

Министерство образования и науки  
Донецкой Народной Республики  
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»

*На правах рукописи*



**Петряева Ирина Алексеевна**

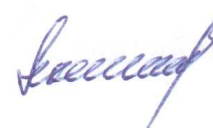
**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ  
ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЕРДОСПЛАВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ  
С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ С ФУНКЦИОНАЛЬНО-  
ОРИЕНТИРОВАННЫМИ СВОЙСТВАМИ**

05.02.08 – Технология машиностроения

**Диссертация**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Михайлов А. Н.



Донецк - 2016

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ.....	12
1.1. Анализ особенностей токарной обработки фасонных поверхностей деталей машин.....	12
1.2. Анализ переменности процесса токарной обработки фасонных поверхностей.....	18
1.3. Анализ существующих способов повышения эффективности обработки фасонных поверхностей деталей.....	22
1.4. Цель и задачи работы.....	29
РАЗДЕЛ 2. ОБЩИЙ ПОДХОД И МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ.....	31
2.1. Общий подход и методика повышения эффективности обработки фасонных поверхностей деталей.....	31
2.2. Исследование переменности и взаимного влияния параметров токарной обработки фасонных поверхностей .....	37
2.2.1. Переменность геометрических параметров инструмента при обработке фасонной поверхности.....	37
2.2.2. Переменность параметров среза поверхностного слоя и скорости резания.....	41
2.2.3 Переменность параметров стружкообразования.....	45
2.2.4 Исследование переменности сил резания при обработке фасонных поверхностей.....	47
2.3. Разработка блок-схемы работы.....	52
2.4. Выводы.....	54
РАЗДЕЛ 3. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОСТИ ДЕЙСТВУЮЩИХ ОГРАНИЧЕНИЙ.....	55

3.1. Обоснование критериев оптимизации.....	55
3.2 Исследование переменности ограничений, действующих при обработке фасонных поверхностей.....	59
3.2.1. Обоснование выбора действующих ограничений.....	59
3.2.2. Определение переменных тепловых потоков и температур резания...	60
3.2.3. Определение переменных параметров шероховатости обработанных поверхностей.....	70
3.3 Определение оптимальных по различным критериям режимов резания при чистовом точении фасонных поверхностей.....	75
3.3.1. Обеспечение максимальной производительности обработки.....	75
3.3.2. Обеспечение минимальной себестоимости обработки.....	77
3.3.3. Обеспечение минимального соотношения себестоимости и производительности на основе мультипликативной свертки критериев.....	79
3.3.4. Сравнительный анализ оптимальных режимов резания при чистовом точении фасонных поверхностей, рассчитанных по различным критериям.....	80
3.4. Выводы.....	85
<b>РАЗДЕЛ 4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТВЕРДОСПЛАВНОЙ ПЛАСТИНЫ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ С ФУНКЦИОНАЛЬНО- ОРИЕНТИРОВАННЫМИ СВОЙСТВАМИ.....</b>	<b>87</b>
4.1. Особенности применения функционально-ориентированного подхода при реализации технологических процессов обработки.....	87
4.2. Функционально-ориентированный подход при нанесении износостойких покрытий с целью обеспечения эксплуатационных свойств функциональных элементов твердосплавной пластины.....	94
4.3. Анализ эффективности обеспечения эксплуатационных функций элементов твердосплавной пластины за счет применения износостойких покрытий с функционально-ориентированными свойствами.....	97
4.4. Выводы.....	107

РАЗДЕЛ 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. ОСНОВНЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ РАБОТЫ.....	109
5.1. Основные методические положения экспериментальных исследований.....	109
5.1.1. Обрабатываемый инструмент и обрабатываемый материал.....	109
5.1.2. Методика стойкостных исследований.....	112
5.1.3. Методика исследования влияния износостойких покрытий на силу резания и температуру в зоне стружкообразования.....	116
5.2. Исследование влияния износостойких покрытий на стойкость инструмента.....	118
5.3. Влияние износа твердосплавных пластин с покрытием на шероховатость обработанной поверхности.....	129
5.4 Исследование силы и температуры резания при обработке инструментами с износостойкими покрытиями .....	133
5.5. Основные рекомендации работы.....	139
5.6. Внедрение результатов работы в производство.....	
5.7. Выводы.....	145
Заключение.....	147
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	150
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	
Программа определения параметров шероховатости поверхностного слоя при точении фасонных поверхностей.....	166
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	
Программа многокритериальной оптимизации режимов резания при чистовом точении фасонных поверхностей в условиях переменности действующих ограничений.....	174
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	
Программа многокритериальной оптимизации режимов резания при чистовом точении фасонных поверхностей.....	182
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	
Акты внедрения результатов работы в производство и учебный процесс...	186



## ВВЕДЕНИЕ

Условия современного машиностроения определяют непрерывное совершенствование технологии производства изделий и повышение ее эффективности. Обеспечение высокопроизводительной обработки изделий машиностроения требует комплексного учета большого количества факторов, характеризующих множество элементов со сложными связями между ними. При этом, повышение эффективности производства достигается различными способами, что ставит задачу выбора среди множества вариантов наиболее рационального по некоторому критерию и обеспечивающего заданные параметры качества изготавливаемых изделий.

Совершенствование технологических процессов и способов обработки сопровождается повышением производительности, однако для выпуска конкурентоспособной продукции достаточно важным условием является снижение затрат на ее производство.

**Актуальность темы исследования.** Фасонные детали, поверхности которых сформированы криволинейной образующей, достаточно широко используются в различных машинах и механизмах. Механическая обработка таких поверхностей довольно затруднительна и обеспечивается сложной кинематикой движения режущего инструмента относительно обрабатываемой заготовки, а также характеризуется переменными значениями технологических факторов, определяющих условия обработки.

Процесс токарной обработки фасонной поверхности существенно отличается от обработки цилиндрической поверхности, т. к. имеет ярко выраженный переменный характер. Это обусловлено изменением ряда геометрических параметров процесса резания: траектория формообразующего движения, непрерывно изменяющееся направление подачи, изменение мгновенных значений ширины и толщины среза, изменение кинематических углов в плане, кинематических переднего и заднего углов. Как результат, наблюдается изменение сил и температур резания, шероховатости вдоль образующей фасонной поверхности, что в свою очередь влияет на выбор режимов резания – скорости, подачи.

