами наиболее важным фактором является длительность контакта режущей кромки инструмента с обрабатываемым материалом.

Можно предположить, что вследствие касательного скручивающего движения режущей кромки в процессе срезания припуска с поверхности

заготовки, дискретного характера процесса резания при РТМР, формирования дробленной мелкой стружки в виде колец, полуколец, полых сфер и быстрого их удаления с поверхности заготовки температура в зоне резания должна быть ниже, чем при обработке методами вершинного точения. Дополнительному снижению температуры в зоне резания способствует прерывание контакта режущего лезвия с обрабатываемым материалом благодаря многогранности резца и особенностей кинематики процесса РТМР.

Для подтверждения перспективности метода РТМР, с этой точки зрения, были проведены более детальные исследования по распределению тепла между стружкой, инструментом и деталью бесконтактным методом с применением тепловизора модели testo 875-1. Диапазон измерения температуры прибором от -20 до 350 °С. Предел допустимой погрешности измерений: абсолютной ≤100 °С ±2 %; относительной >100 °С ±2%.

Для того чтобы установить связь между параметрами режимов резания и изменением температуры на поверхности инструмента детали и стружки проведена серия однофакторных экспериментов.

В качестве независимых переменных были приняты: $S_{пр_{ст}}$ продольная подача резца на оборот обрабатываемого вала - 0,25…1,2 мм/об; $S_{кр}$ круговая подача заготовки - 9,5…119 м/мин; $n_з$, число оборотов заготовки - 50…630 об/мин; $d_З$, диаметр заготовки - 60мм; V_p, скорость главного движения - 311…932 м/мин; n_p, число оборотов инструмента - 6000…18000 об/мин; t, глубина резания - 0,3…1,5 мм; N число граней профиля резца - 6.

Характеристика изменяемых параметров (режимов резания) по плану однофакторных экспериментов сведены в таблицу 4

Таблица 4 – Изменяемые параметры режимов резания

Номер сборки	Номер образца	Условия обработки						
		Sпр	$S_{кр}$		V_p		t	N
			$n_з$	$d_з$	n_p	ρ_{max}		
I	1	0,15	50	60	6000	8,25	0,2	6
	2	0,3						
	3	0,5						
	4	0,75						
	3	1,2						
II	1	0,3	50	60	6000	8,25	0,2	6
	2		100					
	3		200					
	4		315					
	5		630					
III	1	0,3	50	60	6000	8,25	0,2	6
	2				9000			
	3				12000			
	4				15000			
	5				18000			
IV	1	0,3	50	60	6000	8,25	0,3	6
	2						0,6	
	3						0,9	
	4						1,2	
	5						1,5	

Результаты измерений температуры в зоне резания бесконтактным методом в зависимости от изменения режимов резания *(t, $S_{пр}$, $S_{кр}$, V)* иллюстрируются в графиками и в виде фотографий с тепловизора (рисунках 3.19 – 3.22).

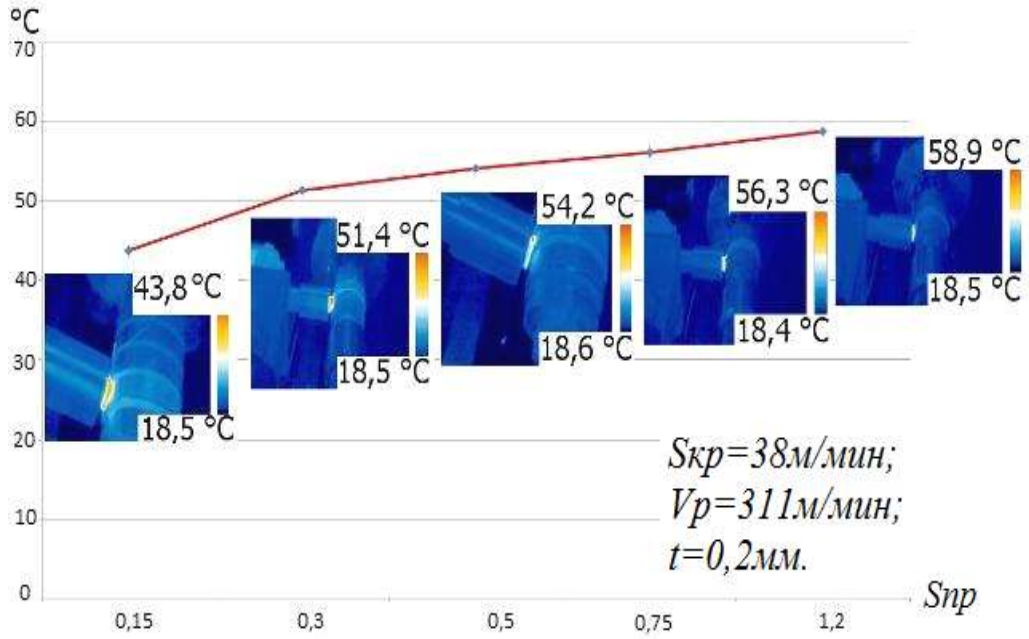


Рисунок 3.19 - Влияние продольной подачи $S_{пр}$
на температуру в зоне резания.

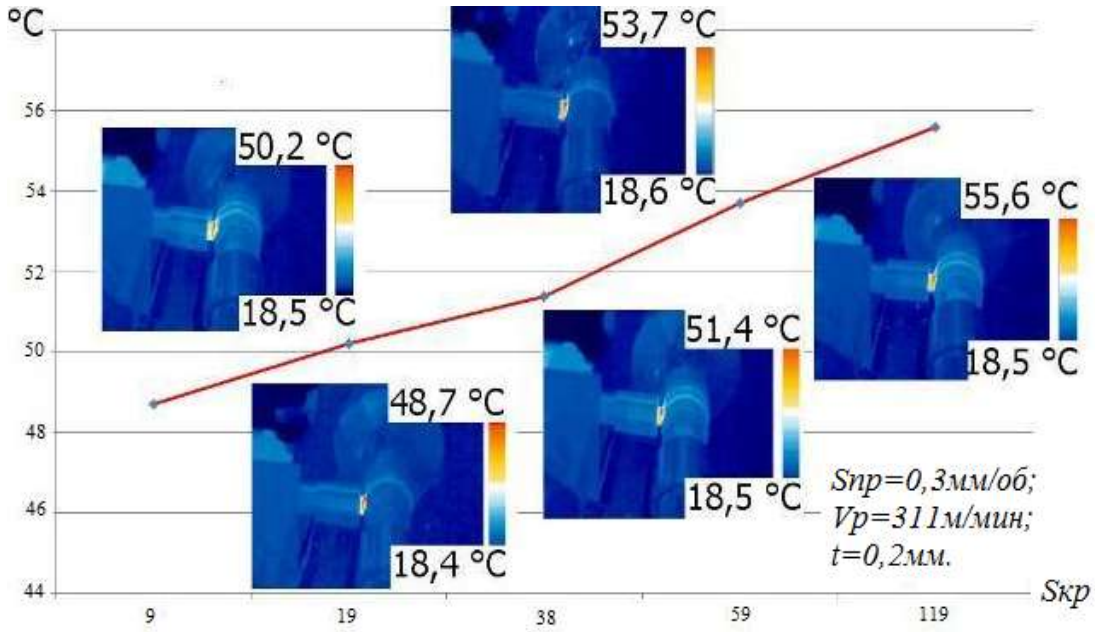


Рисунок 3.20 - Влияние круговой подачи $S_{кр}$
на температуру в зоне резания.

Результаты измерений показывают, что увеличение продольной и конструктивной подач не оказывают существенного влияния на температуру в зоне резания (рисунок 3.19, 3.20).

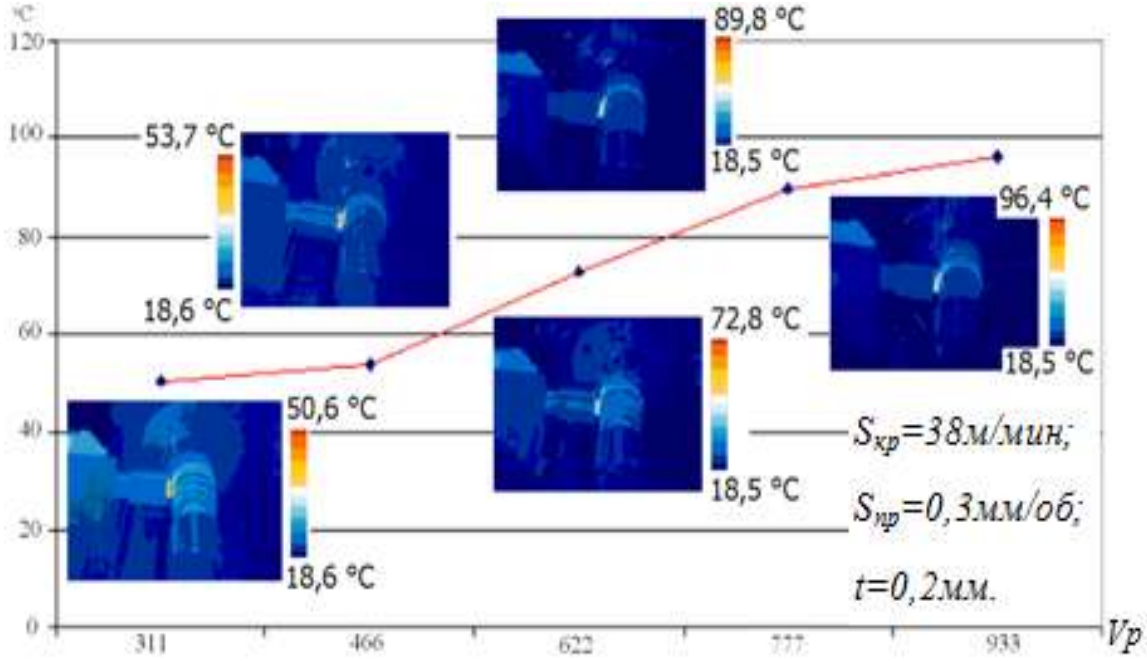


Рисунок 3.21 - Влияние скорости резания V_p
на температуру в зоне резания.

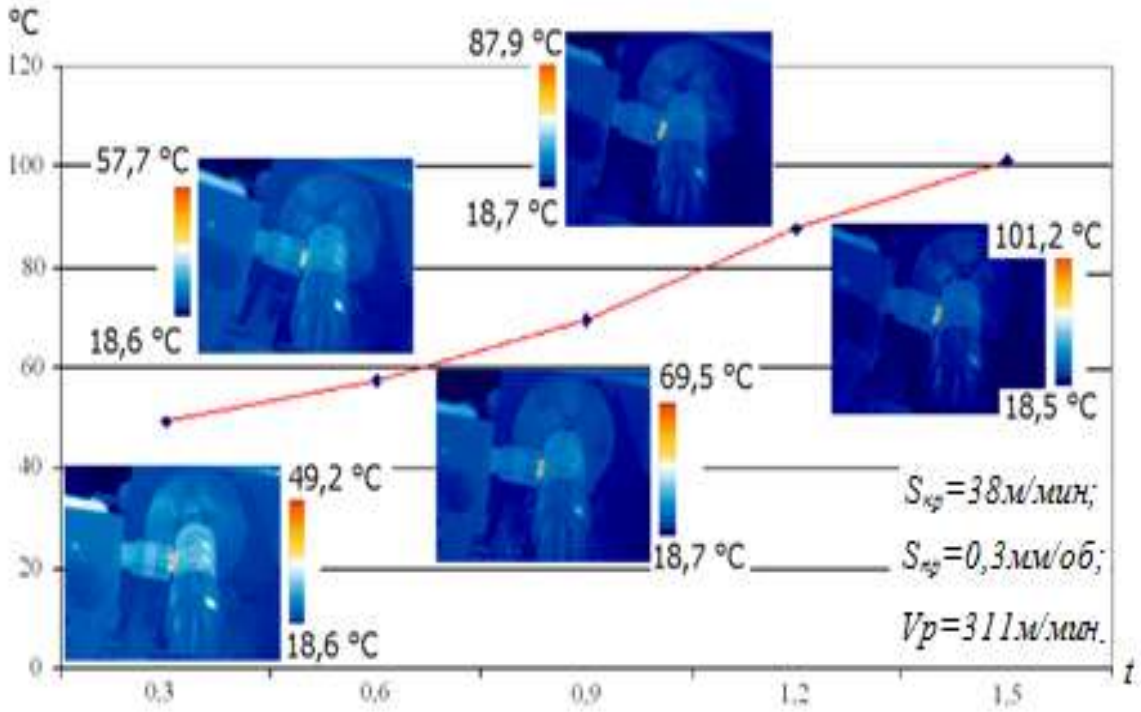


Рисунок 3.22 - Влияние глубины резания t
на температуру в зоне резания.

Несколько большее влияние на интегральную температуру в зоне резания оказывают глубина (рисунок 3.22) и скорости резания - температура увеличивается до 100°С (рисунок 3.21). Однако, во всех случаях температура не

превышает 120°С. Такие низкие значения температур в зоне резания можно считать ничтожно значимыми с точки зрения их влияния на работоспособность режущей части инструмента РТМР, вероятности появления диффузионных и адгезионных видов износа, а также негативного воздействия на обработанную поверхность.

Анализ экспериментальных данных, полученных при изучении характера тепловых полей на режущей кромке лезвия при его вращении показывает, что максимальная температура возникает при его врезании в заготовку, при выходе режущей кромки из зоны резания происходит снижение температуры поверхности инструмента. Компьютерная обработка теплограмм показывает, 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 ^{0}С, на выходе из нее 40 - 60°С. (рисунок 3.23). Несмотря на кратковременность процесса, поверхность инструмента успевает охлаждаться. Аналогичные, близкие по численным значениям температур данные получены другими исследователями [39, 50] при изучении температур в зоне резания по аналогичным методикам [50].

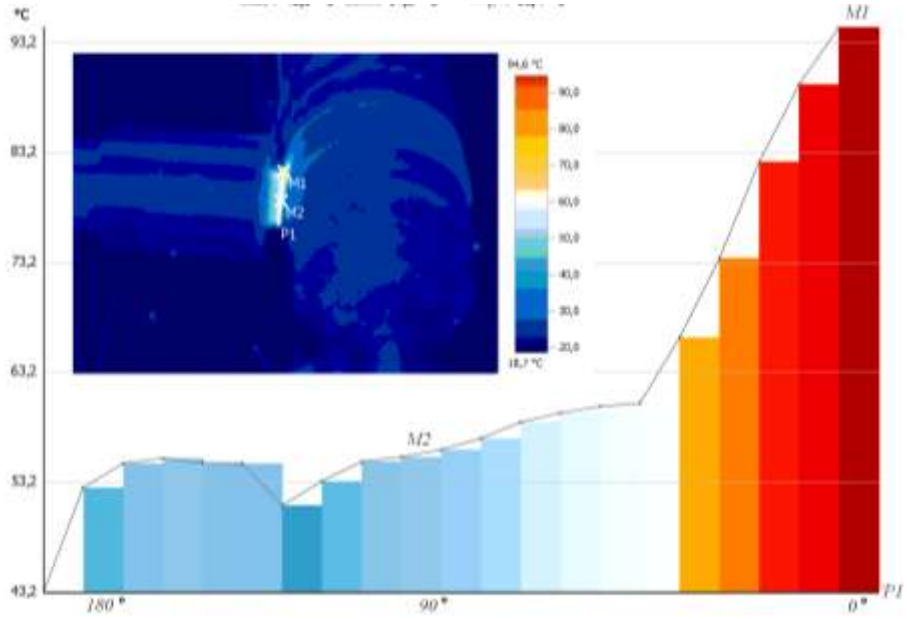


Рисунок 3.23 – Характер распределения температуры на поверхности инструмента (при повороте вершины лезвия на 180°)

Этот факт является безусловно положительным с точки зрения повышения стойкости режущих элементов ротационного резца. В процессе дополнительных

стойкостных испытаний инструмента было показано, что интегральная температура в зоне контакта поверхностей стружки, детали и инструмента (рисунок 3.23) стабилизируется и не превышает 120 ^{o}C вследствие прерывистости характера процесса резания и постоянного обновления участков режущей кромки.

Полученные данные достоверно показывают, что вследствие особенностей кинематики процесса РТМР и прерывистого дискретного характера резания количество тепла отводимого в инструмент и заготовку является ничтожно малым. Практически вся энергия, затраченная на деформацию и срезание слоя материала выделенная в виде тепла, сосредоточена в объеме стружки. Мелкая дробленая разогретая стружка быстро удаляется из зоны резания. Поверхности инструмента, заготовки практически не успевают разогреться. Таким образом, в процессе РТМР реализуется исключительно благоприятные температурные условия, когда даже при больших скоростях резания не происходит интенсивного теплового износа и ухудшения качества и дефектности поверхностного слоя детали.

3.5 Исследование силовых характеристик ротационного точения многогранными резцами.

3.5.1 Методика и аппаратура для определения силовых характеристик метода РТМР

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.

При определении силовых зависимостей P_z, P_x, P_y = f (t, $S_{пр}$, $S_{кр}$, $V_р$) как правило, используют методы однофакторных экспериментов [90, 122-124], 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, $S_{пр}$, $S_{кр}$, $V_р$. Зависимой переменной y является одна из сил P_z, P_x, P_y. Число наблюдений (дублей) выбиралось равным пяти, что соответствует уровню надежности 0,9 (доверительной вероятности) [90, 122-124]. 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 $y=Cx^{\kappa}$, которая представляет из себя прямую линию [98, 99, 125, 126] при построении в декартовых координатах с функциональными логарифмическими шкалами. Определение численного значения показателя степени κ и постоянной C производилось аналитически при помощи программного продукта Microsoft Excel.