В качестве представителей рассматриваемой группы деталей выбраны ро-

лики прокатного оборудования, направляющие и задающие движение заготовок и проката. Детали эксплуатируются в довольно тяжелых условиях и требуют регулярной замены по причине износа рабочих поверхностей. В связи с этим, актуальной является задача повышения производительности и снижения себестоимости их обработки на токарных операциях.

Важным фактором повышения эффективности обработки фасонных поверхностей является обоснование рациональных условий ее выполнения. В связи с этим весьма актуальны исследования по оптимизации режимов резания, обеспечивающих для заданных условий обработки и требований к качеству обработанных поверхностей максимальную производительность и минимальную себестоимость, что определяет повышение рентабельности машиностроительного производства.

На основе анализа токарной обработки обоснована необходимость учета силовых и температурных ограничений, а так же ограничений по шероховатости обработанной поверхности, которые в случае токарной обработки фасонных поверхностей являются переменными и требуют специальных подходов для их определения.

Перспективным вариантом решения проблемы повышения эффективности токарной обработки фасонных деталей является использование современного твердосплавного инструмента с функционально-ориентированными покрытиями особой структуры, что позволяет максимально повысить их общие эксплуатационные свойства за счет местного увеличения характеристик отдельных элементов, поверхностей и/или зон изделия в зависимости от функциональных местных особенностей их эксплуатации.

**Степень разработанности темы.** Вопросам высокоэффективной обработки резанием посвящено большое количество научных трудов отечественных и зарубежных ученых (среди которых стоит отметить работы Базрова Б.М., Безъязычного В.Ф., Братана С.М., Бутенко В.И., Витренко В.А., Гильмана А.М., Гусева В.В., Гордиенко Б.И., Дальского А.М., Ермакова Ю.М., Лукичева А.В., Макарова А.Д., Маталина А.А., Михайлова А.Н., Рыжова Э.В., Старкова В.К., Хандожко А.В. и др.).

Выполненные исследования позволили установить, что в настоящее время практически отсутствует информация по обоснованию выбора рациональных па-

раметров процесса резания с учетом особенностей обработки фасонных поверхностей. В настоящее время достаточно хорошо разработаны методы оптимизации процессов резания по критериям максимальной производительности или минимальной себестоимости, однако эти методики определения оптимальных режимов резания не учитывают переменности параметров обработки фасонных поверхностей, что требует дальнейшего их развития. Перспективным направлением оптимизации режимов резания является решение многокритериальных задач, обеспечивающих одновременное улучшение параметров обработки по различным критериям. Основную трудность при определении режимов резания для инструментов с износостойкими покрытиями представляет обоснование технических ограничений, информация о которых практически отсутствует, что требует проведения специальных как теоретических, так и экспериментальных исследований.

На данный момент рациональность применения инструмента с функционально-ориентированными покрытиями, способными обеспечить его высокие эксплуатационные характеристики на местном уровне, подтверждена многочисленными исследованиями. Потому перспективным является повышение эффективности обработки фасонных поверхностей твердосплавным инструментом с покрытиями в условиях переменности параметров процесса резания.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является повышение производительности и снижение себестоимости токарной обработки фасонных деталей при заданном уровне качества поверхности в условиях переменности параметров процесса резания на основе комплексного обеспечения оптимальных режимов обработки и применения твердосплавного инструмента с функционально-ориентированными свойствами.

Для достижения поставленной цели, решались следующие задачи:

1. Выполнить анализ особенностей и способов технологического обеспечения эффективности и качества обработки фасонных поверхностей деталей машин.
2. Разработать принципы и методику повышения эффективности токарной обработки фасонных поверхностей в условиях переменности параметров процесса резания.

3. Установить закономерности формирования и связи шероховатости поверхности, силовых и температурных характеристик процесса резания с учетом изменяющихся геометрических параметров и параметров среза в процессе обработки. Разработать методику многокритериальной оптимизации режимов токарной обработки фасонных поверхностей с учетом переменности параметров процесса резания и технических ограничений.

4. Исследовать особенности применения функционально-ориентированного подхода для обеспечения функциональных свойств твердосплавного инструмента и обосновать выбор материала и структуры износостойких покрытий.

5. Экспериментально установить влияние изнашивания лезвия инструмента на формирование шероховатости обработанной поверхности, оценить повышение стойкости инструмента и снижение температуры резания при точении твердосплавными резцами с износостойкими покрытиями.

6. Разработать рекомендации по повышению эффективности токарной обработки фасонных поверхностей за счет выбора оптимальных режимов резания и применения инструментов с функционально-ориентированными покрытиями. Внедрить результаты работы в производство.

**Объект исследования.** Процесс токарной обработки фасонных поверхностей твердосплавным инструментом с износостойкими покрытиями с функционально-ориентированными свойствами.

**Предмет исследования.** Технологические показатели токарной обработки фасонных поверхностей деталей.

#### **Научная новизна полученных результатов.**

1. Впервые теоретически установлены и экспериментально подтверждены зависимости температур резания и параметров шероховатости обработанной поверхности от режимов обработки, отличающиеся учетом переменности параметров процесса резания при точении фасонных поверхностей инструментами с износостойкими покрытиями.

2. Получила дальнейшее развитие методика выбора оптимальных режимов резания и оценки эффективности точения фасонных поверхностей инструментами

с износостойкими покрытиями на базе многокритериальной оптимизации в условиях переменности технических ограничений по температуре резания и шероховатости обработанной поверхности.

3. Предложены и обоснованы на основе функционально-ориентированного подхода рациональные структура и вид покрытий для твердосплавного инструмента, обеспечивающего возможность обработки с учетом переменности параметров процесса резания при точении фасонных поверхностей.

### **Практическая значимость работы.**

1. Обоснованные рекомендации по выбору оптимальных режимов резания в условиях токарной обработки фасонных поверхностей позволяют повысить производительность обработки резцами с покрытием карбидом титана TiC в 1,5 раза, нитридом титана TiN в 2,3 раза и снизить себестоимость обработки в 1,2 раза и в 1,7 раза соответственно.

2. Применение твердосплавного инструмента с покрытиями с функционально-ориентированными свойствами на основе карбида титана TiC и нитрида титана TiN позволяет снизить температуру в функциональных зонах твердосплавной пластины до 27% за счет обоснованного сочетания режимов обработки и инструментальных материалов с точки зрения тепловых процессов, происходящих в зоне резания.

3. Экспериментально установленные закономерности изменения температуры резания, шероховатости обработанной поверхности и стойкости инструмента с износостойкими покрытиями могут быть использованы в качестве ограничений при решении задач оптимизации. При точении фасонных поверхностей применение твердосплавных инструментов с покрытиями позволяет повысить оптимальные режимы обработки: подачу до 10% для резцов с покрытиями из карбида титана TiC, из нитрида титана TiN до 23% и скорость до 20% и 43% соответственно, по сравнению с инструментами без покрытий.

4. Результаты работы внедрены в производство на предприятии ООО «Научно-производственное объединение «Донвентилятор» с ожидаемым экономическим эффектом в размере 17500 рос.руб, Луганском ЧП «Депла» - 14500 рос.руб, а также в учебном процессе кафедры «Технология машиностроения» Донецкого

национального технического университета.

**Методы и методология исследования.** Для решения поставленных задач исследования и получения результатов, обладающих новизной, использован следующий комплекс методов и научных положений: положения теории резания и теплофизики процесса резания; основные положения и методы технологии машиностроения и теории оптимизации; методы и принципы функционально-ориентированных технологий машиностроения; метод конечных элементов; методы математического моделирования и статистики - для выбора оптимальных параметров процесса резания, а также для проверки значимости полученных математических моделей. Экспериментальные исследования базировались на методах планирования эксперимента; обработку результатов экспериментов проводили с помощью статистических методов.

**Положения, выносимые на защиту.**

- научное положение о том, что высокопроизводительная токарная обработка фасонных поверхностей обеспечивается за счет выбора оптимальных режимов с учетом переменности параметров процесса резания, что дает возможность получить более полную оценку повышения производительности обработки с использованием твердосплавного инструмента с покрытиями;

- научное положение о том, что обработка фасонных поверхностей в условиях переменности параметров процесса резания сопровождается существенным (до двух раз) повышением сил и температур резания в отдельных точках поверхности. Это обуславливает необходимость применения твердосплавного инструмента с покрытиями с функционально-ориентированными свойствами;

- аналитические зависимости, описывающие характер изменения параметров обработки вдоль криволинейной образующей фасонной поверхности;

- теоретические зависимости, определяющие ограничения по шероховатости поверхности и температуре резания, при многокритериальной оптимизации режимов обработки с учетом переменности параметров процесса резания;

- методика многокритериальной оптимизации, позволяющая давать обоснованные рекомендации по выбору оптимальных режимов резания в условиях при-

менения инструментов с покрытием с учетом переменности параметров процесса токарной обработки фасонных поверхностей;

- результаты теоретических и экспериментальных исследований по оценке снижения температуры резания, шероховатости обработанной поверхности и повышения стойкости инструмента за счет применения твердосплавного инструмента с износостойкими покрытиями.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается корректностью применения математического аппарата и научных теорий, адекватностью разработанных моделей, применением современного оборудования; допустимой сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, эффективностью внедрения результатов исследования на промышленных предприятиях.

Основные положения и результаты исследования, которые представлены в диссертации, были представлены и обсуждены: на международных научно-технических конференциях: «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, Россия, 2013 г., 2015 г.), на Международной научно-технической конференции «IMANE 2014 Conference» (г. Кишинев, Молдова), на международном научно-техническом семинаре «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы» (г. Таганрог, Россия, 2014 г.). В полном объеме диссертация докладывалась на расширенном семинаре кафедры «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из титульного листа, оглавления, введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, содержащего 165 наименований, 4 приложений с компьютерными программами выполненных расчетов и актами внедрения результатов работы. Диссертация содержит 73 рисунка и 17 таблиц. Объем основного текста – 145 страниц.

## АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ.

### ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

#### 1.1. Анализ особенностей токарной обработки фасонных поверхностей деталей машин

В машиностроении широкое распространение получили детали, сложной формы, поверхность которых ограничена сложным фасонным профилем. К таким деталям относят ковочные, вырубные и вытяжные штампы; матрицы и пуансоны пресс-форм; фасонные валки для прокатки и волочения; подающие и калибровочные валки правильных станков; оправки для раскатки; бегунки колесных, гусеничных, подъемно-транспортных машин; объемные копиры; копировальные ролики и пальцы; направляющие аппараты и др. Несмотря на различное функциональное назначение указанных деталей, они объединены схожими техническими требованиями, связывающими точность размеров, формы и расположения фасонного профиля с точностью изготовления базовых (посадочных) поверхностей.

Под деталями сложной формы подразумеваются детали, включающие сложные поверхности. Сложной или фасонной называется поверхность, специально отличающаяся по форме от цилиндрической или плоской поверхности. Обрабатываемые поверхности деталей относят к фасонным, если они образованы криволинейной образующей, комбинацией прямолинейных образующих, расположенных под различными углами к оси детали, или комбинацией криволинейных и прямолинейных образующих. Фасонные поверхности, входящие в конструкцию деталей сложной формы принято делить на следующие основные группы: 1) конические; 2) фасонные и сферические поверхности вращения; 3) прямолинейно- или линейчато-фасонные; 4) объемно- фасонные (Рисунок 1.1). [66]

Согласно классификации [66] фасонные поверхности деталей делят на:



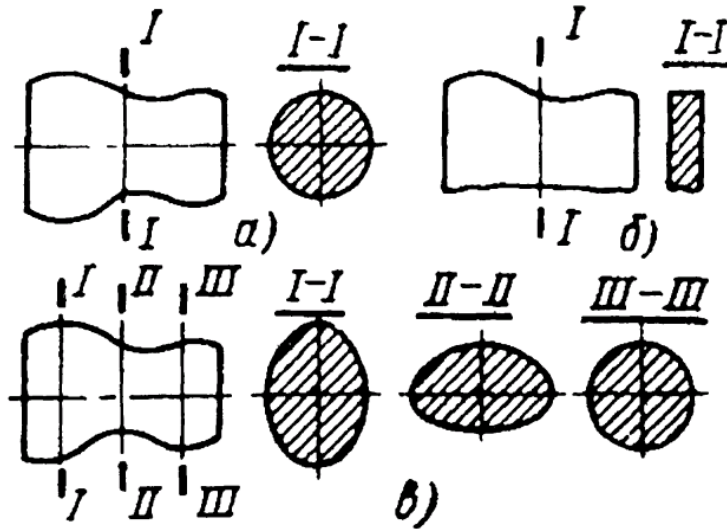


Рисунок 1.1. Типы фасонных поверхностей

(радиусные переходы от хвостовой части к рабочей у лопатки турбины и др.).