Максимальную величину продольной и конструктивной подачи следует ограничить условиями сохранения высокой производительности и требуемого качества обрабатываемой поверхности. Исходя из анализа параметров шероховатости (раздел 3.2), продольная подача соответствует значению $S_{пр}$ =1 мм/об. Значения продольной подачи при проведении эксперимента устанавливались настройкой коробки подач станка, а круговая подача соответствующей настройкой коробки скоростей. По условиям эксперимента глубина резания при РТМР была ограничена значениями t=0,1…0,9 мм. Изменение толщины срезаемого слоя происходит от 0 до t в пределах поворота одной грани резца. Скорость вращения инструмента изменялась в диапазоне от 6000 до 18000 оборотов электрошпинделя путем изменения частоты питающего напряжения посредством частотного преобразователя Альтивар 31.

При проведении экспериментальных исследований, направленных на определение составляющих силы резания P_z, P_x, P_y, использовались дополнительно заточенные сменные шестигранные твердосплавные пластины HNGX 0906ANSN-F (Pramet) материал Т15К6 и ВК6ОМ (рис. 3.24).

Значения инструментального переднего угла по условиям чистовой обработки $\gamma_и$=4º. В разделе 2.2 диссертационной работы было установлено, что величина статического заднего угла (α_c) может в динамике принимать значения близкие к 0, что недопустимо для механической обработки резанием. Увеличение инструментального заднего угла уменьшает вероятность возникновения затирания обработанной поверхности [90]. Поэтому, исходя из предельных значений принятых диапазонов глубины резания и подачи (s=0,2-1 мм/об, t=0,1-0,9мм), назначенных в соответствии с кинематикой процесса РТМР, было выбрано значение заднего угла $\alpha_и$=12,5º (рис. 3.25).

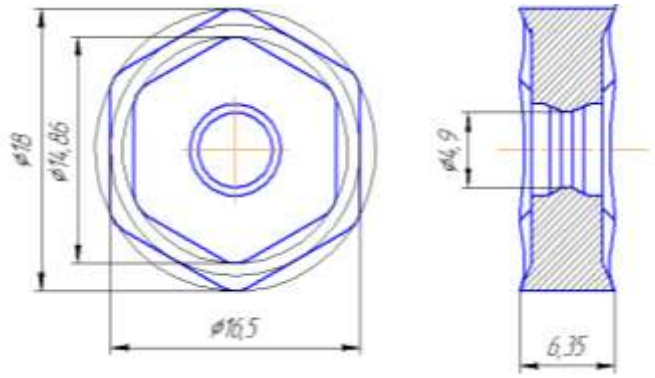
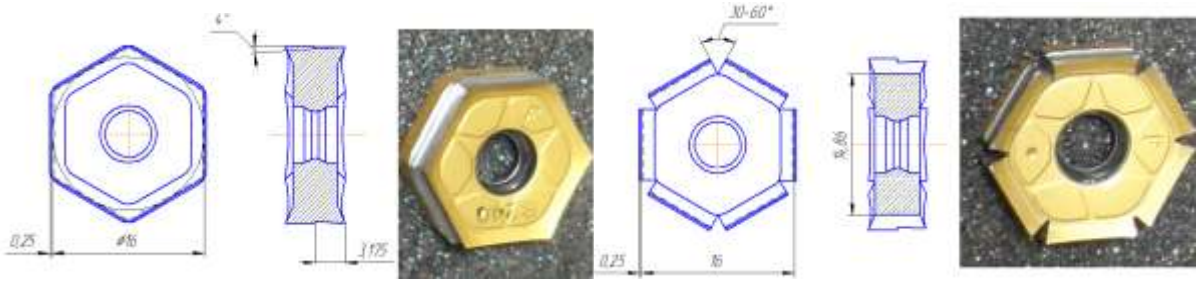


Рисунок 3.24 – Стандартная твердосплавная пластина



а б

Рисунок 3.25 – Инструментальные пластины для РТМР: а – со специальной заточкой; б – пластина с подточкой канавок на вершинах резца.

Испытания проводились на кольцевых образцах, установленных на оправку (рис. 3.26).

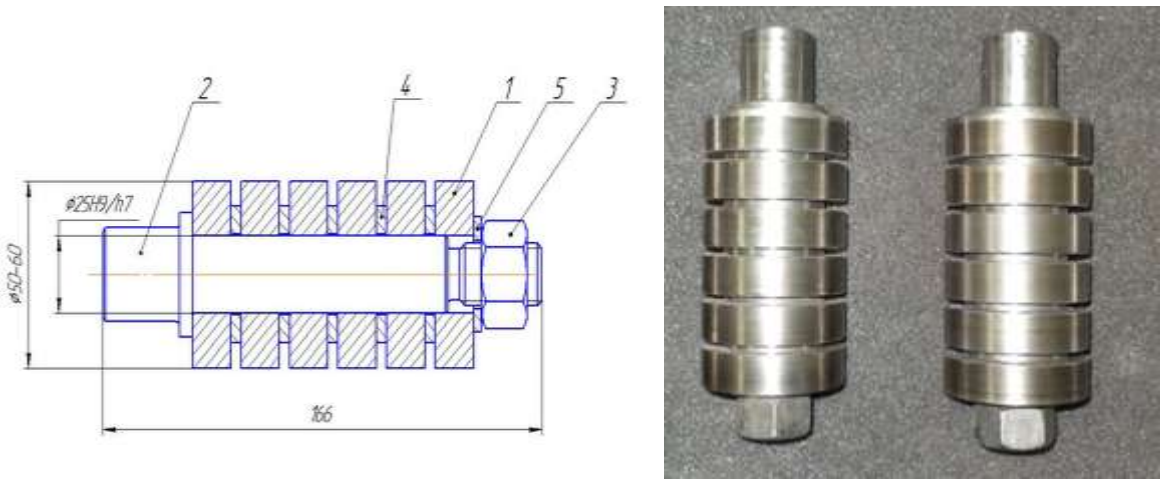


Рисунок 3.26 – Оправка с экспериментальными образцами в сборе

Инструментальный измерительный узел (рис 3.27) монтируется в резцедержатель токарно-винторезного станка 16К20Ф1 и состоит из электрошпинделя, кронштейна, динамометра, оправки, специально переточенных многогранных твердосплавных пластин и частотного преобразователя Альтивар 31.

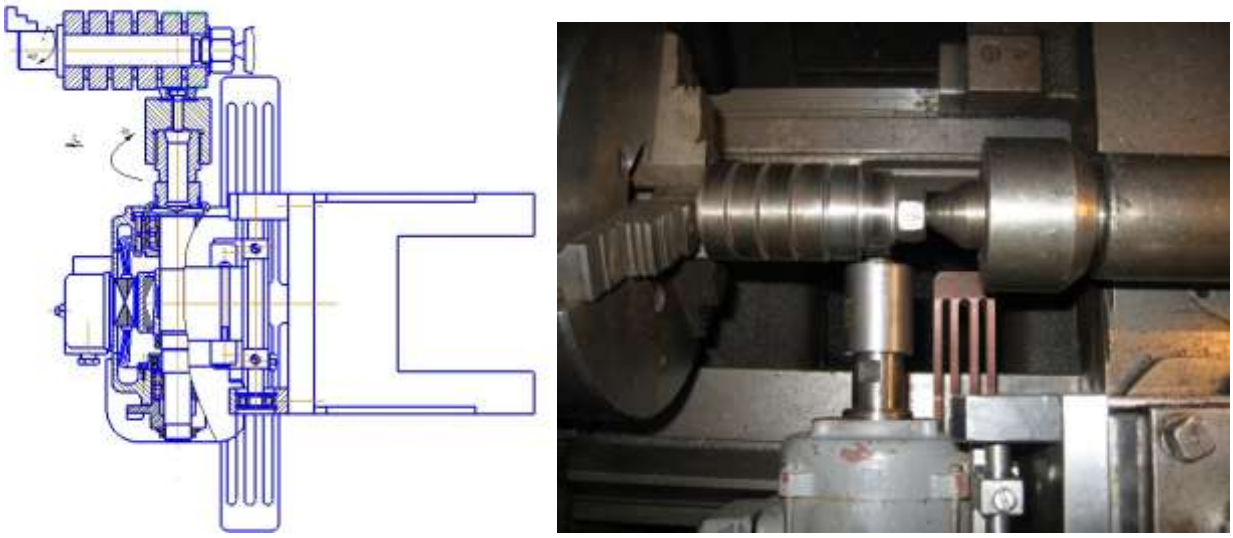


Рисунок 3.27 – Конструкция и схема наладки измерительного инструментального узла.

Кронштейн выполнен в виде шарнира с замыкающим звеном в качестве, которого используют механический динамометр, что позволяет рассматривать данную конструкцию как двухопорную балку (рис. 3.28). Одна часть кронштейна устанавливается в резцедержатель токарно-винторезного станка 16К20Ф1, с другой стороны на кронштейн устанавливается электрошпиндель. На выходном

валу электрошпинделя монтируется оправка с многогранным ротационным резцом. Отклонения от перпендикулярного расположения оси электрошпинделя инструментального узла относительно заготовки не превышают 0,02мм на длине 100мм. Предварительно, на стадии отработки методики измерений в соответствии со схемой и конструктивным исполнением инструментального узла, были определены нагрузочные расчетные формулы и проведена тарировка в координатах “нагрузка – деформация”.

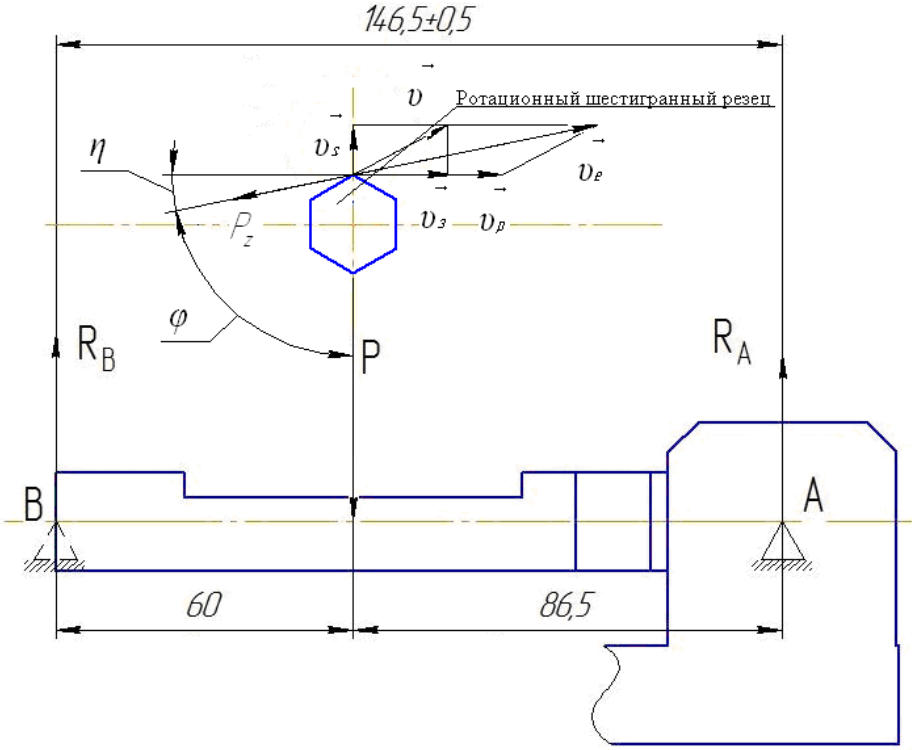


Рисунок 3.28 – Расчетная схема системы сил измерительного узла.

На основании разработанной схемы инструментального узла (рис. 3.28) можно рассчитать основные динамические и кинематические параметры, которые в дальнейшем будут использованы при проведении однофакторных экспериментов.

Главная составляющая силы резания находится по формуле:

$$P_z = \frac{P}{\cos\varphi}; \tag{104}$$

где P – сила действующая на плиту.

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

$$\begin{cases} R_B = \dfrac{86,5P}{146,5} = 0,59P \\ R_A = \dfrac{60P}{146,5} = 0,41P \end{cases} \Rightarrow R_B = 0,59P \Rightarrow P = \frac{R_B}{0,59}; \quad (105)$$

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

$$\varphi = 90^0 - \eta; \quad (106)$$

Реакция окружной силы создает момент сопротивления резанию, называемый крутящим моментом резания:

$$M_{кр} = \frac{P_z \cdot \rho_{\max}}{1000}; \quad (107)$$

Эффективная мощность привода инструментального узла определяется по формуле:

$$N_e = \frac{P_z \cdot \upsilon_p}{6120}; \quad (108)$$

По результатам тарировки (рисунок 3.29) получена зависимость цены деления динамометра от нагрузки, которая описывается уравнением: $y = 1,3216x + 0,8134$.

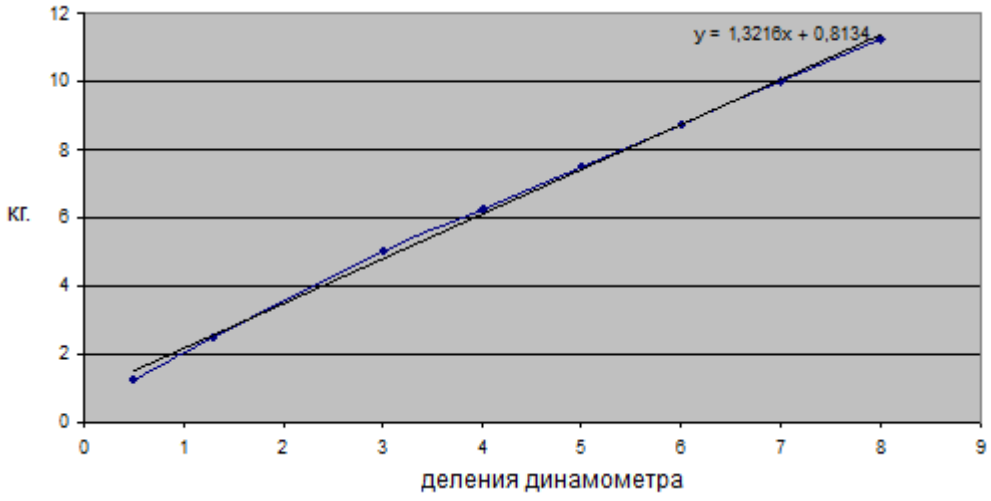


Рисунок 3.29 – Тарировочный график для определения сил резания.

3.5.2 Экспериментальное определение составляющих сил резания при РТМР

Теоретическими исследованиями процесса ротационного точения многогранными резцами было установлено, что основными параметрами, влияющими на толщину и форму срезаемого слоя являются: глубина резания – t, скорость резания $V_р$, диаметр обрабатываемой заготовки – D, угол наклона лезвия – λ, продольная подача – $S_{пр}$, круговая подача – $S_{кр}$.

Практика применения обобщенных формул показала, что основные режимы резания: глубина, подача, скорость наиболее удобно учитывать непосредственно, а остальные параметры косвенно (через поправочные силовые коэффициенты) [90, 125-130].

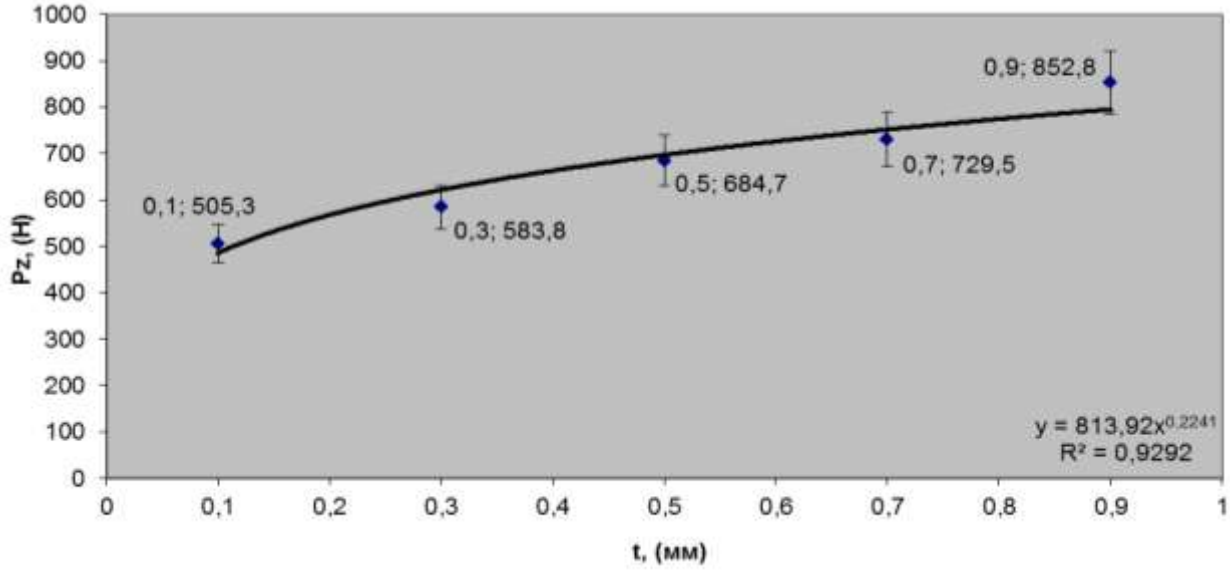
Для того чтобы установить связь между одним из параметров режимов резания и зависимой переменной составляющих сил резания проводились серии однофакторных экспериментов. При этом в качестве независимых переменных были приняты: $S_{пр_{ст}}$, продольная подача резца на оборот обрабатываемого вала - 0,2…1,0 мм/об; $S_{кр}$ круговая подача заготовки от 60…188 м/мин; $n_з$, число оборотов заготовки - 315…1000 об/мин; $d_з$, диаметр заготовки - 60мм; $V_р$, скорость главного движения от 310 до 933 м/мин; $n_р$, число оборотов инструмента - 6000…18000 об/мин; t, глубина резания - 0,1…0,9 мм; N, число граней профиля резца - 6.

Величина угла наклона λ режущей кромки резца в процессе резания будет изменяться автоматически. Результаты измерений силовых характеристик представлены в таблице 5

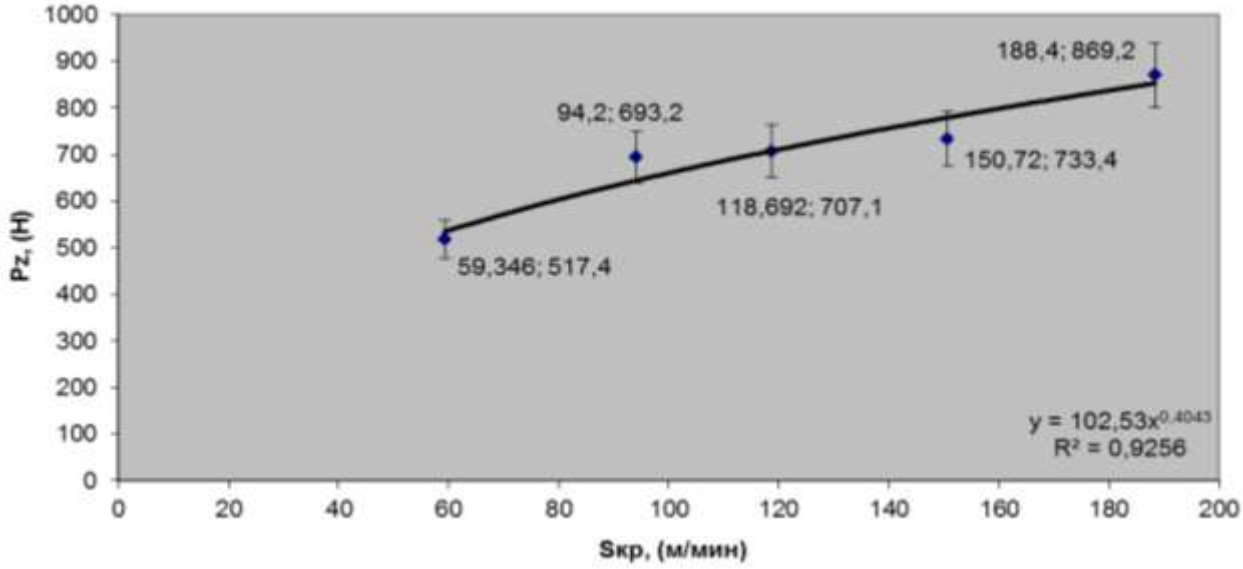
Таблица 5 – Влияние параметров режимов резания на составляющие сил резания.

Номер сборки	Номер образца	Условия обработки							Выходные параметры шероховатости				
		Sпр	$S_{кр}$		V_p		t	N	P, H эксп	P_z, H эксп.	P_y, H расч	$M, H \cdot м$ расч	N_e, кВт расч
			$n_з$	$d_З$	n_p	ρ_{max}							
I	1	0,2	630	60	6000	8,25	0,3	6	201,9	505,3	252,7	4,17	0,026
	2	0,4	118,7		310,86				210,9	527,8	263,9	4,35	0,027
	3	0,6							228,8	572,6	286,3	4,72	0,029
	4	0,8							246,7	617,4	308,7	5,094	0,031
	5	1							255,7	639,9	319,9	5,28	0,033
II	1	0,4	315	60	6000	8,25	0,3	6	103,4	517,4	258,7	4,27	0,026
	2		500		310,86				219,9	693,2	346,6	5,72	0,035
	3		630						282,6	707,1	353,6	5,83	0,036
	4		800						372,2	733,4	366,7	6,05	0,037
	5		1000						551,4	869,7	434,6	7,17	0,044
III	1	0,4	630	60	18000	8,25	0,3	6	72,03	540,7	270,3	4,46	0,082
	2		118,7		15000				94,43	590,7	295,4	4,87	0,075
	3				12000				121,3	607,1	303,5	5,01	0,062
	4				9000				179,5	673,9	337,0	5,56	0,051
	5				6000				282,6	707,1	353,6	5,83	0,036
IV	1	0,4	630	60	6000	8,25	0,1	6	202	505,3	252,7	4,17	0,026
	2		118,7		310,86		0,3		233,3	583,8	291,9	4,82	0,03
	3						0,5		273,6	684,7	342,3	5,65	0,035
	4						0,7		291,6	729,5	364,8	6,02	0,037
	5						0,9		340,8	852,8	426,4	7,04	0,043

Как было показано в теоретической части диссертации, при увеличении глубины резания t и круговой подачи $S_{кр}$ растет площадь сечения срезаемого слоя, что приводит к увеличению всех составляющих сил резания. Результаты экспериментальных исследований показывают, что глубина резания на составляющие силы резания оказывает несколько большее влияние, нежели круговая подача (рисунок 3.30).



а)

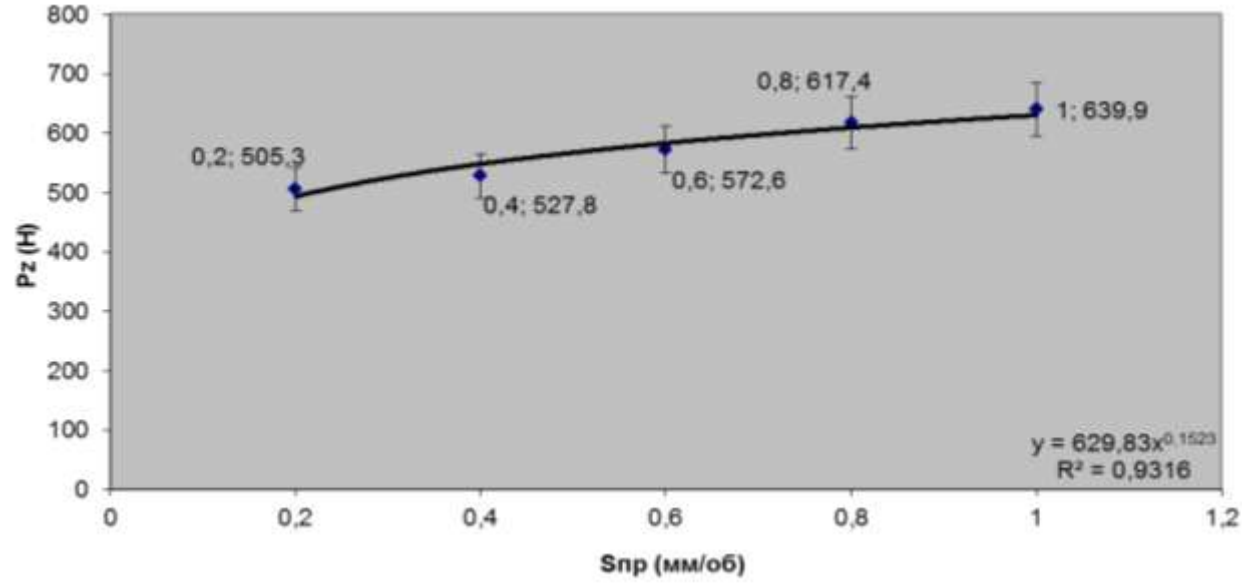


б)

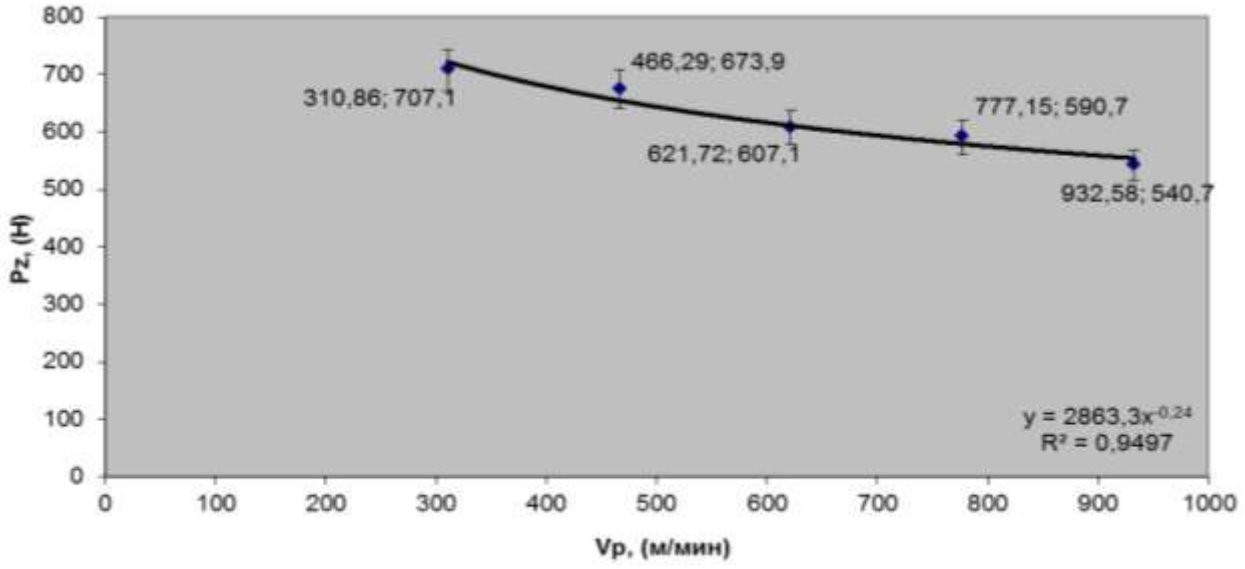
Рисунок 3.30 – Изменение главной составляющей силы резания *Pz* в зависимости от режимов резания: а) глубина резания t, б) круговая подача $S_{кр}$.

Характер полученных зависимостей свидетельствует о том, что с увеличением глубины резания, продольной и круговой подач, главная составляющая силы резания P_z увеличивается. Это объясняется увеличением толщины срезаемого слоя, рабочей длины режущей кромки и повышенной скоростью резания при увеличении количества оборотов резца.

Влияние скорости резания и продольной подачи на изменение величины силы резания в графической форме представлено на рисунке 3.31.



а)



б)

Рисунок 3.31 – Изменение главной составляющей силы резания Pz в зависимости от режимов резания: а) продольная подача $S_{i\partial}$, б) скорость резания V_p.

В теоретической части работы было показано, что составляющие силы резания в процессе РТМР изменяются по величине и направлению. Расчеты показывают, что сила резания должна быть максимальной при врезании резца в заготовку на участке лезвия находящимся на линии оси центров, так как нормальная составляющая силы N будет максимальной (вследствие наибольших значений толщины и ширины срезаемого слоя).

Полученные при проведении частных независимых экспериментов численные значения усилий резания явились основанием для построения графиков, которые отражают характер влияния отдельных параметров режимов резания на главную составляющею силы резания при РТМР. В результате серии частных независимых экспериментов получены следующие зависимости, отражающие функциональные взаимосвязи между усилиями и режимами резания при РТМР:

$$\begin{aligned} P_z &= C_{S_{пр}} \cdot S_{пр}^{\kappa_{Sпр}} = 629,83 \cdot S_{пр}^{0,1523}; \\ P_z &= C_{S_{кр}} \cdot S_{кр}^{\kappa_{Sкр}} = 102,53 \cdot S_{кр}^{0,4043}; \\ P_z &= C_{V_p} \cdot V_p^{\kappa_{Vp}} = 2863,3 \cdot V_p^{-0,2402}; \\ P_z &= C_t \cdot t^{\kappa_t} = 813,92 \cdot t^{0,2241}. \end{aligned} \tag{109}$$

Для получения обобщающей расчетной зависимости, необходимо частные зависимости объединить:

$$P_z = C_{S_{пр}S_{кр}V_p t} \cdot S_{пр}^{\kappa_{Sпр}} \cdot S_{кр}^{\kappa_{Sкр}} \cdot V_p^{\kappa_{Vp}} \cdot t^{\kappa_t} = C_{S_{пр}S_{кр}V_p t} \cdot \frac{S_{пр}^{0,1523} \cdot S_{кр}^{0,4043} \cdot t^{0,2241}}{V_p^{0,2402}}; \tag{110}$$

Для определения численного значения величины общей постоянной $C_{S_{пр}S_{кр}V_p t}$, производятся промежуточные вычисления:

$$\begin{aligned} C_{1S_{пр}S_{кр}V_p t} &= \frac{C_{S_{пр}} \cdot V_{pconst}^{0,2402}}{S_{кр_{const}}^{0,4043} \cdot t_{const}^{0,2241}} = \frac{629,83 \cdot 310,86^{0,2402}}{118,695^{0,4043} \cdot 0,3^{0,2241}} = 474,7025; \\ C_{2S_{пр}S_{кр}V_p t} &= \frac{C_{S_{кр}} \cdot V_{pconst}^{0,2402}}{S_{пр_{const}}^{0,1523} \cdot t_{const}^{0,2241}} = \frac{102,53 \cdot 310,86^{0,2402}}{0,4^{0,1523} \cdot 0,3^{0,2241}} = 612,8419; \\ C_{3S_{пр}S_{кр}V_p t} &= \frac{C_{V_p}}{S_{кр_{const}}^{0,4043} \cdot S_{пр_{const}}^{0,1523} \cdot t_{const}^{0,2241}} = \frac{2863,3}{118,695^{0,4043} \cdot 0,4^{0,1523} \cdot 0,3^{0,2241}} = 625,1111; \\ C_{4S_{пр}S_{кр}V_p t} &= \frac{C_t \cdot V_{pconst}^{0,2402}}{S_{кр_{const}}^{0,4043} \cdot S_{пр_{const}}^{0,1523}} = \frac{813,92 \cdot 310,86^{0,2402}}{118,695^{0,4043} \cdot 0,4^{0,1523}} = 935,8107; \end{aligned} \tag{111}$$

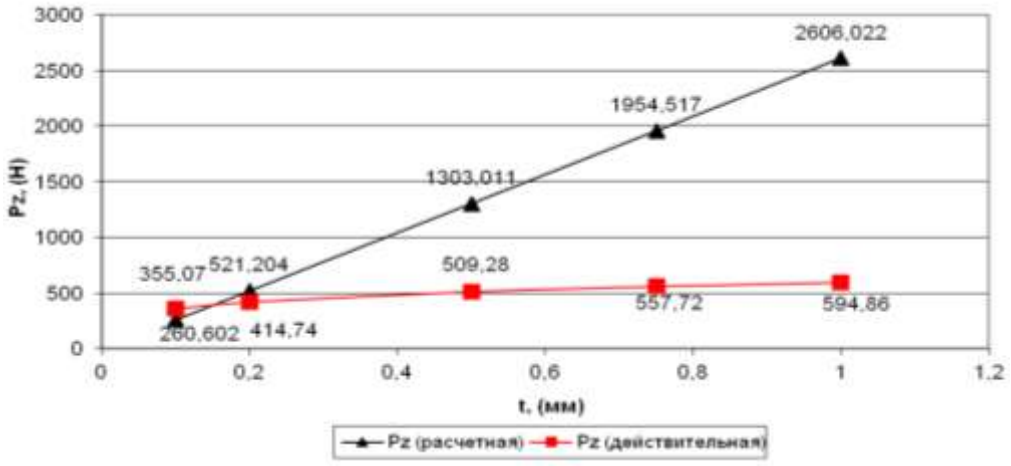
Окончательное, итоговое значение постоянной принимается как среднее арифметическое всех четырех значений:

$$\begin{aligned} C_{1S_{пр}S_{кр}V_p t} &= \frac{C_{1S_{пр}S_{кр}V_p t} + C_{2S_{пр}S_{кр}V_p t} + C_{3S_{пр}S_{кр}V_p t} + C_{4S_{пр}S_{кр}V_p t}}{4} = \\ &= \frac{474,7025 + 612,8419 + 625,1111 + 935,8107}{4} = 662,1165; \end{aligned} \tag{112}$$

В обобщенной формуле для расчета силы резания P_z, учитываются все значимые факторы процесса резания:

$$P_z = C_{S_{пр} S_{кр} V_p t} \cdot \frac{S_{пр}^{0,1523} \cdot S_{кр}^{0,4043} \cdot t^{0,2241}}{V_p^{0,2402}} = 662,12 \cdot \frac{S_{пр}^{0,1523} \cdot S_{кр}^{0,4043} \cdot t^{0,2241}}{V_p^{0,2402}}; \quad (113)$$

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить характер влияния режимов резания при РТМР на главную составляющею силы резания P_z.



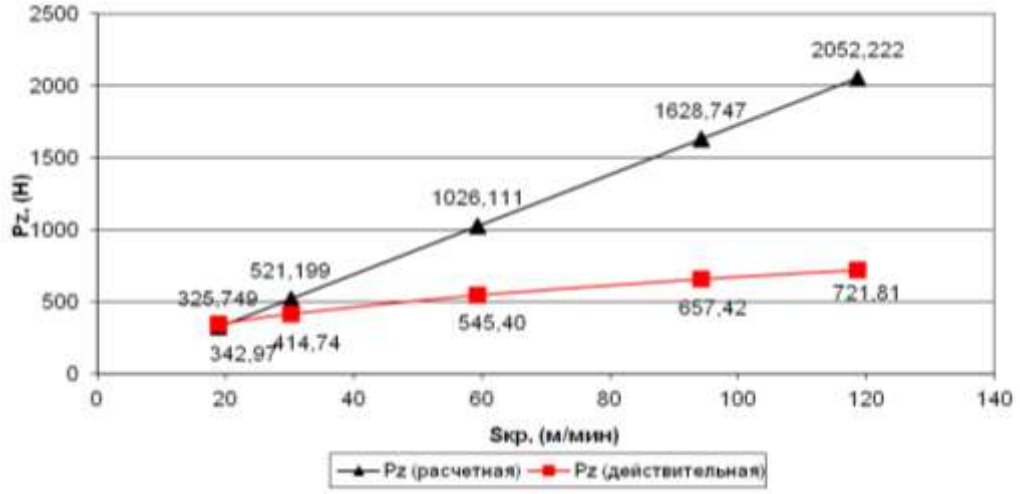
а)

б)

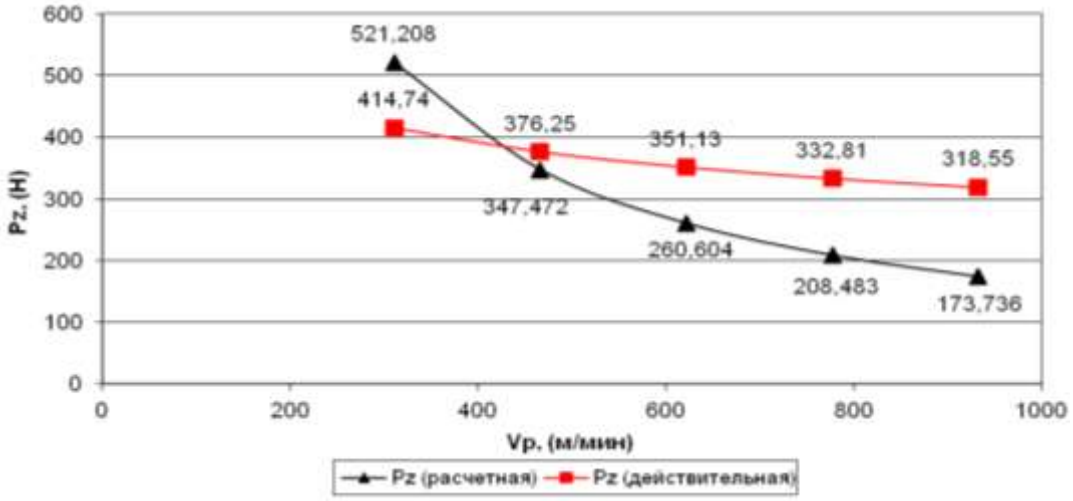
Рисунок 3.32 – Влияние режимов резания на главную составляющую силы резания: а) глубина резания t, б) продольная подача $S_{ïð}$.