Детали сложной формы, имеющие фасонные поверхности получили широкое распространение, поэтому технологические процессы их изготовления, имеющие некоторые особенности, требуют пристального рассмотрения и усовершенствования с учетом современных тенденций. Существующие традиционные технологические процессы обработки фасонных поверхностей, рассмотренные в работах Грановского Э.Г., Дальского А.М., Дружинского И.А, Фираго В.П., Ящерицына П.И. и др. [23, 28, 37, 57, 64, 87, 93, 123, 134, 142, 156, 157] сводятся к применению одного из двух основных методов:

- фасонным режущим инструментом (резец, протяжка, фреза, зенкер, шлифовальный круг), форма режущей кромки которого соответствует форме обрабатываемой фасонной поверхности и копирует ее;

- простым режущим инструментом (резец, фреза, шлифовальный круг), режущее лезвие которого находится в точечном или линейчатом контакте с обрабатываемой фасонной поверхностью.

Очевидно, что первый способ обработки более производителен, однако менее экономичен по причине необходимости проектирования и изготовления специального режущего инструмента [39, 109, 144]. К тому же возможность применения фасонного режущего инструмента непосредственно зависит от размеров и

- алгебраические, т.е. описываемые математическими уравнениями (линейчатые, нелинейчатые, винтовые);

- с числовыми табличными координатами для отдельных точек (профили пера лопаток и т.д.);

- конструктивные, обусловленные конструктивной необходимостью;

- переходные поверхности

формы обрабатываемой поверхности. Во втором случае образование фасонной поверхности обеспечивается кинематикой процесса обработки, которая сообщает инструменту соответствующее криволинейное движение относительно обрабатываемой заготовки, что обеспечивается применением копировальных систем или станков с числовым программным управлением (ЧПУ).

Увеличение номенклатуры изготавливаемых деталей, а также сложности их геометрических форм ставило новые задачи формообразования, что привело к усовершенствованию компьютерных систем станков с ЧПУ, обеспечивая широкие возможности управления процессом механообработки [27, 82, 100, 148].

Обработка фасонных поверхностей на станках с ЧПУ - это прогрессивная ступень обработки на станках с программным управлением [20, 24, 27, 48, 76]. Отличие состоит в том, что в этом случае физический программноноситель (копир) заменен программой обработки, записанной на определенном языке программирования. Это позволяет резко повысить точность, гибкость и мобильность системы обработки в целом. Наибольшее применение при обработке сложных деталей получили станки токарной и фрезерной групп, а также многоцелевые станки [66, 142].

Обработка деталей сложной формы на станках с ЧПУ открывает новые возможности обеспечения эксплуатационных свойств фасонных поверхностей. Это связано с тем, что системы ЧПУ позволяют программно изменять режимы обработки по заранее заданному закону [113]. Если этот закон соответствует закону изменения условий эксплуатации, то реализуется возможность адаптации фасонной поверхности в ходе обработки к переменным условиям эксплуатации в функции ее координат (длина, угол поворота и др.). В результате можно получить поверхность, например, равного износа. Такое решение задачи в обычных системах обработки деталей сложной формы невозможно.

Анализ литературных источников [1, 20, 82, 100, 101, 102, 113,] показал, что далеко не все системы автоматического управления строятся по оптимизационному алгоритму, а системы проектирования управляющих программ для станков с ЧПУ не способны проектировать оптимальную технологию или учитывают толь-

ко геометрические условия формообразования поверхности детали [111]. К тому же современные тенденции развития программных продуктов показывают, что их усовершенствование происходит в направлении оптимизации процесса резания и всей технологической обрабатывающей системы при проектировании управляющих программ для станков с ЧПУ.



Рисунок 1.2. Направляющие ролики прокатного оборудования

В качестве представителей рассматриваемой группы деталей выбраны ролики прокатного оборудования, направляющие и задающие движение заготовок и проката (рисунок 1.2), используемые в вводных роликовых проводках мелкосортных и проволочных станков. Детали эксплуатируются в довольно тяжелых условиях и требуют регулярной замены по причине износа рабочих поверхностей. [9, 19, 78, 99, 120].

В целом к роликам и валкам прокатного оборудования предъявляются следующие технические требования [18, 108]:

1. Высокая и равномерная твердость поверхностного слоя, что обеспечивает повышение износостойкости, снижает степень повреждаемости рабочего слоя.
2. Сопротивление термической усталости и повышенная теплостойкость.
3. Высокая износостойкость.
4. Стойкость против образования поверхностных дефектов: трещин, отслоений, отколов, выкрошек, шелушения.
5. Высокое качество поверхности после термической и механической обработки. Отсутствие дефектов механической обработки.
6. Высокие механические свойства (в т. ч. предел усталости) для обеспечения необходимой прочности.
7. Отсутствие металлургических дефектов и загрязнений в стали.

8. Строгое соответствие конструктивных размеров детали заданным по чертежу. Жесткие требования к отклонениям формы профиля фасонной поверхности.

При эксплуатации в рассматриваемых деталях возникают напряжения, вызванные силовым воздействием проката, от действия тепловых факторов. В результате процессов трения между поверхностями роликов и транспортируемым металлом происходит износ этих поверхностей, и как следствие, выход детали из строя [25, 47, 51, 67, 117, 137]. Вопросам технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин в процессе изготовления посвящено большое количество исследований известных ученых: Базрова Б.М., Безъязычного В.Ф., Дьяченко П.Е., Маталина А.А., Петрешина Д.И., Рыжова Э.В., Суслова А.Г., Шнейдера Ю.Г. [5, 8, 63, 103, 105, 118, 128, 132, 153, 154]. Эксплуатационные свойства деталей и их соединений (износостойкость, жесткость и прочность, герметичность соединений, прочностью посадок) определяют основной показатель качества машин – надежность [141, 151].