Полученные экспериментально численные значения главной составляющей силы резания, приведенные в графической форме на рисунке 3.32, 3.33 имеют большую величину в сравнении с расчетными данными по модели. Наблюдаемое расхождения (различия) в численных значениях с увеличением параметров

режимов резания объясняются, по-видимому, ужесточением условий в контактной зоне, сложным характером кинематики при РТМР, наложением разных деформационных процессов, их высокой интенсивностью, изменением свойств материала заготовки и срезаемого слоя стружки под действием сил трения, разогревом материала и т.д.



а)



б)

Рисунок 3.33 – Влияние режимов резания на главную составляющую силы резания: а) круговая подача $S_{кр}$ б) скорость резания V_p

Влияние всех факторов действующих в зоне резания на главную составляющую силы резания теоретически оценить невозможно. Поэтому, как это принято в отечественной и зарубежной практике расчета, проектирования и оптимизации технологических режимов резания [67, 68], необходимо произвести

уточнение расчетных формул для определения усилий резания, а значит и других расчетных выражений с помощью эмпирического коэффициента. Его численные значения для разных условий резания, материалов заготовки, инструмента и других факторов могут изменяться от 2,5 до 3,5 (по данным фирмы Sandvik Coromant и [67]) . Коэффициент резания *Kp* для метода РТМР полученный на основании обработки экспериментальных данных при точении стали 45 будет равен 5.

Таким образом, полученные полуэмпирические зависимости для определения усилий резания при РТМР позволяют устанавливать рациональные режимы резания для обеспечения максимальной производительности процесса, без снижения качества обработанной поверхности (превышение допускаемых усилий резания влечет за собой увеличение значений шероховатости)

3.6 Изучение возможностей повышения эффективности метода РТМР за счет использования новых марок твердосплавных материалов.

Как было показано экспериментальными исследованиями (основные результаты которых приведены выше), метод РТМР не усложняет условия процесса резания с точки зрения теплового, температурного воздействия на инструмент. Высокие скорости резания и постоянное обновление участков режущей кромки, дискретность деформационных процессов многогранным инструментом в сочетании с возникающими дополнительными касательными силами способствует интенсивному дроблению стружки и ее быстрому удалению из зоны контакта поверхностей “инструмент - заготовка”. Поверхности инструмента и детали не успевают разогреваться (< 120°С), практически все тепловые потоки концентрируются в объеме мелкодроблёной стружки. Как результат, несмотря на повышенные скорости резания при РТМР, режущие кромки инструмента не подвержены диффузионному и адгезионному износу характерному для высоких температур резания (с большими значениями сил трения по контактной поверхности). Однако, многолезвийность процесса РТМР

приводит к тому, что каждая из кромок и вершин многогранной твердосплавной пластины при периодическом циклическом врезании в тело заготовки воспринимает микроударные знакопеременные нагрузки (см. раздел 3.3). Эта кинематическая особенность РТМР предъявляет дополнительные требования к материалу инструмента по параметрам ударной вязкости и трещиностойкости.

Поэтому в экспериментальной части работы было уделено внимание также и такому важному фактору, как повышение качества твердосплавных материалов для инструмента РТМР, который оказывает существенное влияние на его надежность и эксплуатационную стойкость.

Физико-химические и эксплуатационные свойства твердых сплавов (в том числе трещиностойкость и ударная вязкость) определяются прочностью карбидной составляющей, связующей фазы и прочностью сцепления между ними. Анализ современных представлений о взаимосвязи микроструктуры и эксплуатационных свойств этих материалов показывает возможность их дисперсного упрочнения за счет введения керамических частиц (наноразмерных оксидов) в прослойку связующего [130-133].

Одним из технических решений, которое было предложено в процессе исследований, является модифицирование базовых твердых сплавов наноразмерными частицами керамики (например Al_2O_3, ZrO_2). Распределяясь по объему кобальтового связующего, наночастицы способствуют дисперсному упрочнению связки и, как результат, сплава в целом [132, 133]. Дополнительным положительным эффектом введения наноразмерных частиц в структуру, является то, что они тормозят процессы роста зерна карбидной фазы, рекристаллизации по механизму массопереноса через кобальтовою прослойку, препятствуют образованию слабых межкарбидных связей WC-WC, что также обеспечивает прирост прочности. Механизмы воздействия наноразмерных частиц на параметры микроструктуры твердых сплавов и реальные, подтвержденные на практике возможности повышения прочности, трещиностойкости и эксплуатационной стойкости за счет модифицирования добавками нанопорошков подробно описаны в работах [130].

В процессе выполнения исследований разработаны новые составы и способ предварительной подготовки порошков с целью повышения эффективности модифицирования твердосплавных композитов, обеспечения статистической однородности распределения наноструктурированных фрагментов по объему кобальтовой связки [130]. На образцах твердосплавных материалов модифицированных наночастицами измерялись следующие физико-механические характеристики: твердость по Виккерсу и коэффициент трещиностойкости (K_{1C}) по методу Палмквиста на микротвердомере ТП-7Р-1 путем измерения длины трещины, распространяющейся от угла отпечатка пирамидки Виккерса (нагружение при испытании 100, 200, и 300 Н) по ISO/DIS 28079;

Величину коэффициента интенсивности напряжений K_{1C} (или коэффициента трещиностойкости) можно определять при макроскопическом силовом нагружении и в условиях микроиндентирования. Эти способы не столько конкурируют друг с другом, сколько дополняют: для последнего метода характерна меньшая подверженность влиянию структурной неоднородности, так как длина трещины от угла отпечатка индентора существенно меньше длины трещины, приводящей к разрушению образца. Этот метод оценки вязкости разрушения материала можно применять не только на специальных образцах, но и на готовых твердосплавных пластинах. Расчет экспериментальных значений K_{1C} проводился по формуле:

$$K_{1c} = 0{,}016 \cdot (E/HV)^{1/2} \cdot F/l^{1/2}, \qquad (114)$$

где E - модуль упругости сплава; HV - микротвердость; F - нагрузка ндентирования; l - длина трещины от центра отпечатка.

Результаты расчета экспериментальных значений K_{1C} и трещиностойкости q, приведены в таблице 6 и на рисунке 3.34.

Таблица 6 - Вязкость разрушения твердых сплавов ВК8 (базового и с добавками наночастиц)

Состав	a, мкм	C,мкм	l,мкм	c/a	$K=P/C^{3/2}$	q=P/l	E/H	K_{1C}, МПа·м$^{1/2}$
1.ВК 8	99	132	34	1	193	8,6		11,5
2. ВК 8 - 0,1% $A1_20_3$-нано	98	121	23	1,2	220	12,8	31	13,1
3. ВК 8 - 0,2% $A1_20_3$-нано	100	124	24	1,2	216	12,3		14,0
4. ВК 8- 0,4% $A1_20_3$-нано	101	148	49	1,5	163	6,1		10,9

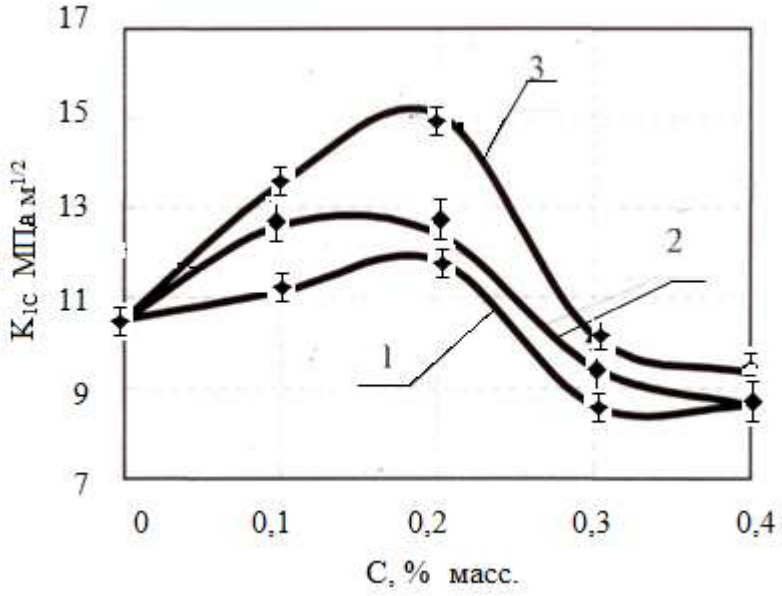
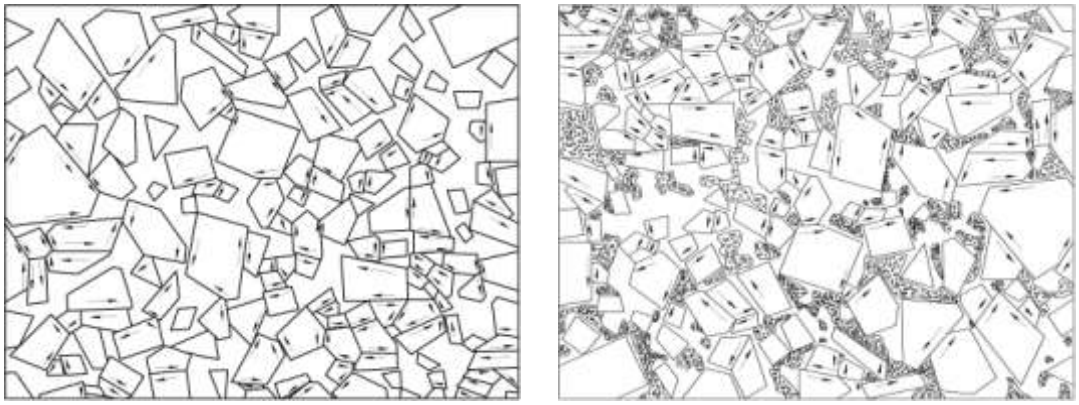


Рисунок 3.34 – Влияние добавок наночастиц $A1_20_3$ на трещиностойкость твердого сплава: 1- базовый сплав ВК8 (размер зерна WC d = 2 мкм); 2 - ВК 8 - 0,2% $A1_20_3$-нано; (размер зерна WC d = 2 мкм); 3 - ВК 8 - 0,2% $A1_20_3$-нано, (размер зерна WC d = 0,8 мкм).

Особый интерес, с точки зрения качества инструментальных твердых сплавов, в том числе и прогнозирования его поведения в условиях эксплуатации, представляют данные исследований вязкости разрушения материала по методу Палмквиста в сочетании с изучением микроструктуры.

Положительное влияние добавок наночастиц на свойства стандартных твердых сплавов объясняется, изменением его структурных параметров. При изготовлении (спекании) твердосплавных композитов добавки наночастиц оксидов ни оказывают никакого негативного влияния на процессы смачиваемости

карбидных зерен прослойкой кобальтового связующего, гомогенизации структуры. Более того, наночастицы, однородно распределенные в объеме связующего кобальта, (рисунок 3.35) приводят к его дисперсному упрочнению, увеличивают способность сплава сопротивляться сдвиговым деформациям и, как результат, способствуют увеличению трещиностойкости. Включения тугоплавких и твердых наночастиц в прослойках связующего являются «барьерами» на пути распространения микротрещин (рис. 3.36, 3.37).



а) WC-Co б) WC-Co-Al_2O_3

Рисунок 3.35 - Схематическое изображение микроструктуры стандартных (а) и модифицированных наночастицами (б) твердых сплавов

Косвенным подтверждением этого являются данные, полученные при исследовании микроструктуры. На рис. 3.36, 3.37 приведены изображения трещин Палмквиста, распространяющихся от угла отпечатка пирамидки Виккерса, которые свидетельствуют, что у модифицированного твердого сплава, с введением в его структуру частиц Al_2O_{3f}, не только уменьшается длина трещины – рисунок 3.36 (что говорит об увеличении вязкости материала), но изменяется характер ее распространения.

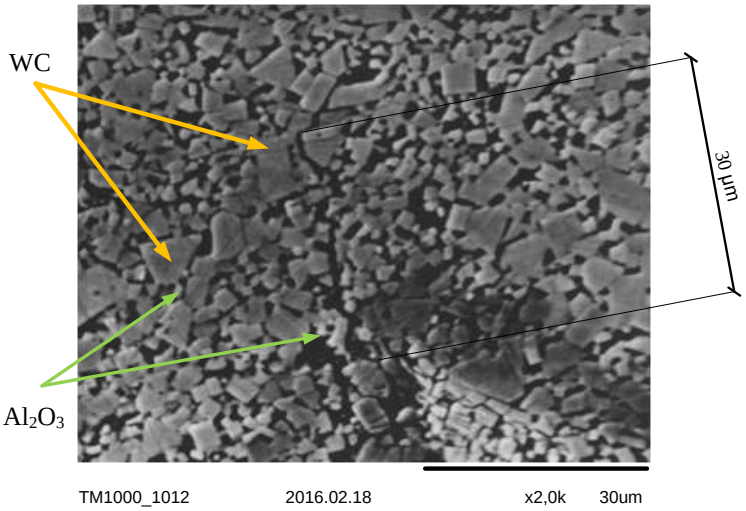
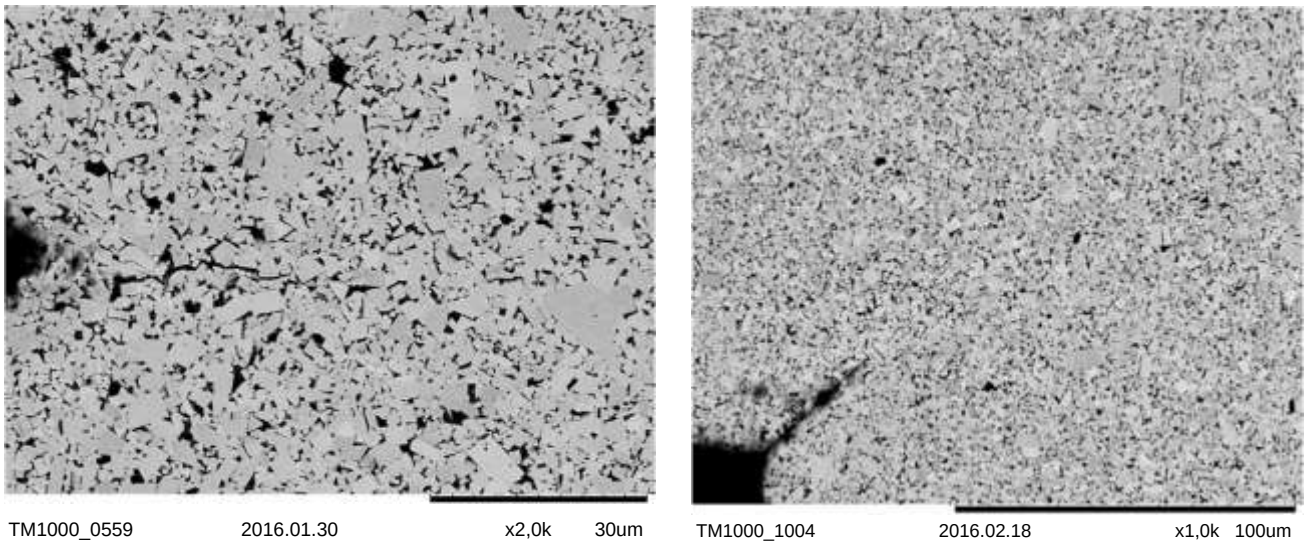


Рисунок 3.36 - Траектория распространения трещины от угла отпечатка пирамидки Виккерса в модифицированном наночастицами твердом сплаве *WC-Co-$Al_2O_{3f.}$*



а) б)

Рисунок 3.37 - Характер распространения трещин от угла отпечатка пирамидки Виккерса: (а) торможение трещины на включениях наночастиц (металл связки с поверхности полированного шлифа удален травлением); (б) релаксация напряжений во фронте распространения трещины (контрастное травление шлифа)

Траектория трещины может иметь «рваный», ступенчатый вид (рисунок 3.37), вероятно вследствие релаксации напряжений, возникающих в ее фронте при взаимодействии с включениями $Al_2O_{3f.}$ Следует отметить, что появление ступенчатой, дискретной трещины соответствует количеству добавок наночастиц

от 0,25 до 0,3 % масс. Трещина, которая движется (распространяется) преимущественно по межфазным границам WC – WC, WC – Co тормозится, релаксирует на дисперсных включениях наночастиц Al_2O_3 (рисунок 3.37б), расположенных в объеме прослойки кобальта. На аналогичные изменения в механизмах разрушения твердосплавных наноструктурированных композитов при распространении трещин указывается в результатах исследований [90, 130-134]. Таким образом, несмотря на неоднородность распределения наночастиц по объему реального трехфазного композита и наличие различных типов фрагментов структуры, общий интегральный уровень физико-механических свойств в области оптимальных добавок увеличивается.

Одним из косвенных способов оценки эксплуатационной стойкости твердосплавного инструмента (степени износа) является величина шероховатости поверхностного слоя детали после обработки. Известно, что между условиями трения и параметрами шероховатости обработанной поверхности существует взаимная связь. Повышение адгезионного взаимодействия между обрабатываемым материалом и материалом инструмента приводит к росту параметров шероховатости поверхности, особенно ее случайной составляющей - R_a. Результаты сравнительных испытаний инструментальных материалов по их влиянию на параметр среднеарифметического отклонения профиля шероховатости обработанной поверхности при точении сталей 40Х, 12Х18Н10Т твердыми сплавами базового состава и сплавами, модифицированными наночастицами $A1_20_3$ (измерение параметров шероховатости проводилось на профилографе-профилометре мод.252). Результаты измерений шероховатости в зависимости от скорости резания приведены на рисунке 3.38

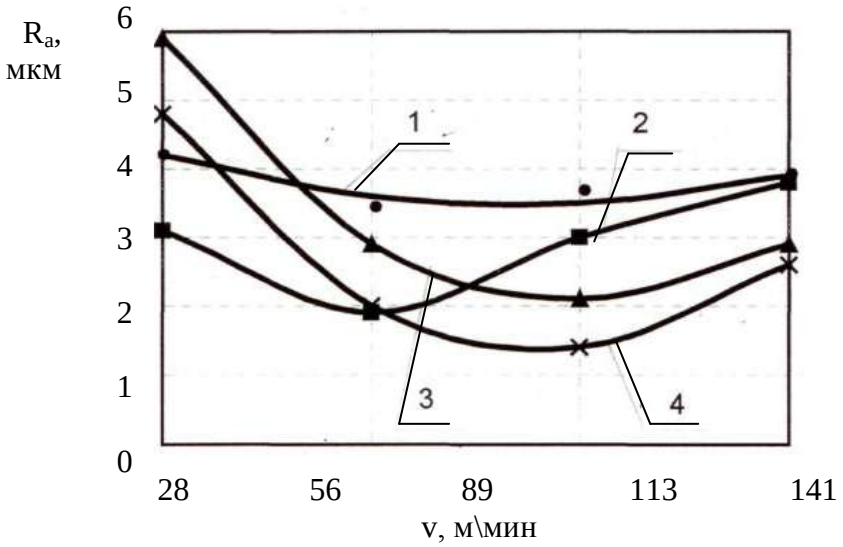


Рисунок 3.38 – Влияние скорости резания и состава твердосплавных композитов на шероховатость обработанной поверхности: 1 - сплав ВК8; 2 - сплав ВК8 + 0,1 % $A1_20_3$; 3 - сплав ВК8 + 0,2 % $A1_20_3$; 4 - сплав ВК8 + 0,4 % $A1_20_3$

Таким образом, полученные экспериментальные результаты в части повышения качества инструментальных материалов для РТМР свидетельствуют о положительном влиянии добавок наночастиц на свойства стандартных твердых сплавов, что объясняется, прежде всего, изменением их структурных параметров. Формирование наноструктурных фрагментов в объеме металлической кобальтовой прослойки обеспечивает снижение до субмикронных размеров ее толщины между карбидными зернами, реализуется известный в материаловедении эффект дисперсного упрочнения. Как результат, обеспечивается качественно новый уровень свойств, увеличивается способность сплава сопротивляться сдвиговым деформациям, тормозятся процессы роста зерна карбидной фазы. Включения тугоплавких и твердых наночастиц в прослойках связки позволяют повысить ее собственную микротвердость, стойкость к износу при повышенных температурах, например при высокоскоростном резании, и, кроме того, являются барьерами на пути распространения микротрещин, повышается прочность инструмента РТМР. Наночастицы керамики в количестве 0,05-0,2 % по массе, не только упрочняют кобальтовую прослойку, но и композит в целом (повышают трещиностойкость до

50%, прочность на изгиб до 25%), стойкость к температурным воздействиям, снижают адгезионное схватывание с обрабатываемым материалом, в 1,5 раза снижается абразивный износ [135, 136]. Чрезвычайно важным фактом, который был обнаружен и повторялся при изучении микроструктуры твердосплавных материалов, модифицированных наночастицами в условиях ЦЗЛ УНТЦ Кировградского завода твердых сплавов и Томского политехнического университета, является стабильное снижение среднего размера карбидных зерен основной фазы (благодаря наличию в прослойке связующего наночастиц – ингибиторов роста зерна – на аналогичные эффекты указывается в многочисленных исследованиях отечественных и зарубежных авторов [76]). Очевидно, что использование более мелкозернистых твердых сплавов также способствует снижению шероховатости обработанной поверхности [134].

Результаты испытаний металлорежущего инструмента изготовленного из новых твердосплавных композитов показывают, что модифицирование нанопорошками базовых твердых сплавов позволяет увеличить коэффициент относительной стойкости: WC-Co-(нано Al_2O_3) в 1,3 – 2 раза; WC-TiC-Co-(нано Al_2O_3) в 1,7 – 2,5 раза (таблица 7) [135, 136].

Таблица 7- Условия проведения и результаты стойкостных испытаний [135]

Вид операции	Обрабатываемый материал	Марка твердого сплава	Режимы резания			Коэф. стойкости Кст
			V, м/мин	S, мм/об	t, мм	
Продольное точение	Сталь 12Х18Н10Т	ВК8ХОМ (базовый)	100-250	0,15	1,5	1,0
		ВК8ХОМ +Al_2O_3	100-250	0,15	1,5	1,8-2,5
Торцевое фрезерование	Чугун СЧ18	ВК8 (базовый)	200	0,1	1,5	1,0
		ВК8+ Al_2O_3	200	0,1	1,5	1,35-1,8

Таким образом, обнаружена также устойчивая тенденция увеличения коэффициента относительной стойкости инструмента из модифицированных наночастицами твердых сплавов при повышении скоростей резания. Косвенным

путем подтверждено снижение адгезионного изнашивания (по снижению величины шероховатости Ra поверхности обрабатываемого материала).

3.7 Выводы по разделу 3.

По результатам комплекса экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы

1. Проведенные экспериментальные исследования позволили установить характер влияния режимов резания при РТМР на показатели шероховатости обработанной поверхности и главную составляющею силы резания. Полученные эмпирические зависимости позволяют устанавливать рациональные режимы резания при технологической подготовке производства.

2. Достоверно показано, что особенности кинематики и дискретный характер процесса резания при РТМР обеспечивают гарантированное дробление стружки и быстрое ее удаление из зоны резания. Морфология стружки после РТМР подтверждает теоретические положения о высокой интенсивности деформационных процессов в срезаемом слое.

3. Изучением характера распределения температур в системе “инструментальный модуль-деталь-стружка” установлено, что температура поверхности режущей части инструмента не превышает 120°С. По причине высоких скоростей резания и многогранности режущей кромки инструмента основные тепловые потоки концентрируются в объеме стружки – поверхности инструмента и детали просто не успевают разогреться. Это обеспечивает возможности повышения эксплуатационной стойкости инструмента без применения СОТС и, как результат, повышение качества обработки.

4. На основании экспериментальных исследований разработаны новые составы и технологии изготовления твердосплавных материалов с повышенной трещиностойкостью и прочностью связующего (за счет модифицирующего влияния добавок наночастиц керамики) для использования в инструментальных модулях РТМР.

Раздел 4 Практическое применение результатов исследования

4.1 Проведение эксплуатационных и производственных испытаний

Полученные в процессе теоретических и экспериментальных исследований результаты позволили определить основные преимущественные отличия метода РТМР в сравнении с безвершинным косоугольным точением, ротационным точением с принудительным и самовращением и торцевым фрезерованием валов повышение производительности за счет увеличения допускаемых скоростей резания, гарантированного дробления и отвода стружки из зоны резания, снижения температур на режущей части инструмента. При этом обеспечивается требуемые параметры шероховатости и точности размеров обработанной поверхности.

Работы по определению перспективных направлений практического использования метода РТМР, оптимизации конструкторских и технологических решений проводились параллельно (совместно) с лабораторными и стендовыми экспериментальными исследованиями. По сути, предложенные методики и расчетные формулы для определения рациональных режимов резания, геометрических параметров и материалов режущей части и инструмента являются полуэмпирическими. На основании производственных эксплуатационных испытаний на различных материалах и изделиях производилась корректировка, уточнение геометрических и технологических параметров, методик их расчета. В рамках договоров о совместной научно-производственной деятельности между АО “СИРЗ”, ООО “Енисейский инструмент”, МГУП “Горэлектротранс” (г. Красноярск), АО “Полимер – групп” (г. Дивногорск) были проведены стойкостные испытания инструментального модуля РТМР на различных материалах и изделиях.

В процессе производственных испытаний инструментального модуля РТМР в условиях АО “Сибирского инструментально - ремонтного завода” при обработке наружных поверхностей гребных валов из нержавеющей стали

12Х18Н10Т для двухвинтового буксира, (Рисунок 4.2), наряду с положительными результатами с обеспечением повышенной производительности обработки в сравнении с базовым технологическим процессом механической обработки вершинным точением, были выявлены некоторые проблемы связанные с формированием своеобразного нароста, “наплыва” на поверхности заготовки в зоне резания инструментом РТМР (схожие процессы описаны в работах [31]). При обработке валов из конструкционной стали 45 и легированной стали 40Х таких эффектов не наблюдалось (при эксплуатационных испытаниях инструментального модуля РТМР и внедрении в составе технологических процессов механической обработки ступенчатых валов для конвейеров Ачинского глинозёмного комбината – акт внедрения приведен в приложении Б). Поэтому причиной нарушений в процессе точения методом РТМР валов из стали12Х18Н10Т являются высокие показатели по прочности и вязкости (плохая обрабатываемость).

В связи с этим, проведен дополнительный анализ геометрии (статических и кинематических углов) режущей части многогранных пластин для РТМР с точки зрения устранения таких негативных эффектов. В качестве средства обеспечения более эффективного дробления стружки из труднодеформируемых вязких материалов (сложнолегированных нержавеющих сталей) было предложено новое конструктивное исполнение резца (патент № 2463130 приложение В) [77-83, 88, 137-144] с выполнением дополнительных канавок (выкружек) на вершинах многогранника. Ротационный резец представляет собой многогранную пластину 1 (рис 4.1), 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. Передняя 4 поверхность зуба выполнена с передним углом γ к плоскости резания от 2 до 5 градусов. На вершинах многогранного тела 1 резца специальной заточкой сформированы разделительные канавки 6. Шероховатость рабочих передней и задней поверхностей в пределах Ra0,32-0,63мкм обеспечивалась шлифованием за счет специальной конструкции пластины имеющей канавки при вершине для выхода

заточного круга. Одновременно канавки выполняют функцию дополнительного дробления стружки.

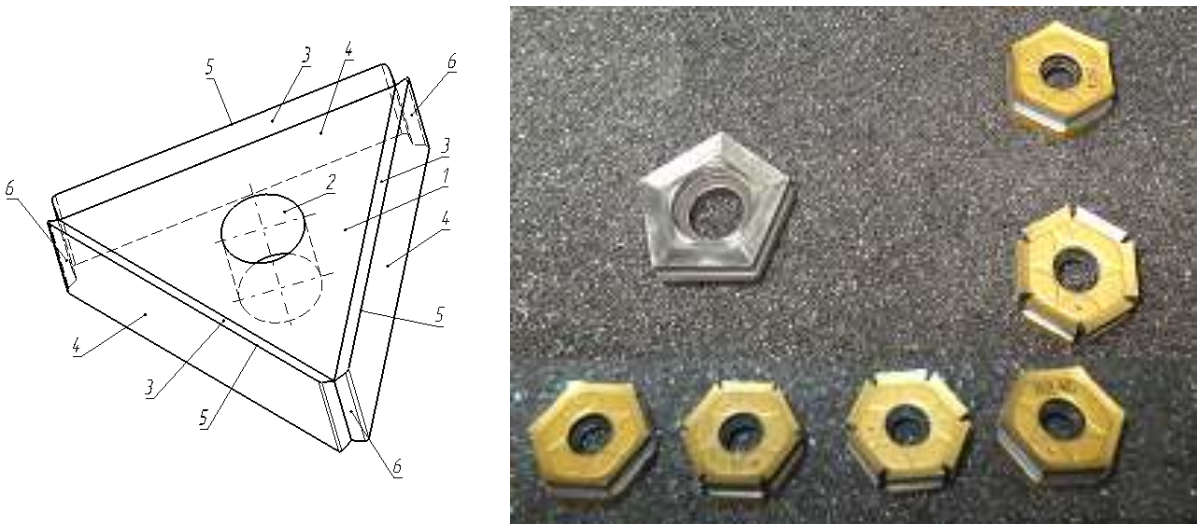


Рисунок 4.1 Усовершенствованная конструкция ротационного резца

Такие конструктивные изменения позволили существенно улучшить условия процесса (срезание слоя материала) и устранить образование нароста на поверхности заготовки ступенчатого вала из нержавеющей стали. В течение всего процесса механической обработки гребного вала типа Р14А-42-9 инструментальным модулем, оснащённым новой конструкцией резца обеспечивалась стабильная обработка всех поверхностей ступенчатого вала с обеспечением требуемого качества обработки.

Эффективность использования новой конструкции резца была показана также при проведении дополнительных лабораторных испытаний по точению методом РТМР титановых и магниевых сплавов.

Для обоснования технико-экономической эффективности дальнейшего использования метода РТМР в сравнении с существующим на предприятии технологическим процессом были произведены расчетные оценки по расширенным методикам, которые предложены СГТУ (г. Саратов) [145] и с использованием методики оценки эффективности использования новых методов механической обработки фирмы ISCAR [69]. При расчетах экономической эффективности метода РТМР сравнивались базовый вариант технологического процесса изготовления гребного вала типа Р14А-42-9 с предлагаемым новым (на

основе РТМР) – таблица 8. Технологические трудности при обработке такого вала объясняются его конструктивными особенностями. Длина обрабатываемого вала составляет L = 5065мм, диаметры ступеней изменяются в диапазоне от 100 до 110 мм. Обработка вала производится с дополнительными опорными приспособлениями (поскольку его длина превышает 15 диаметров), то есть он является нежестким и неуравновешенным. Использование инструмента РТМР позволяет сократить количество операционных переходов и в сочетании с увеличением режимов резания (в сравнении с базовым вариантом) обеспечивает повышение производительности.

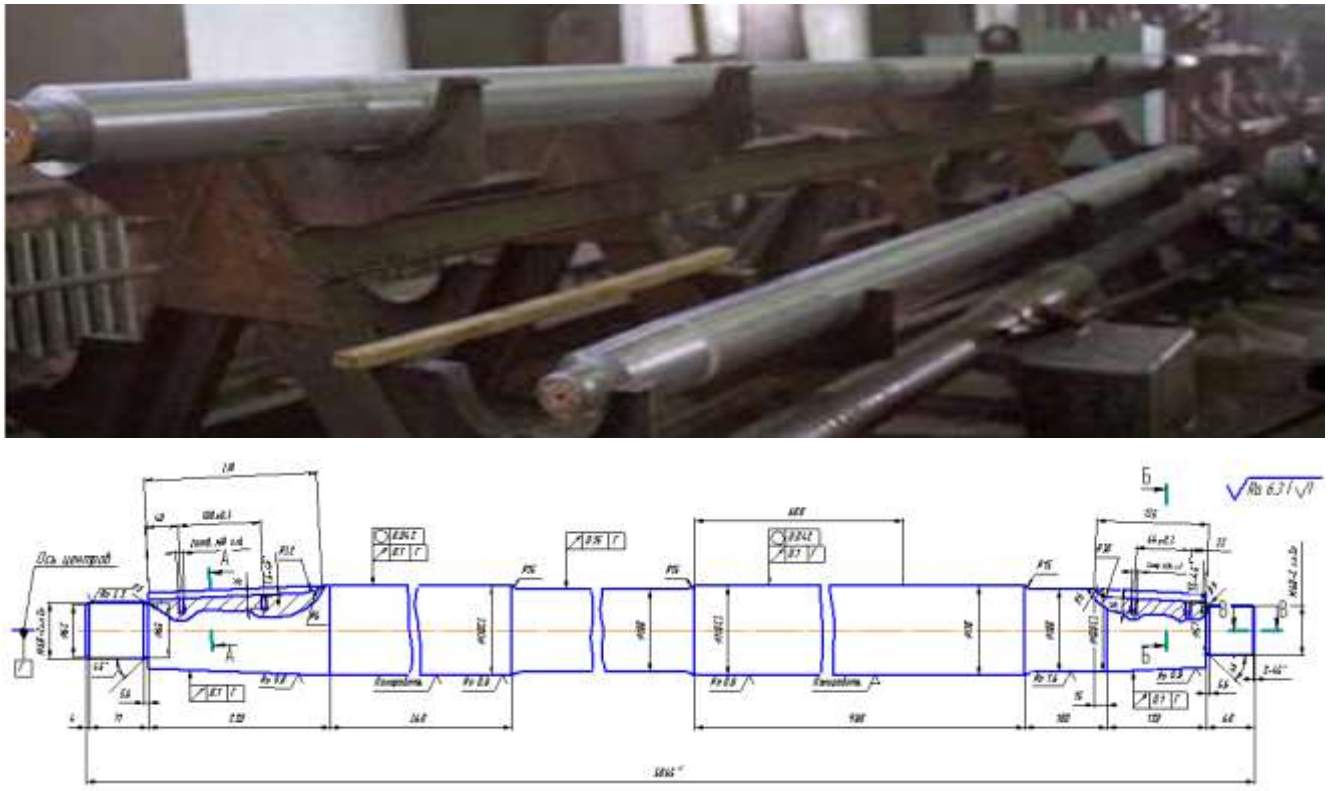


Рисунок 4.2 – Чертеж гребного вала типа Р14А-42-9

Таблица 8 Исходные данные для расчета по точению (на основе технологического процесса предприятия)

Сравнимые показатели	Единица измер.	Вариант 1 (базовый)	Вариант 2 (РТМР)
Обрабатываемый материал		12Х18Н10Т	
Диаметр детали (максимальный), Dmax	мм	110	110
Диаметр детали (минимальный) Dmin	мм	100	100
Частота вращения инструмента, ($n_р$)	об/мин	-	6000-12000
Частота вращения заготовки, ($n_з$)	об/мин	31,5-63	63-125
Скорость резания, (Vр)	м/мин	10,8- 21,8	310 - 621
Подача продольная (Sпр)	мм/об	0,1 - 0,6	0,2 – 1,2
Величина минутной подачи	мм/мин	6,3 – 18,96	25 – 75,6
Глубина резания (t)	мм	0,1 - 4	0,5-4,5
Количество проходов	шт	3	2
Суммарное линейное перемещение инструмента на рабочей подаче при обработке одной детали	мм	5100	5100
Результат			
Машинное время обработки (Тмаш)	мин	1588	272
Время на смену детали (Тдет)	мин	15,0	15,0
Время на смену инструмента (Тинстр) фактичекое	мин	2,0	2,0

Основные сравнительные показатели технико-экономической эффективности по результатам проведенных расчетов приведены в таблице 9.