Точность изготовления роликов, направляющих и задающих движение заготовок и проката в прокатной клети соответствует 7-8 качеству. При этом рациональный выбор материала в сочетании с высокой точностью изготовления и соответствующей термической обработкой обеспечивают их высокую износостойкость при эксплуатации.

Анализ литературных источников показал, что вопросы обеспечения высокой точности обработки деталей в целом, и фасонных деталей (когда показатели качества являются переменными вдоль профиля) достаточно хорошо изучены [23, 28, 57, 62, 84, 85]. Обеспечение точности в рассмотренных работах достигается путем управления процессами проектирования и изготовления формообразующего инструмента, разработки технологических процессов обработки деталей с учетом явлений технологической наследственности и взаимного влияния показателей качества поверхности, применения оборудования с программным управлением и стабилизации кинематических параметров инструмента.

Однако следует отметить, что для решения задачи обеспечения точности обработки авторами выполнены исследования для цилиндрических поверхностей

и не учитывают особенностей обработки деталей с фасонным профилем. В работах, посвященных обработке фасонных поверхностей решение этой задачи определяется назначением переменных режимных условий обработки с использованием методик, учитывающих только один или несколько переменных параметров. Для эффективного управления процессом обработки в этом случае целесообразно выполнять на основе методик, учитывающих весь комплекс переменных параметров процесса и их взаимосвязь.

Под качеством продукции понимают совокупность свойств в мере полезности продукции, удовлетворяющих определенным общественным и личным потребностям в соответствии с её назначением. Улучшение качества – важное условие повышения эффективности производства [71, 72, 139].

Геометрия реальной поверхности любой, даже тщательно обработанной детали, в значительной мере отличается от идеальной. На ней имеются макро- и микронеровности различной величины. В современной литературе [38, 46, 127, 155] неровности поверхности принято условно делить на макроотклонения, волнистость, шероховатость и субшероховатость.

Поскольку термическая обработка заготовок роликов после токарной обработки вызывает деформации заготовки, то механообработка должна обеспечить заданный уровень качества поверхностного слоя и размерную точность, чтобы снизить объем отделочных операций. Шероховатость рабочих поверхностей данных деталей в пределах  $R_a 2,5 - 3,2$  мкм обусловлена условиями эксплуатации. Уровень оптимальной шероховатости, при которой коэффициент трения  $k_{mp}$  предотвращает буксование или проскальзывание заготовок и проката.

В работах Сулова А. Г. [38, 46, 86], Безъязычного В. Ф. [6, 7, 8] приведены универсальные теоретические зависимости для определения эксплуатационных свойств деталей с учётом параметров состояния поверхностного слоя (шероховатости, волнистости, макроотклонений и физико-механических свойств). Так предложено определять высоту профиля шероховатости как сумму следующих составляющих [38]:

$$R_z = h_1 + h_2 + h_3 + h_4,$$

где  $h_1, h_2, h_3, h_4$  – составляющие профиля шероховатости обусловленные соответственно, геометрическими параметрами инструмента, относительными вибрациями режущего инструмента и заготовки, физико-механическими свойствами материалов, шероховатостью кромок режущего инструмента.

Составляющая профиля шероховатости, обусловленная геометрией инструмента и его перемещением - это геометрический след режущего инструмента. Поэтому геометрические параметры режущего инструмента являются главным фактором формирования этой составляющей профиля шероховатости [38]:  $r$  - радиус при вершине режущей кромки,  $\varphi$  – главный угол в плане,  $\varphi_1$  — вспомогательный угол в плане,  $S$  - подача режущего инструмента.

Анализ рассмотренных работ выявил возможность оценки и влияния составляющих процесса резания на формирование заданных параметров качества обработки лишь при постоянных режимах, геометрии процесса резания и параметрах среза. Однако, применение математических зависимостей для прогнозирования параметров шероховатости обработанной поверхности не вполне целесообразно для фасонных поверхностей деталей машин, поскольку указанные параметры инструмента постоянно изменяются вдоль криволинейной образующей. В работах, посвященных обеспечению постоянства шероховатости фасонных поверхностей [4,10, 61, 97, 149] рассмотрены вопросы учета лишь некоторых из них, что также не характеризует достоверность и полноту полученных результатов. Поэтому, обеспечение заданного уровня шероховатости вдоль криволинейной образующей следует выполнять на основании комплексного учета изменяющихся условий обработки фасонных поверхностей деталей.

## 1.2. Анализ переменности процесса токарной обработки фасонных поверхностей

Процесс обработки фасонной поверхности существенно отличается от обработки цилиндрической поверхности, т. к. имеет ярко выраженный переменный характер. Это обусловлено изменением ряда геометрических параметров процесса

резания: траектория формообразующего движения, непрерывно изменяющееся направление подачи, изменение мгновенных значений ширины и толщины среза, изменение кинематических углов в плане, кинематических переднего и заднего углов. В зависимости от этого наблюдается изменение режимов резания – скорости, подачи, сил резания.

Процесс обработки на станках с ЧПУ существенно отличается от данного процесса на станках с ручным управлением. Это обусловлено изменением ряда геометрических и физических параметров процесса. При обработке криволинейного участка детали на станке с ЧПУ резец перемещается по криволинейной траектории. Рабочая плоскость непрерывно изменяет свое положение [148, 115]. В работах [100, 101, 148] отмечается, что изменение кинематических углов в плане влияет на выбор инструментальных углов в плане, соотношение между толщиной и шириной среза, коэффициент укорочения стружки, изменение силы резания при обработке криволинейного участка поверхности, температуру резания, изнашивание

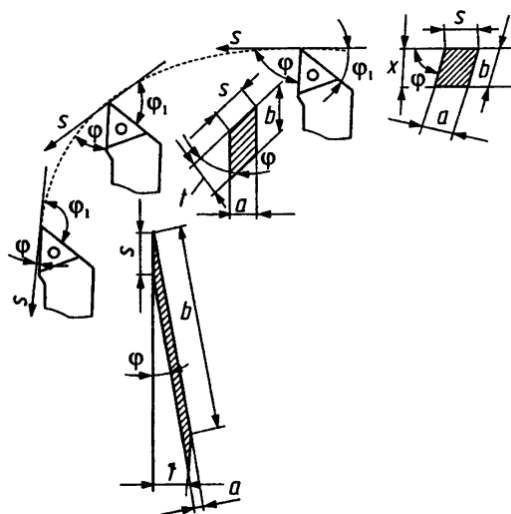


Рисунок 1.3. Углы в плане и сечения среза при обработке криволинейного участка детали

и стойкость инструмента, направление схода стружки, действительную геометрию инструмента (от угла схода стружки зависит действительный передний угол резца), шероховатость, выбор межоперационных припусков и запас точности.