Таблица 9 Сравнительный расчет суммарных затрат на выполнение перехода (Σ $З_{перех}$)

Статьи расходов (показатели)	Единица измер.	Вариант 1 (базовый)	Вариант 2 (РТМР)
Трудоемкость обработки (Т)	ч	26,467	4,533
Затраты на инструмент (З инстр)	руб.	111,41	171,71
Затраты на оборудование (З оборуд)	руб.	342,43	73,53
Затраты на зарплату (З з/п) (трудозатраты)	руб.	3332	604,5
Прочие расходы (П расх) (дополнительные накладные расходы без учёта расходов на оборудован и инструмент)	руб.	726,67	1323,77
Суммарные затраты Σ (З перех)	руб.	4512,51	2173,51
Экономия затрат на изготовление одного гребного вала	руб.		2339

При этом затраты на инструмент по исходному варианту составляли всего 2,47 % от общих затрат на переход, а по новому варианту – 7,9 % ,что не является критичным и объясняется увеличением прямых расходов на инструмент в 1,5 раза и одновременным уменьшением суммарных затрат по новому варианту более чем вдвое. Очевидно, что затраты на инструмент в общей доле затрат на обработку весьма незначительны. Данные, приведенные в таблице 10, иллюстрируют эффективность применения метода РТМР по сравнению с методом вершинного точения. Результаты расчетов позволяют оценить окупаемость затрат на инструмент и эффективность вложения дополнительных средств в приобретение нового инструмента. Результаты расчетов показывают, что при минимальных затратах на один комплект инструмента для РТМР 42000 руб. и полученной экономии затрат на обработку одного гребного вала в 2339 руб. затраты на инструмент окупятся после обработки 18 валов. Экономический эффект только на одном типоразмере валов за счет использования инструментального модуля

РТМР составляет 84 204 рубля. По данным заказчика номенклатура валов разного типоразмера – 12 позиций с общей потребностью в изделиях - 242 детали. Тогда по укрупненным оценкам, проведенным на предприятии, экономический эффект составляет более 1,2 миллиона рублей (Приложение Б).

Таблица 10 Эффективность применения метода РТМР по сравнению с лезвийной обработкой

Сокращение трудоемкости (Т)	в 5,84 раза
Увеличение затрат на инструмент	в 1,54 раза
Сокращение общих затрат	в 2,08 раза
Коэффициент эффективного вложения средств в инструмент (Экономия затрат на переход / увеличение затрат на инструмент или Доход на каждый вложенный рубль в инструмент)	39 руб. дохода/ 1 руб. затрат

Расчеты показывают, что при увеличении затрат на инструмент в 1,5 раза (на 60 руб. 30 коп.) производительность увеличивается в 5,84 раза.

Проведенные эксплуатационные производственные испытания и технико-экономические оценки по обоснованию использования метода РТМР для обработки гребных валов были завершены разработкой технологического процесса механической обработки с использованием новых многогранных резцов ротационного точения. Технологические регламенты переданы заказчику для использования в производственных процессах (приложение Б). Ранее инструментальные модули для РТМР были внедрены в производстве АО “Полимер - групп” в процессах механической обработки ступенчатых валов из стали 40Х предназначенных для конвейеров Ачинского глинозёмного комбината (приложение Б) с годовым экономическим эффектом 900 тыс. руб.

4.2 Разработка рекомендаций по практическому использованию метода РТМР

На основании комплекса расчетных теоретических и экспериментальных исследований обоснованы перспективные направления для наиболее

эффективного использования метода РТМР при обработке различных материалов, разработаны методические рекомендации по расчету и назначению рациональных режимов резания – таблица 11

Таблица 11 - Рекомендации по выбору режимов резания при РТМР

Группа по ISO	Материал заготовки	Твердость по Бринеллю (НВ)	Продольная подача *Snp,* (мм/об)	Скорость резания *Vp,* (м/мин)
P Углеродистая сталь	C=0,1-0,55%	125-150	0,05-1,2	620-310
	Легированная сталь	180-350		470-260
N Алюминиевые сплавы	Деформируемые	60-100		930-470
	Литейные	75-90		
M Нержавеющие стали	Аустенитные	180-330		470-260

При РТМР обеспечивается шероховатость обработанной поверхности и высокая геометрическая точность формы (гарантированно исключается кинематическая волнистость), что позволяет в некоторых случаях исключить из технологического процесса последующие чистовые операции.

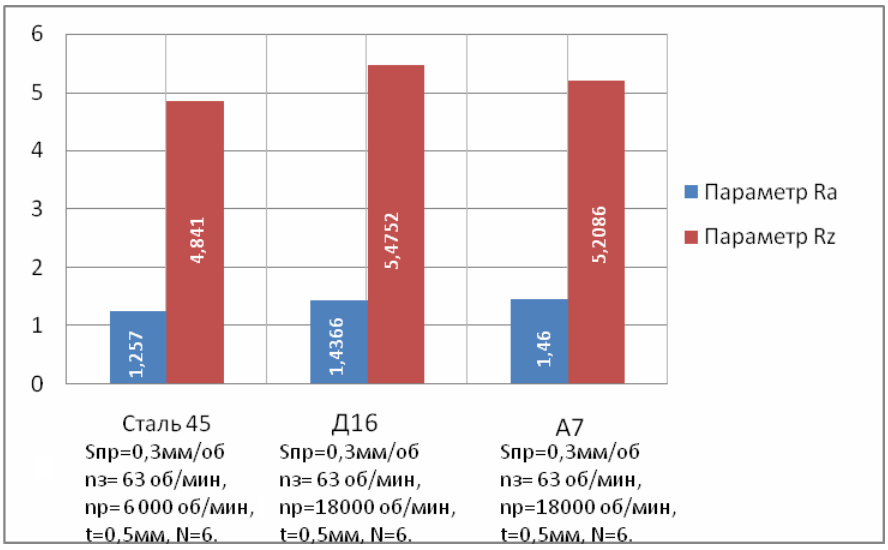


Рисунок 4.3 - Характеристика шероховатости поверхности различных конструкционных материалов после ротационного точения многогранными резцами

Оценку производительности срезания припуска при обработке наружных цилиндрических поверхностей с применением нового метода ротационного точения многогранными резцами выполняли путем определения основного машинного времени на обработку в сравнении с известными методами точения. Обработка в условиях продольного точения осуществлялась на токарном станке с ЧПУ 16К20ФЗР132 (система позволяет поддерживать постоянную скорость резания при каждом следующем проходе). Материалы образцов сталь 45, 40Х, алюминиевые сплавы Д16, А7. Диаметры образцов - 200мм, длина резания - 1000мм. Вид обработки - чистовое точение, шероховатость поверхности в диапазоне 1,25…1,6 мкм по Ra.

Результаты расчета представлены в форме сравнительной диаграммы трудоемкости процесса механической обработки (рисунок 4.4).

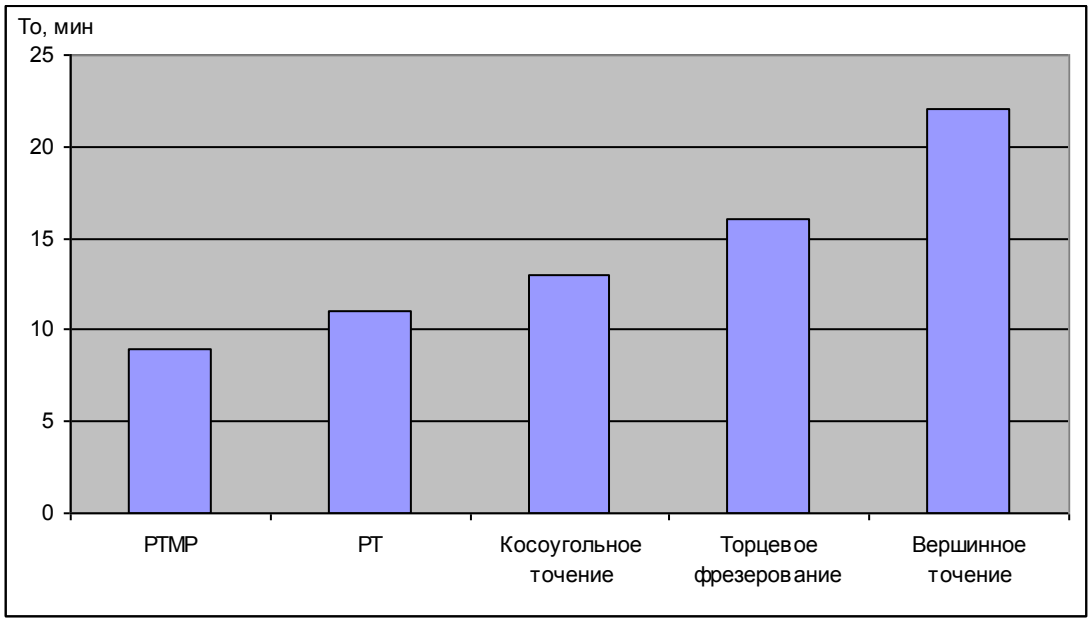


Рисунок 4.4 Трудоемкость обработки для разных способов лезвийной обработки (данные по трудоемкости косоугольного точения и торцевого фрезерования приняты по данным [3, 31, 58]).

Данные приведенные на рисунке 4.2 показывают, что применение PTMP обеспечивает повышение производительности процесса обработки по машинному времени в сравнении с ротационным точением 1,3 раза, с косоугольным точением в 1,5 раза, с торцевым фрезерованием в 1,8 раза, с вершинным точением 2,5 раза. Производительность увеличивается за счет особенностей кинематики процесса

РТМР, высокой суммарной скорости резания. Стойкость ротационных резцов при этом в несколько раз выше, чем вершинных и без вершинных резцов, по этому существенно снижаются общие суммарные затраты на инструмент.

Важным преимуществом процесса РТМР материалов является обеспечение высокого качества обработанной поверхности при повышении производительности по сравнению с известными методами точения.

Преимущественные отличия метода РТМР в систематизированном обобщенном виде приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Показатели метода ротационного точения многогранными резцами

№ п/п	Показатель	Характеристика показателя
1	Область применения	Механическая обработка наружных поверхностей тел вращения из различных конструкционных материалов, в том числе длинномерных валов и валов большого диаметра.
2	Крупногабаритные и нежесткие валы.	Ограничивается только возможностями станка и не уравновешенностью заготовки
3	Группа материалов	Обработка практически всех групп металлов и сплавов (сталей углеродистых, конструкционных, легированных нержавеющих, труднодеформируемых сложнолегированных, алюминиевых сплавов, композиты, древесина и материалы на ее основе) без

		снижения эксплуатационной стойкости.
4	Режимы резания	Расширенные диапазоны допускаемых скоростей резания от 310 до 933 м/мин, подач от 0,05 до 1,2 мм/об.
5	Производительность	Повышенная за счет особенностей кинематики РТМР производительность (от 1,3 до 2,5 раз)
4	Точность размеров	Исключение кинематической волнистости на обработанной поверхности.
5	Шероховатость по *Ra*, мкм:	0,8 - 6,3 (соответствует 6 - 8 квалитету)
6	Тип образующейся стружки, ее объемный коэффициент (ω) и условия резания.	Элементная мелкодробленая стружка (ω=2-3) гарантировано удаляется из зоны резания, практически все тепловые потоки концентрируются в объеме стружки, что способствует уменьшению температуры на поверхности детали и заготовки (не более 120 °С). Не требуется применение СОТС.
7	Безопасность процесса	Снижение вероятности поломок инструмента и травматизма за счет исключения длинной сливной стружки.

8	Теплообмен в зоне резания	Реализуется принцип не стационарности теплообмена в зоне резания. Высокие скорости деформационных процессов и особенностей кинематики РТМР способствуют гарантированному дроблению и удалению разогретой до высоких температур стружки из зоны контакта “инструмент – деталь”
9	Экологичность процесса	Процесс резания может быть практически безотходным. (мелкодробленая стружка после простого помола до размеров несколько микрометров может быть использована в качестве товарного продукта для изготовления изделий методами порошковой металлургии). Отпадает необходимость применения токсичных СОТС.

4.3 Выводы по разделу 4.

1. В процессе эксплуатационных и производственных испытаний подтверждена возможность повышения технико-экономических показателей метода РТМР в сравнении с известными методами обработки (расширенные диапазоны допускаемых скоростей резания от 310 до 933 м/мин, повышение производительности от 1,3 до 2,5, точность размеров по 6 - 8 квалитету) за счет

реализации новых кинематических принципов формообразования срезаемого слоя при РТМР.

2. На основе эксплуатационных испытаний уточнены методики расчета геометрических параметров инструмента и режимов резания. Разработаны практические рекомендации по использованию метода РТМР для обработки разных групп материалов.

3. Разработанные технологические процессы и регламенты использованы в производственных условиях АО “СИРЗ” для обработки методом РТМР гребных валов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и валов для конвейеров из стали 40Х (для АО “Ачинский глиноземный комбинат”). В результате внедрения технологии получен суммарный экономический эффект 2.1 миллиона рублей. Акты внедрения приведены в приложении Б.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам комплекса теоретических и экспериментальных исследований сделаны 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”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобров, В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов /В.Ф. Бобров. – М.: Машгиз, 1962. – 152 с.

2. Армарего, И.Дж.И. Обработка металлов резанием. Пер. с англ. Пастухова В.А. /И.Дж.И. Армарего, Р.Х. Браун. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.

3. Кожевников Д. В. Резание материалов: учебник //М.: Машиностроение. – 2007.

4. Nategh M. J., Razavi H., Abdullah A. Analytical modeling and experimental investigation of ultrasonic-vibration assisted oblique turning, part I: kinematics analysis //International Journal of Mechanical Sciences. – 2012. – Т. 63. – №. 1. – С. 1-11.

5. Razavi H., Nategh M. J., Abdullah A. Analytical modeling and experimental investigation of ultrasonic-vibration assisted oblique turning, part II: dynamics analysis //International Journal of Mechanical Sciences. – 2012. – Т. 63. – №. 1. – С. 12-25.

6. Stabler, G.V. The fundamental geometry of cutting tools /G.V. Stabler //Proc. IMechE. – 1951. – Vol.165. – P. 14-26.

7. Клименко, С.А. Твердое «бреющее» точение /С.А. Клименко, А.С. Манохин //Сверхтвердые материалы. – 2009. – №1 – С. 58-74.

8. Grzesik, W. Investigations of surface textures produced by oblique machining of different workpiece materials /W. Grzesik, K. Żak //Archives of Materials Science and Engineering. – 2011. – Vol.52. – P. 46-53.

9. Филиппов, А.В. Определение параметров сечения срезаемого слоя при косоугольном точении безвершинным резцом /А.В. Филиппов //СТИН. – 2014. – №4. – С. 21-25.

10. Razavi H., Mirbagheri M. Design and fabrication of a novel vibrational system for ultrasonic assisted oblique turning process //Journal of Mechanical Science and Technology. – 2016. – Т. 30. – №. 2. – С. 827-835.

11. Минасян, Г.С. О некоторых преимуществах безвершинного резца БРМ-1 /Г.С. Минасян //Известия академии наук АССР. –1966. – №3. – С. 39-45.

12. Патент на изобретение SU 1743700 A1. B 23 B 1/00. Способ точения безвершинным резцом /Г.П. Галоян, Д.А. Асатрян. Опубл.07.08.1989.

13. Патент на полезную модель 2149079 РФ, МПК7 B23B27/02 Безвершинный резец/ Е.С. Сидоренко. Опубл. 20.05.2000.

14. Razavi H., Mirbagheri M. Design and fabrication of a novel vibrational system for ultrasonic assisted oblique turning process //Journal of Mechanical Science and Technology. – 2016. – Т. 30. – №. 2. – С. 827-835.

15. Петрушин, С.И. Теоретические основы оптимизации режущей части лезвийных инструментов: дисс. докт. техн. наук: 05.03.01 /Петрушин Сергей Иванович. – МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 1995. – 307 с.

16. Минасян, Г.С. Шероховатость поверхности при точении безвершинным резцом БРМ-1 /Г.С, Минасян //Известия академии наук АССР. – 1970. – №4. – С. 3-6.

17. Filippov A. V. Cut-layer cross section in oblique turning //Russian Engineering Research. – 2014. – Т. 34. – №. 11. – С. 718-721.

18. Галоян, Г.П. Теоретические основы нового процесса диагонального точения с обоснованием путей его реализации: дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Галоян Гайк Пилосович. – Ленинакан, 1986. – 157 с.

19. Зелинский, В.В. Совершенствование чистовой токарной обработки путём применения инструментов безвершинных конструкций /В.В. Зелинский, А.В. Карпов //Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2011. – №3 – С. 73-76.

20. Wang X., Feng C. X. Development of empirical models for surface roughness prediction in finish turning //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2002. – Т. 20. – №. 5. – С. 348-356.