При уменьшении угла  $\varphi$  увеличении ширина среза возрастает, а толщина уменьшается, хотя номинальная площадь среза остается постоянной. Поскольку значение величин  $a$  и  $b$  на главную составляющую силы резания описывается зависимостью

При обработке криволинейного участка детали резец перемещается по криволинейной траектории (рисунок 1.3). При этом подача непрерывно изменяет свое направление, главный угол в плане  $\varphi$  уменьшается, а вспомогательный  $\varphi_1$  - увеличивается. При уменьшении

$P_z = C_{P_z} a^{0.75} b$  [135], при перемещении резца по криволинейной траектории наблюдается изменение уровня сил резания.

Изменение углов в плане влияет на шероховатость обработанной поверхности. Изменение высоты микронеровностей на криволинейном участке наблюдается при обработке острозаточенным резцом и при участии в работе одновременно прямолинейной и радиусной режущих кромок. При резании только радиусной кромкой шероховатость остается практически неизменной [148].

Изменение углов в плане оказывает влияние на направление схода стружки, которое перпендикулярно к диагонали сечения среза (рисунок 1.3). Угол схода стружки  $\rho$  зависит от углов  $\varphi$  и  $\varphi_1$  и отношения  $b/a$ . При больших значениях отношения  $b/a$  стружка сходит примерно перпендикулярно к главной режущей кромке, а при малых значениях – примерно перпендикулярно к вспомогательной режущей кромке. От угла схода стружки зависит действительный передний угол резца, а также соотношение составляющих сил резания  $P_x$  и  $P_y$ .

При обработке криволинейного контура (рисунок 1.3) увеличивается угол подъема профиля и ширина среза, а толщина уменьшается, следовательно, возрастает усадка стружки, она минимальна на участках начала контура и максимальна на участках в конце контура. Чем больше усадка, тем больше действительная

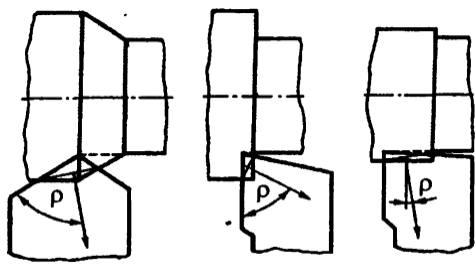


Рисунок 1.4. Направления схода стружки

площадь сечения среза отличается от теоретической. Из множества факторов, влияющих на усадку стружки, выделяются два основных: вязкость обрабатываемого материала и скорость резания. С ростом подачи увеличивается площадь остаточного сечения среза и уменьшается действительная срезаемая площадь. С увеличением глубины резания уменьшается доля остаточного сечения среза и, следовательно, интенсивность ее влияния на силу резания. [100, 148].

При обработке криволинейного контура (рисунок 1.4) сила резания будет возрастать. Увеличение угла подъема профиля вызывает уменьшение отношения

При обработке криволинейного контура (рисунок 1.4) сила резания будет возрастать. Увеличение угла подъема профиля вызывает уменьшение отношения



$a/b$ , увеличение усадки стружки [107], и следовательно, силы резания. Для рассматриваемого случая формула для расчета силы резания имеет вид [100, 102, 148]:

$$P_z = C_{P_z} (St)^{0,75} t^{0,25}$$

Сила резания зависит от площади сечения среза и ширины среза, последняя при увеличении подъема контура возрастает. При определении  $P_z$  следует учитывать влияние остаточного сечения среза. Максимальное значение остаточное сечение среза имеет на участке середины траектории резца. Как отмечалось ранее, обработка криволинейной поверхности осуществляется с изменением глубины резания. Вследствие этого изменяются мгновенные значения ширины и толщины среза, а также кинематические углы резца ( $\gamma_k$ ,  $\alpha_k$ ,  $\phi_k$ ), что сказывается на уровне ряда параметров процесса резания. При обработке с переменной скоростью резания возрастает уровень сил резания, появляются различия в значениях температур резания, снижается период стойкости инструмента. При обработке с переменной подачей наблюдается уменьшение сил резания, температуры, высоты микронеровностей и повышение периода стойкости инструмента [100, 148].

Однако, все зависимости выведенные в работах [148] имеют только лишь теоретический характер, т.к. получены они графическим способом, т.е. на основании геометрических построений. В данном случае результаты исследований справедливы для процесса обработки с постоянной глубиной резания, т.е. когда припуск равномерный, что не всегда возможно реализовать в реальных условиях.

Поэтому, установление связей и взаимного влияния всех составляющих процесса обработки фасонной поверхности целесообразно выполнять комплексно с учетом изменяющихся параметров для управления процессом резания и, как следствие - получения заданных параметров качества обработанной поверхности.

### 1.3. Анализ существующих способов повышения эффективности обработки фасонных поверхностей деталей

Выполненные исследования позволили установить, что в настоящее время практически отсутствует информация по обоснованию выбора рациональных параметров процесса резания с учетом особенностей обработки фасонных поверхностей [30, 68].