21. Подгорков, В.В. Чистовое точение однокромочными резцами /В.В, Подгорков //СТИН. –1974. – №1. – С. 30-31.

22. Тер-Маркарян, М.С. Некоторые особенности кинематики и процесса резания безвершинными резцами /М.С. Тер-Маркарян //Известия академии наук АССР. –1977. – №6. – С. 3-12.

23. Grzesik, W. A real picture of plastic deformation concentrated in the chip produced by continuous straight-edged oblique cutting /W. Grzesik //Int. J. Mach. Tools Manuf. – 1991. – Vol.31. – №3. – P. 329-344.

24. Филиппов, А.В. Косоугольное точение бреющими резцами /А.В. Филиппов //Актуальные проблемы в машиностроении: сборник научных трудов I Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – С. 236-241.

25. Манохин, А.С. Неровности поверхности, обработанной безвершинным косоугольным инструментом, оснащенным ПСТМ на основе КНБ /А.С. Манохин, Н.Е. Стахнив, С.А. Клименко //Сверхтвердые материалы. – 2009. – №2. – С. 61-70.

26. Филиппов, А.В. Повышение точности обработки нежестких валов путем оптимизации параметров бреющего точения: дисс. канд. техн. наук: 05.02.07 /Филиппов Андрей Владимирович. – ИФПМ СО РАН, Томск, 2015. – 194 с.

27. Muhammad R., Roy A., Silberschmidt V. V. Finite element modelling of conventional and hybrid oblique turning processes of titanium alloy //Procedia CIRP. – 2013. – Т. 8. – С. 510-515.

28. Zheng Q. et al. Simulation and Experimental Research on Cutting Force of Turning Titanium Alloy //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2015. – Т. 31.

29. Коновалов, Е.Г. Основы новых способов металлообработки [Текст]: учеб. / Коновалов, Е.Г. - Мн.: Машиностроение, 1961. – 286с.

30. Бобров, В.Ф. Резание металлов самовращающимися резцами [Текст]: учеб./ Бобров, В.Ф. Иерусалимский, Д.Е. – М.: Машиностроение, 1972. – 111с.

31. Ящерицын, П.И. Ротационное резание материалов [Текст]: учеб./ Ящерицын, П.И. Борисенко, А.В. Дривотин, И.Г. Лебедев, В.Я. – Мн.: Наука и техника, 1987. – 229с.

32. Armarego E. J. A., Karri V., Smith A. J. R. Fundamental studies of driven and self-propelled rotary tool cutting processes—I. Theoretical investigation //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1994. – Т. 34. – №. 6. – С. 785-801.

33. Armarego E. J. A., Karri V., Smith A. J. R. Fundamental studies of driven and self-propelled rotary tool cutting processes—II. Experimental investigation //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1994. – Т. 34. – №. 6. – С. 803-815.

34. Dessoly V., Melkote S. N., Lescalier C. Modeling and verification of cutting tool temperatures in rotary tool turning of hardened steel //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2004. – Т. 44. – №. 14. – С. 1463-1470.

35. Коновалов Е.Г., Сидоренко В.А., Соусь А.В. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов. Минск. «Наука и техника». 1972. - 272 с.

36. Коновалов Е.Г., Сидоренко В.А., Соусь А.В. и др. Новые конструкции ротационного режущего инструмента // Машиностроитель. 1971. №2, С. 25-27.

37. Гик Л.А. Ротационное резание металлов. Калининград: Кн. изд-во, 1990.-254 с.

38. Гик Л.А. Принципы создания и классификации схем ротационного резания // СТИН. 2005. №7, С. 25-28.

39. Yamamoto H. et al. Thermal Behavior and Chip formation on Rotary Cutting of Difficult-to-cut Materials Utilizing Multi Tasking Lathe and MQL //Proc. 5th Int. Conf. on LEM21. – 2009. – Т. 661.

40. Hosokawa A. et al. Turning of difficult-to-machine materials with actively driven rotary tool //CIRP Annals-manufacturing technology. – 2010. vol. 34. №. 1, pp. 89-92.

41. Kossakowska J., Jemielniak K. Application of Self-Propelled Rotary Tools for turning of difficult-to-machine materials //Procedia CIRP. – 2012. – Т. 1. – С. 425-430.

42. Olgun U., Budak E. Machining of difficult-to-cut-alloys using rotary turning tools //Procedia CIRP. – 2013. – Т. 8. – С. 81-87.

43. Ezugwu, E.O., Wang, Z.M., 1997, Titanium Alloys and Their Machinability - A Review, Journal of Materials Processing Technology, 68, 262-274.

44. Nabhani, F., 2001, Machining of Aerospace Titanium Alloys, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 17, 99-106.

45. Ezugwu, E.O., Olajire, K.A., Wang, Z.M., 2002, Wear Evaluation of a Self-Propelled Rotary Tool When Machining Titanium Alloy IMI 318, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part b: Journal of Engineering Manufacture, 216, 891-897.

46. Kishawy, H.A. Becze, C.E., McIntosh, D.G., 2004, Tool Performance and Attainable Surface Quality During the Machining of Aerospace Alloys using Self-Propelled Rotary Tools, Journal of Processing Technology, 152, 266-271.

47. Uhlmann E., Kaulfersch F., Roeder M. Turning of High-performance Materials with Rotating Indexable Inserts //Procedia CIRP. – 2014. – Т. 14. – С. 610-615.

48. Ezugwu EO. Improvements in the machining of aero-engine alloys using self-propelled rotary tooling technique. Journal of materials processing technology. 2007;185:60-71.

49. Gurtyakov A. M., Babaev A. S., Chudinova A. I. Kinematic Analysis of Rotary Deep-Depth Turning Parameters //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2016. – Т. 124. – №. 1. – С. 012156.

50. Dessoly, V., Melkote, S.N., Lescalier, C., 2004, Modeling and Verification of Cutting Tool Temperatures in Rotary Tool Turning of Hardened Steel, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44, 1463-1470.

51. Davies M. A. et al. On the measurement of temperature in material removal processes //CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 2007. – Т. 56. – №. 2. – С. 581-604.

52. Селиванов А. Н., Насад Т. Г. Обеспечение качества обработки валов из титановых сплавов методом высокоскоростного фрезерования и фрезоточения //Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 3. – №. 1.

53. Малько Л.С. Разработка многолезвийного инструмента для ротационного точения винтовой поверхности деталей машин / Л.С. Малько, А.В. Сутягин, И.В. Трифанов // Вестник СибГАУ, 2010 Вып. 6 (32) -С. 139-145.

54. Новосёлов Ю.А., Попок Н.И. Привода устройств для ротационного точения // Машиностроитель. 1981. №9, С. 27-28.

55. Новосёлов Ю.А., Попок Н.Н. Шпиндельные узлы ротационных принудительно вращающихся резцов // Машиностроитель. 1985. №8, С. 22-23.

56. Таурит Г.Э., Поховский Е.С., Грищенко Е.Ю. Обработка крупногабаритных деталей. К.: Техшка, - 1981. - 208 с.

57. Рывкин, Г.М. Чистовое точение резцами с перемещаемой режущей пластинкой /Г.М. Рывкин, Б.И. Самойлов //СТИН. –1952. – №4. – С. 20-22.

58. Мархасин Э.Л., Петросянц А.Я. Фрезерование тел вращения. -М.: Машгиз, 1960. -111 с.

59. Балакшин, Б. С. Фрезерование вместо обточки /Б. С. Балакшин // Станки и инструмент. 1969. № 2.

60. Каширин, А. И. Торцевое фрезерование наружных поверхностей вращения/А. И. Каширин, М. Е. Юхвид//Станки и инструмент. 1952. № 10. С. 20 - 22.

61. Сидоренко С.А., Мелихова М.С Координатный метод определения профиля поверхности при обработке тел вращения методом торцевого фрезерования //Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2011. № 1. С. 66-69.

62. Полетаев, В. А. Комбинированная обработка поверхностей тел вращения фрезерованием и фрезоточением с учетом технологического обеспечения их динамической устойчивости дис. докт. тех. наук: 05.03.01 (05.02.07) /Полетаев Валерий Алексеевич. - Рыбинск: ОАО НПО “Сатурн” 2001.-432с.

63. Грязев М.В., Степаненко А.В. Перспективные технологии обработки поверхностей вращения фрезерованием//Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Тула. 2010. Вып. 2. Ч. 1. С. 130-136.

64. Грязев М.В., Степаненко А.В. Фрезерование наружных цилиндрических поверхностей торцовой фрезой//Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Тула. 2010. Вып. 2. Ч. 2. С. 140-148.

65. de Oliveira F. B. et al. Size effect and minimum chip thickness in micromilling //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2015. – Т. 89. – С. 39-54.

66. Селиванов А.Н., Насад Т.Г., Торманов С.Я. Экспериментальные исследования стружкообразования при обработке титанового сплава марки ВТ1-0 методом высокоскоростного окружного фрезерования// Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 2. № 2 (56). С. 138-144.

67. Грановский, Г.И., Резание металлов /Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.

68. http://www.sandvik.coromant.com

69. http://www.iscar.ru

70. Karagüzel U. et al. Analytical modeling of turn-milling process geometry, kinematics and mechanics //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2015. – Т. 91. – С. 24-33.

71. Choudhury S.K. Investigation of orthogonal turn-milling for the machining of rotationally symmetrical work pieces / S.K Choudhury, K.S Mangrulkar // Journal of Materials Processing Technology 1-3 2000, P. 120 128.

72. Savas V., Ozay C. Analysis of the surface roughness of tangential turn-milling for machining with end milling cutter //Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Т. 186. – №. 1. – С. 279-283.

73. Zhu L., Li H., Wang W. Research on rotary surface topography by orthogonal turn-milling //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Т. 69. – №. 9-12. – С. 2279-2292.

74. А.с. СССР 1126375; МКИ^3 В 23 В 1/00. Способ лезвийной обработки валов с профилем “равноосный контур” / Рыжов, Э.В. Индаков, Н.С. Петровский, Э.А. и др. Опубл. 30.11.1984г.

75. Panov, V.S., Zaitsev AA Trends of development the technology ultrafine and nanosized tungsten carbide WC-Co– A review //Proceedings of the universities. Powder metallurgy and functional coatings 2014, no. 3, pp. 38–48.

76. Fang Zak Z., Wang Xu, Taegong Ryu, Kyu Sup Hwang, Sohn H.Y. Synthesis, sintering, and mechanical properties of nanocrystalline cemented tungsten carbide – A review// int. journal of Refractory Metals & Hard Materials. - 2009. - vol. 27, pp. 288–299

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

78. Indakov, N.S. Turning by multifaceted cutters/ N.S. Indakov, A.S. Binchurov // //Russian Engineering Research, 2014, Vol. 34, No. 1, pp. 52–54. DOI: 10.3103/S1068798X14010080,

79. Индаков Н.С. Метод ротационного точения многогранными резцами / А.С. Бинчуров, Н.С. Индаков //Вестник ассоциации выпускников КГТУ. – 2011.- №20. – С. 146-149.

80. Индаков Н.С. Исследование метода ротационного точения многогранными резцами / А.С. Бинчуров, Н.С. Индаков //Вестник ассоциации выпускников КГТУ. – 2012.- №21. – С. 47-53.

81. Индаков Н.С. Новый метод ротационного точения многогранными резцами / А.С. Бинчуров, Н.С. Индаков, Г.Д. Исакова// Интеллект и наука: Труды XII Международной научной конференции - Железногорск 2012 - С. 20-21.

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

83. 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.

84. Бинчуров, А.С. Новый метод ротационного точения многогранными резцами / А.С. Бинчуров, Н.С. Индаков, Г.Д. Исакова// Интеллект и наука: Труды XII Международной научной конференции - Железногорск 2012 - С. 20-21.

85. Бинчуров, А.С. Ротационное точение многогранными резцами / А.С. Бинчуров, Н.С. Индаков // Современные инновации в науке и технике: материалы

IX-ой Международной научно-практической конференции - Курск: изд. Юго-Зап. гос. ун-т. 2012 - С. 71-74.

86. Индаков Н.С. Особенности геометрии многогранных резцов для ротационного точения /Н.С. Индаков, А.С. Бинчуров// Вестник машиностроения. – 2013. - №11. – С. 38-41. DOI 0042-4633.

87. Indakov, N.S. Geometry of Multifaceted Rotary Cutters /A.S. Binchurov, N.S. Indakov // Russian Engineering Research, 2014, Vol. 34, No. 2, pp. 79–82. DOI: 10.3103/S1068798X14020051

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

89. 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.

90. Бобров, В.Ф. Основы теории резания материалов /В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.

91. Бинчуров, А.С. Кинематика ротационного точения многогранными резцами / А.С. Бинчуров, Н.С. Индаков // Высокие технологии в современной науке и технике: Сборник научных трудов III Международной научно-технической конференции – Томск 2014 - С. 336-339.

92. Бинчуров, А.С. Исследование процесса ротационного точения многогранными резцами / А.С. Бинчуров, Н.С. Индаков, Ю.И. Гордеев, Д.И. Киселев // Решетневские чтения. 2015. Т. 1. № 19. С. 464-466.

93. Бинчуров, А.С. Новый метод ротационного точения многогранными резцами / А.С. Бинчуров, Н.С. Индаков, Г.Д. Исакова// Интеллект и наука: Труды XII Международной научной конференции - Железногорск 2012 - С. 20-21.

94. Бинчуров, А.С. Ротационное точение многогранными резцами / А.С. Бинчуров, Н.С. Индаков // Современные инновации в науке и технике: материалы IX-ой Международной научно-практической конференции - Курск: изд. Юго-Зап. гос. ун-т. 2012 - С. 71-74.

95. Бинчуров, А.С. Способ получения наполнителей для композиционных материалов методом ротационного точения многогранными резцами / А.С. Бинчуров, Н.С. Индаков // Техника и технологии: материалы V vеждународной научно-практической конференции - Москва 2012 - С. 18-22.

96. Бинчуров, А.С. Метод ротационного точения / А.С. Бинчуров, Н.С. Индаков Г.Д. Исакова // Молодёжь и наука: Сборник материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции – Красноярск. 2012 - С.

97. Бинчуров, А.С. Новый метод ротационного точения многогранными резцами / А.С. Бинчуров, Н.С. Индаков // Интеллект и наука: Труды XIII Международной молодежной научной конференции - Железногорск 2013 - С. 26-28.

98. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – Рипол Классик, 1976.

99. Ящерицын П. И., Махаринский Е. И. Планирование эксперимента в машиностроении //Минск: Вышэйш. шк. – 1985.

100. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение. - 2000. - 320с.

101. Суслов А.Г., Федоров В.П., Горленко О.А. и др. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталий и их соединений / Под общей ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2006. - 448с.

102. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Суслов, В.П. Федоров, О.А. Горленко и др., М.: Машиностроение, 2006, 448 с.

103. Рыжов Э.В., Аверчиков В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки. Киев.: Наукова думка, 1989 - 192с.

104. Аркулис Г.Э., Куприн М.И., Голев В.Д. и др. Измерения шероховатости поверхности с помощью реплик // Вестник машиностроения. 1971. - №12. -С.48-50.

105. Дунин-Барковский И.В., Карташова А.Н. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. М.: Машиностроение, 1978. - 232 с.

106. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения М.: Машиностроение, 2002, 684 с.

107. Инженерия поверхности деталей / Колл. авт., под ред. А.Г. Суслова М.: Машиностроение. 2008. 320с.

108. Лузин Н.Н. Дифференциальное исчисление. М.: Высшая школа, 1960. - 479 с.

109. Вульф А.М. Резание металлов. Л.: Машиностроение, 1973. - 496 с.

110. Талантов Н. В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента.- М.: Машиностроение, 1992.- 240 с.

111. Лоладзе, Т.Н. Стружкообразование при резании металлов /Т.Н, Лоладзе. – М.: Машгиз, 1952. – 200 с.

112. Зворыкин, К.А. Работа и усилие необходимые для отделения металлических стружек /К.А. Зворыкин //М.: «Русская» типо-литография, 1893. – 80 с.

113. Шаламов В.Г., Савельев Д.А. Сметанин С.Д. Получение порошковых материалов ротационным точением //Вестник машиностроения. – 2012. – №. 11. – С. 56-58.

114. Резников А.Н. Теплообмен при резании и охлаждении инструментов. М.: Машгиз. 1963. 200 с.

115. Резников А.Н. Теплофизика резания. М.: Машиностроение. 1969.-288 с.

116. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение. 1981. 279 с.

117. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение. 1990. -288 с.

118. Sasahara H. et al. High-speed rotary cutting of difficult-to-cut materials on multitasking lathe //International journal of machine tools and manufacture. – 2008. – Т. 48. – №. 7. – С. 841-850.

119. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента, М.: Машиностроение, 1982. 320 с.

120. Даниелян А. М. Теплота и износ инструментов в процессе резания металлов. М.: Машгиз. 1954. 276 с.

121. Мелихов, В.В. Контактные процессы на задней поверхности режущего инструмента /В.В. Мелихов. – Тюмень: ТюмИИ. 1989. – 160 с

122. Верещака, А.С. Резание материалов /А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – М.: Высшая школа, 2009. – 535 с.

123. Розенберг, Ю.А. Резание материалов /Ю.А. Розенберг. – Курган: Изд-во ОАО «Полиграфический комбинат» Зауралье, 2007. – 294 с.

124. Клушин, М.И. Резание металлов. Элементы теории пластического деформирования срезаемого слоя /М.И. Клушин. – М.: Машгиз, 1958. – 258 с.

125. Зорев, Н.Н. Расчет проекций силы резания /Н.Н. Зорев. – М.: Машгиз, 1957. – 50 с.

126. Полетика, М.Ф. Приборы для измерения сил резания и крутящих моментов /М.Ф. Полетика. – М., С.: Машгиз, 1963. – 181 с.

127. Klocke F., Brinksmeier E., Weinert K. Capability profile of hard cutting and grinding processes //CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 2005. – Т. 54. – №. 2. – С. 22-45.

128. Matsumoto Y., Hashimoto F., Lahoti G. Surface integrity generated by precision hard turning //CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 1999. – Т. 48. – №. 1. – С. 59-62.

129. Grzesik W., Rech J., Wanat T. Surface finish on hardened bearing steel parts produced by superhard and abrasive tools //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – Т. 47. – №. 2. – С. 255-262.

130. Gordeev, Y. I., Binchurov, A. S., 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.

131. Гордеев, Ю. И. 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.

132. Гордеев, Ю. И. Повышение эффективности использования наноразмерных частиц при изготовлении твердосплавных композитов / Ю. И. Гордеев, А. А. Лепешев, А.С. Бинчуров, В. Б. Ясинский // Нанотехнологии функциональных материалов: Труды международной научно-технической конференции. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2014 - С. 218-220.

133. Гордеев, Ю. И. Повышение стойкости твердосплавного режущего инструмента за счет применения термомеханического упрочнения / Ю. И. Гордеев, А. А. Бинчуров, В. Б. Ясинский, В.Н. Вадимов // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем: III Международной научно-технической конференции молодых специалистов – Железногорск Изд-во ОАО «ИСС», 2014 - С. 161-163.

134. 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.

135. Gordeev Y. I., Abkaryan A. K. Improving hard-alloy strength and tool life by thermomechanical treatment //Russian Engineering Research. – 2013. – Т. 33. – №. 10. – С. 611-614.

136. Гордеев Ю. И. и др. Влияние добавок легирующих керамических наночастиц на структурные параметры и свойства твердых сплавов //Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика МФ Решетнева. – 2013. – №. 3.

137. Семенченко И.Н., Матюшин В.М., Сахаров Г.Н. Проектирование металлорежущих инструментов. М.: Машгиз, 1962. - 949 с.

138. Четвериков С.С. Металлорежущие инструменты. М.: Высшая школа. 1965,-731 с.

139. Металлорежущие станки. Под ред. В.Э. Пуша. М.: Машиностроение, 1985. - 256 с.

140. Талантов Н. В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента.- М.: Машиностроение, 1992.- 240 с.

141. Родин П.Р. Основы теории проектирования режущих инструментов. - М.: Машгиз, 1960. 192 с.

142. Палей М.М. Технология производства режущего инструмента. М.: Машгиз, - 1963.-с. 483.

143. Лашнев С.И., Юликов М.И. Проектирование режущей части инструмента с применением ЭВМ. М.: Машиностроение, 1980. - 207 с.

144. Юликов М.И., Горбунов Б.И., Колесов Н.В. Проектирование и производство режущего инструмента. М.: Машиностроение. - 1987. - с 296.

145. Селиванов А. Н., Насад Т. Г. Расчет экономической эффективности обработки валов методом высокоскоростного фрезоточения //Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 2. – №. 2с (56).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Таблица А.1 – Результаты расчета построчной дисперсии

№ опыта	y_{vj}	$\overline{y}_v$	$(y_{vj} - \overline{y}_v)$	$(y_{vj} - \overline{y}_v)^2$
1	0,847	0,837	0,009	0,0000857
1	0,827	0,837	-0,010	0,0000987
2	1,207	1,215	-0,008	0,0000616
2	1,223	1,215	0,009	0,0000735
3	1,171	1,160	0,011	0,0001296
3	1,151	1,160	-0,009	0,0000747
4	0,617	0,626	-0,009	0,0000803
4	0,638	0,626	0,012	0,0001347 ($S_{v\,max}^2$)
5	0,761	0,751	0,009	0,0000878
5	0,740	0,751	-0,011	0,0001273
6	1,526	1,535	-0,008	0,0000705
6	1,543	1,535	0,008	0,0000705
7	0,991	1,001	-0,010	0,0000918
7	1,011	1,001	0,010	0,0000990
8	1,116	1,125	-0,009	0,0000760
8	1,136	1,125	0,011	0,0001251
9	0,950	0,944	0,006	0,0000341
9	0,940	0,944	-0,004	0,0000168
10	1,083	1,072	0,011	0,0001215
10	1,061	1,072	-0,011	0,0001130
11	0,547	0,536	0,011	0,0001109
11	0,526	0,536	-0,010	0,0001080
12	1,329	1,319	0,010	0,0001039
12	1,308	1,319	-0,011	0,0001203
13	0,921	0,912	0,009	0,0000840
13	0,902	0,912	-0,010	0,0001016
14	1,458	1,447	0,011	0,0001134
14	1,438	1,447	-0,009	0,0000865
15	0,850	0,859	-0,009	0,0000786
15	0,867	0,859	0,008	0,0000635
16	1,242	1,233	0,010	0,0000957
16	1,224	1,233	-0,009	0,0000754
$S_v^2 =$ 0,00018672				

Приложение А

Таблица А.2 – Результаты расчета $(\bar{y}_v - y_v)^2$

№ опыта	$\bar{y}_v$;	y_v	$(\bar{y}_v - y_v)$	$(\bar{y}_v - y_v)^2$
1	0,837	0,83858148	-0,0015815	0,00000250107
2	1,215	1,21384324	0,00115676	0,00000133810
3	1,16	1,15931971	0,00068029	0,00000046279
4	0,626	0,62456971	0,00143029	0,00000204572
5	0,751	0,75084324	0,00015676	0,00000002457
6	1,535	1,53458148	0,00041852	0,00000017516
7	1,001	0,99983148	0,00116852	0,00000136545
8	1,125	1,126105	-0,001105	0,00000122103
9	0,944	0,94530795	-0,001308	0,00000171074
10	1,072	1,07158148	0,00041852	0,00000017516
11	0,536	0,53683148	-0,0008315	0,00000069135
12	1,319	1,32056971	-0,0015697	0,00000246400
13	0,912	0,91209324	-0,00009	0,00000000869
14	1,447	1,44684324	0,00015676	0,00000002457
15	0,859	0,85756971	0,00143029	0,00000204572
16	1,233	1,23283148	0,00016852	0,00000002840
$\sum(\bar{y}_v - y_v)^2 = 0,00001628252;$				

Таблица А.3 - Результат расчета выражения $(\bar{y}_v - \hat{y}_v)^2$

№ точки V	$\bar{y}_v$	$(\bar{y}_v - \hat{y}_v)$	$(\bar{y}_v - \hat{y}_v)^2$
1	0,837	-0,19875	0,0395016
2	1,215	0,17925	0,0321306
3	1,16	0,12425	0,0154381
4	0,626	-0,40975	0,1678951
5	0,751	-0,28475	0,0810826
6	1,535	0,49925	0,2492506
7	1,001	-0,03475	0,0012076
8	1,125	0,08925	0,0079656
9	0,944	-0,09175	0,0084181
10	1,072	0,03625	0,0013141
11	0,536	-0,49975	0,2497501
12	1,319	0,28325	0,0802306
13	0,912	-0,12375	0,0153141
14	1,447	0,41125	0,1691266
15	0,859	-0,17675	0,0312406
16	1,233	0,19725	0,0389076
$\hat{y}_v = 1,03575$			1,188773

Приложение Б

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ОАО «Сибирский инструментально-
ремонтный завод»
Каримов С.А.
2014г.
подпись, м.п.

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования Бинчурова Александра Сергеевича

Результаты диссертационного исследования Бинчурова А.С. на тему «Исследование процесса ротационного точения с использованием в качестве режущих элементов твердосплавных композитов с повышенными эксплуатационными свойствами», имеют реальное практическое значение для предприятия ОАО «Сибирский инструментально-ремонтный завод» (СИРЗ). Работа выполнялась в 2013-2014 годах и была направлена на разработку конструкторской и технологической документации для изготовления инструментальной головки ротационного точения крупногабаритных заготовок типа вал. Метод ротационного точения являются весьма эффективным при механической обработке деталей типа вал на предприятиях машиностроительной и судоремонтной отраслей Красноярского края.

По результатам исследований разработаны рекомендации по оптимизации режимов резания, методики расчета действительной площади среза в зависимости от углов заточки резца и конструктивной подачи. Разработан способ специальной заточки режущей части инструмента (защищено патентом №2463130) с целью повышения эффективности дробления и отвода стружки. Спроектирована и изготовлена инструментальная головка (модуль) для ротационного точения, проведены экспериментальные исследования на образцах и эксплуатационные испытания при обработке изделий типа вала (гребных валов судовых механизмов).

ПЛАНИРУЕМОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Результаты исследования планируется использовать для обработки крупногабаритных деталей типа вал.

Целевая направленность исследований: инструментальная головка и твердосплавные многогранные пластины для ротационного точения при обработке деталей типа вал из вязких, пластичных, легированных и жаропрочных сталей, а также при обработке крупногабаритных валов, заготовок для получения крупных судовых (гребных) валов (ОАО «СИРЗ», ОАО «КрЭВРЗ», ОАО Красноярская судоверфь, ОАО «Красмаш», ОАО Ачинский глиноземный комбинат и др.).

Приложение Б

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ

Форма планируемого внедрения: Инструментальный модуль для ротационного точения многогранными резцами.

Вид и объем внедрения: инструментальный модуль для ротационного точения (до 10 изделий в год), ротационные резцы (до 1000 изделий в год).

Где и когда планируется внедрить: ОАО «Сибирский инструментально-ремонтный завод» в 2014 – 2015г. с перспективой увеличения объема внедрения до 2020г.

ОЖИДАЕМАЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Организационно – технические преимущества применения метода ротационного точения многогранными резцами: увеличивается производительность обработки длинных, нежестких, неуравновешенных, крупногабаритных валов в 1,5÷2 раза.

Ожидаемый социально – экономический результат:

- развитие кооперации «производитель-потребитель» инструмента между предприятиями города и края;
- дополнительные налоговые поступления в краевой бюджет;
- перспективы расширения (тиражирования) результатов на другие предприятия;

Руководитель работы:

Гордеев Ю.И.

Исполнитель:

Бинчуров А.С.

Представители заказчика:

Приложение Б

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер
ООО «Конструкция-инструмент-технологии +»
Ясинский В.Б.
24 января 2014г.
подпись, м.п.

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования Бинчурова Александра Сергеевича

Результаты диссертационного исследования Бинчурова А.С. на тему «Исследование процесса ротационного точения многогранными резцами», имеют реальное практическое значение для предприятия ООО «Конструкция-инструмент-технологии +» (КИТ+). Работа выполнена в 2013г. по плану выполнения НИР между ООО «КИТ+» и ООО «Полимер Групп» (заказчик) и была направлена на разработку конструкций и технологий изготовления многогранных твердосплавных резцов для ротационного точения крупногабаритных заготовок типа вал. Такие оригинальные, нестандартные конструкции режущего инструмента, как и сам метод ротационного точения, являются весьма эффективными к применению в металлообработке, горнодобывающей промышленности, нефтегазодобывающей отрасли (бурение водозаборных и нефтяных скважин), предприятия машиностроительного комплекса, предприятия ремонта дорог, судоремонтной отрасли, геологоразведка и добыча полезных ископаемых Красноярского края, Сибири и Дальнего востока.

По результатам исследований предложены также расчетные модели по определению геометрических параметров режущей части инструментальной головки, приведены методики расчета действительной площади среза в зависимости от углов заточки резца и конструктивной подачи, даны рекомендации по расчету режимов резания. По новой (предлагаемой) кинематической схеме исследованы и определены перспективные направления использования композиционных твердосплавных материалов в ротационном точении. Разработан способ специальной заточки режущей части инструмента (защищено патентом №2463130) с целью повышения эффективности дробления стружки. Спроектирована и изготовлена инструментальная головка (модуль) для ротационного точения и проведения экспериментальных исследований на образцах и эксплуатационных испытаний при обработке изделий.

ПЛАНИРУЕМОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Результаты НИР планируется использовать для изготовления многогранных твердосплавных пластин и инструментальных модулей для ротационного точения.

Приложение Б

Целевая направленность исследований: твердосплавные многогранные пластины для ротационного точения деталей типа вал из вязких, пластичных, а также легированных и жаропрочных сталей, а также при обработке крупногабаритных валов, корпусных деталей, заготовок для получения крупных элементов двигателей и редукторов экскаваторов, деталей и узлов нефтегазового комплекса, судовых (гребных) валов, бурового инструмента, угольных и вскрышных комбайнов (предприятия ОАО «СУЭК», ЗАО «Ванкорнефть», ООО «СИРЗ», ОАО «КрЭВРЗ», ОАО Красноярская судоверфь, ОАО «Красмаш» и др.).

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ

Форма планируемого внедрения: Инструментальный модуль для ротационного точения многогранными резцами, твердосплавные многогранные резцы.

Вид и объем внедрения: твердосплавные многогранные пластины (до 1000 изделий в год); инструментальный модуль для ротационного точения (до 10 изделий в год).

Где и когда планируется внедрить: ООО «Конструкция-инструмент-технологии +» в 2014 – 2015 г. с перспективой увеличения объема внедрения до 2020г.

ПОЛУЧЕННЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

ОЖИДАЕМАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Организационно – технические преимущества применения метода ротационного точения многогранными резцами: увеличивается производительность обработки длинных, нежестких, неуравновешенных, крупногабаритных валов в 1,5÷2 раза.

Ожидаемый социально – экономический результат:

- создание новых рабочих мест на предприятиях края;
- развитие кооперации «производитель-потребитель» инструмента между предприятиями края;
- импортозамещение;
- дополнительные налоговые поступления в краевой бюджет;
- перспективы экспорта;
- годовой экономический эффект от внедрения НИР составляет 900 000 руб.

Руководитель работы:
Гордеев Ю.И.

Исполнитель:
Бинчуров А.С.

Представители заказчика:
Ясинский В.Б.

Приложение В

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 463 130** (13) **C1**

(51) МПК
B23B 27/12 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2011128910/02, 12.07.2011

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
12.07.2011

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 12.07.2011

(45) Опубликовано: 10.10.2012 Бюл. № 28

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: SU 126375 A, 30.11.1984. SU 1049194 A, 23.10.1983. SU 1224106 A, 15.04.1986. RU 2119408 C1, 27.09.1998. US 2007/0101837 A1, 10.05.2007.

Адрес для переписки:
660074, г.Красноярск, ул. Киренского, 26, СФУ, отдел правовой охраны и защиты интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):
Индаков Николай Степанович (RU),
Гордеев Юрий Иванович (RU),
Бинчуров Александр Сергеевич (RU)

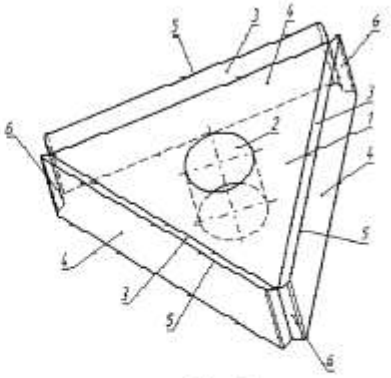
(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования Сибирский федеральный университет (СФУ) (RU)

RU 2463130 C1

(54) РОТАЦИОННЫЙ РЕЗЕЦ

(57) Реферат:

Ротационный резец выполнен в виде многогранного тела, режущая кромка режущей части которого имеет полигональную форму в плоскости, перпендикулярной оси его вращения. Для повышения технологичности за счет упрощения затачивания режущая часть многогранного тела, на вершинах которого выполнены разделительные канавки, состоит из N зубьев, режущая кромка каждого зуба прямолинейная, а его передняя поверхность зуба выполнена под углом γ к плоскости резания от 2 до 5 градусов. Вершины многогранного тела могут быть выполнены с радиусом скругления r от 0,1 до 0,4 мм. 1 з.п. ф-лы, 6 ил.



Фиг. 1

Приложение В

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 548 846** (13) **C2**

(51) МПК
C22C 29/08 (2006.01)
B22F 3/12 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013135523/02, 29.07.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
29.07.2013

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 29.07.2013

(43) Дата публикации заявки: 10.02.2015 Бюл. № 4

(45) Опубликовано: 20.04.2015 Бюл. № 11

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: SU 1749286 A1, 23.07.1992. BY 20111630 A, 30.06.2013. BY 15711 C1, 30.04.2012. EP 1054071 A2, 22.11.2000

Адрес для переписки:
660014, г.Красноярск, а/я 486, СибГАУ, отдел интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):
Гордеев Юрий Иванович (RU),
Бинчуров Александр Сергеевич (RU),
Индаков Николай Степанович (RU),
Абкарян Артур Карлосович (RU),
Ясинский Виталий Брониславович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева" (RU)

RU 2548846 C2

(54) СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ СПЕЧЕННЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

(57) Реферат:

Изобретение относится к порошковой металлургии, а именно к спеченным твердым сплавам, и может быть использовано для изготовления инструмента. Способ получения спеченных твердых сплавов на основе карбида вольфрама, содержащего кобальт и наноразмерные частицы оксида алюминия, включает приготовление шихтовой смеси сплава, пластифицирование, гранулирование, прессование и спекание. Шихтовую смесь сплава приготавливают путем предварительного замешивания оксида алюминия в водном растворе поливинилового спирта ультразвуковым диспергированием до получения суспензии, размола-смешивания суспензии с зернами карбида вольфрама до образования на его поверхности плакирующего слоя, дошихтовки кобальтом и последующего перемешивания. Пластифицирование проводят в водном растворе поливинилового спирта. Повышается прочность твердого сплава за счет обеспечения более равномерного распределения наноразмерных частиц по объему структуры твердого сплава. 1 табл.

RU 2548846 C2

Приложение В

Формула изобретения

Способ получения спеченных твердых сплавов на основе карбида вольфрама, содержащего кобальт и наноразмерные частицы оксида алюминия, включающий приготовление шихтовой смеси сплава, пластифицирование, гранулирование, прессование и спекание, отличающийся тем, что приготовление шихтовой смеси сплава осуществляют путем предварительного замешивания оксида алюминия в водном растворе поливинилового спирта ультразвуковым диспергированием до получения суспензии, размола-смешивания суспензии с зернами карбида вольфрама до образования на его поверхности плакирующего слоя, дошихтовки кобальтом и последующего перемешивания, а пластифицирование проводят в водном растворе поливинилового спирта.