Современные компьютерные системы высокопроизводительного оборудования исключают возможность автоматического назначения режимов резания самой системой. Система учитывает текущее состояние заготовки, что позволяет создавать оптимизацию управляющей программы по режимам обработки в целях ускорения процесса, повышения эффективности использования оборудования и повышения качества обработки. При этом траектория инструмента делится на элементарные участки с заданным шагом. Сравнивая объем снимаемого материала на каждом участке, с рекомендованными заданными условиями резания, система назначает оптимальную подачу на каждом участке. Хотя система и рассчитывает оптимальные значения подач автоматически, все-таки начальные параметры для определенных условий обработки задает технолог исходя из собственного опыта или по таблицам режимов резания, которые предоставлены поставщиком инструмента [44, 100]. Управляющие программы, спроектированные с помощью таких систем, зачастую обеспечивают геометрическое формообразование [82, 111], однако процесс резания не является оптимальным. Кроме того, для оценки условий работы технологической обрабатывающей системы при оптимальном управлении необходимы четкие критерии, желательно в количественном представлении, с помощью которых можно учитывать переменные режимы. [75, 100]

В настоящее время достаточно хорошо разработаны методы оптимизации процессов резания по критериям максимальной производительности или минимальной себестоимости [16, 31, 32, 34, 36, 42, 52, 77, 89, 90, 92, 112, 119], однако эти методики определения оптимальных режимов резания не учитывают переменности параметров обработки фасонных поверхностей, что требует дальнейше-

го их развития. Выполненный анализ этих работ показал недостаточность сведений в области выбора рациональных способов технологического воздействия и назначения режимов резания, учитывающих нестабильные, а закономерно изменяющиеся вдоль образующей фасонной поверхности детали, параметры обработки. В связи с переменностью условий обработки фасонной поверхности возникает необходимость назначения режимов резания и управления процессом обработки с целью получения заданных ее геометрических параметров.

Перспективным направлением оптимизации режимов резания является решение многокритериальных задач, обеспечивающих одновременное улучшение параметров обработки по различным критериям [31, 53, 112, 122]. Основную трудность при определении режимов резания для инструментов с износостойкими покрытиями представляет обоснование технических ограничений, информация о которых практически отсутствует, что требует проведения специальных как теоретических, так и экспериментальных исследований [11, 96].

Поскольку процесс обработки точением фасонных поверхностей характеризуется постоянным изменением параметров, поэтому, при назначении оптимальных режимов резания, обосновании ограничений, выборе режущего инструмента необходимо установление взаимосвязей между этими характеристиками

Современные исследования, отраженные в работе профессора Хейфеца М.Л. [145] показали, что комбинированные способы обработки являются наиболее эффективными. В силу тех или иных причин сфера использования многих эффективных процессов существенно ограничивается, в таких случаях сочетание их с другим способом можно достигнуть заданного состояния поверхностного слоя и расширить технологические возможности.

Стремительное автоматизирование производственных процессов в области машиностроения характеризуется применением высокопроизводительного, дорогостоящего автоматизированного станочного оборудования, что в свою очередь требует интенсификации процессов обработки резанием. Это ужесточает условия эксплуатации режущего инструмента, повышает требования к качеству и износостойкости режущего инструмента. [2, 12, 13, 14, 17, 95]

Широкое применение для изделий машиностроения новых конструкционных материалов с повышенными эксплуатационными свойствами, такими как жаростойкость, жаропрочность, коррозионная стойкость зачастую сдерживается их низкой обрабатываемостью [106], поэтому, важной научно-практической задачей является повышение надежности и работоспособности металлообрабатывающего инструмента. Применение традиционных методов повышения свойств металлообрабатывающего инструмента за счёт сложного легирования инструментальных материалов в большой степени ограничено дефицитностью ряда легирующих элементов. Достаточно широко изучены методы поверхностной модификации свойств инструментального материала: механические, физические и физико-химические методы упрочнения [43, 58, 60, 124, 131, 158]. Однако эти методы обработки для повышения характеристик инструмента практически исчерпаны и не могут кардинально повысить их свойства, а промышленное использование этих методов затруднено вследствие низкой избирательной способности поверхностного воздействия на структуры инструментального материала.

Эффективная металлообработка связана с изучением механизма взаимодействия инструмента с обрабатываемым изделием и во многих случаях определяется износостойкостью рабочих поверхностей. Износостойкости рабочих поверхностей посвящены работы авторов: проф. Верещаки А.С., Внукова Ю.Н., Лоладзе Т.Н., Талантова Н. В., и др. [12, 14, 56, 131]. Одним из наиболее прогрессивных методов повышения рабочих качеств режущего инструмента является нанесение на его поверхность специальных покрытий, обладающих необходимыми свойствами. Покрытие сообщает предмету свою твердость или вязкость, химическую стойкость или теплопроводность, а также увеличивает запас прочности. Использование покрытий позволяет существенно повысить качество и стойкость режущего инструмента, тем самым, подтверждая высокую эффективность и перспективность технологии их нанесения.

Для повышения надежности режущего инструмента все большее промышленное применение, особенно в условиях резания без применения смазочно-охлаждающих технологических сред, находят методы нанесения износостойких

покрытий. Такие методы позволяют создать принципиально новый инструментальный материал композиционного типа с оптимальным сочетанием свойств поверхностного слоя и свойств, проявляющихся в объеме геометрического тела инструмента. К настоящему моменту имеется достаточно большое количество научных исследований в области технологии изготовления режущего инструмента с износостойкими покрытиями, как в нашей стране, так и за рубежом [21, 70, 73, 129, 135, 138, 147, 159, 161, 165].

Режущие свойства инструмента определяются сложным комплексом взаимосвязанных факторов: химическим составом, структурой, кристаллическим строением, степенью дефектности кристаллической решётки, которые в свою очередь определяют физико-механические свойства инструмента: твёрдость, теплопроводность, микротвёрдость, прочность, теплостойкость, вязкость, стойкость против окисления при повышенных температурах, коррозионную стойкость [29, 65, 98, 130, 131]. Различное сочетание физико-механических свойств инструментальных материалов определяет работоспособность металлообрабатывающего инструмента. Одним из наиболее эффективных путей повышения свойств металлообрабатывающего инструмента является нанесение на рабочие поверхности широкой гаммы монослойных, многослойных и композиционных износостойких покрытий по технологии вакуумной ионно-плазменной конденсации на основе нитридов, карбидов и карбонитридов тугоплавких металлов: карбида вольфрама WC, карбида титана TiC, нитрида титана TiN, окиси алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, нитрида циркония ZrN, нитрида молибдена MoN, окиси хрома CrO, карбида ниобия NbC и др. которая даёт возможность наносить покрытия различного состава на инструмент из быстрорежущих сталей и твёрдых сплавов [50, 54, 65, 130, 152]. Физико-механические и теплофизические свойства плазменных покрытий могут в значительной степени отличаться от соответствующих свойств инструментального материала.

В работах [13 - 17] рассмотрены режущие свойства материалов с износостойкими покрытиями различного состава, вопросы технологии нанесения покрытий на быстрорежущий и твердосплавный инструмент; определены области ра-

ционального применения и совершенствования режущего инструмента с покрытием; изложена методика оптимального соотношения свойств инструментального материала и покрытия.

Однако рассмотренные ранее работы не дают конкретных рекомендаций по выбору требуемых параметров инструмента [110] и свойств инструментального материала покрытия в зависимости от конкретных условий обработки. Так, при обработке поверхностей вращения с криволинейной образующей имеются особенности, связанные с переменностью режимов резания, геометрических, силовых и тепловых характеристик процесса. Поэтому возникает необходимость установления взаимосвязи между геометрическими характеристиками поверхности детали и инструмента, свойствами материала детали и материала покрытия режущей части твердосплавной пластины, создания принципиально новой структуры инструментальных покрытий, способных обеспечить закономерно изменяющиеся параметры качества обрабатываемой поверхности.

В настоящее время актуально применение функционально-ориентированного подхода [72] к процессам подготовки инструмента, выбору структуры покрытия и, собственно, к нанесению нетрадиционных покрытий с учетом всех особенностей работы и качественных характеристик отдельных функциональных элементов инструмента в целом и, в частности, его режущей части. Существующие способы нанесения нетрадиционных покрытий требуют более детального рассмотрения особенностей эксплуатации такого инструмента. В частности достаточно перспективными являются вопросы синтеза и применения этих видов покрытий на твердосплавных пластинах для обработки фасонных поверхностей деталей.

Перспективным путем совершенствования режущего инструмента, оснащенного твердосплавными пластинами является применение функционально-ориентированных вакуумных ионно-плазменных покрытий. При этом можно обеспечить отличительные свойства для каждой функциональной поверхности пластины, для отдельных частей и зон поверхности в соответствии с их функциональным назначением и условиями работы [70, 71, 80, 81, 73, 161].

Существующие принципы построения специальных покрытий не всегда учитывают вид обработки и условия резания. Отсюда часто одни и те же покрытия рекомендуют использовать для различных условий резания и, наоборот, - в одинаковых условиях обработки рекомендуются разные покрытия. Все это усложняется недостаточной изученностью влияния технологических параметров процесса нанесения покрытия, его состава, строения и функционального назначения на работоспособность режущего инструмента, а также недостаточным количеством рекомендаций и методик синтеза функционально-ориентированных покрытий на твердосплавном режущем инструменте для различных операций механической обработки. В частности, представляет интерес исследование вопросов синтеза таких покрытий для твердосплавных пластин, используемых при обработке фасонных поверхностей изделий с целью обеспечения эксплуатационных свойств инструмента и повышения производительности обработки

Покрытия оказывают влияние на контактные процессы в зоне резания, деформации, силы и температуры резания, направленности тепловых потоков, напряжённого состояния режущей части инструмента и на ряд других параметров системы «инструмент - обрабатываемый материал» [33, 35, 40, 41, 88, 94, 114, 143, 159, 165]. В работе [108] рассмотрен вопрос влияния покрытия инструмента на температуру процесса резания. Отмечено, что снижение температуры в процессе работы такого инструмента происходит не за счет теплозащитных характеристик материала покрытия, а за счет других свойств, например изменения сил трения на площадках контакта.

В связи с этим эффективно применение таких покрытий, которые обеспечивают повышение температурной устойчивости и износостойкости, снижение температуры в зоне резания путем уменьшения адгезии и трения между инструментальным и обрабатываемым материалами,. В частности представляет интерес применение функционально-ориентированного подхода при использовании твердосплавных инструментов с покрытиями, которые обеспечивают заданные свойства отдельных элементов, поверхностей и/или зон в зависимости от эксплуатационных функций, действующих на инструмент. Особенно актуальной эта задача

для реализации процесса точения фасонной поверхности детали, когда закономерно изменяющиеся резания вызывают постоянное изменение характера процессов в зоне обработки.

Поэтому следует вывод о необходимости проведения исследований, связанных с процессами формирования покрытий с функционально-ориентированными свойствами, которые позволят повысить их общие эксплуатационные параметры с учетом изменяющихся условий обработки фасонных поверхностей, что в конечном итоге способно привести к существенному повышению эффективности применения такого инструмента.



#### 1.4. Цель и задачи работы

Выполненный анализ современного состояния вопроса исследования позволяет сделать следующие выводы:

1. При обработке фасонных поверхностей имеет место сложный характер изменения параметров процесса обработки, который существенно усложняет анализ их взаимного влияния. Исследования в этом направлении достаточно ограничены. Вместе с тем, проведенные исследования позволили установить, что характер и степень влияния переменных параметров процесса резания на шероховатость исследованы не в полной мере.

2. В настоящее время основное внимание при обработке фасонных поверхностей уделяется вопросам управления процессом обработки с целью обеспечения точности. Информация по обоснованию выбора оптимальных режимов резания с учетом особенностей обработки фасонных поверхностей достаточно ограничена.

3. Особенностью известных методик оптимизации является постоянство, как самой целевой функции, так и действующих ограничений. Однако при обработке фасонных поверхностей параметры процесса резания закономерно изменяются, в связи с чем, и действующие ограничения становятся переменными.

4. Существующие исследования и разработки позволили определить способы повышения эффективности обработки фасонных поверхностей: использование систем управления процессом на станках с ЧПУ, однако для их рационального использования недостаточно априорной информации по обоснованию и назначению оптимальных режимов обработки, учитывающих весь комплекс переменных параметров процесса и их взаимосвязь; перспективно применение прогрессивного инструмента, с особыми функциональными свойствами, позволяющими обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики для работы в постоянно изменяющихся условиях обработки фасонной поверхности.

Эти выводы позволили сформулировать цель диссертационной работы.

**Целью работы** является повышение производительности и снижение себестоимости токарной обработки фасонных деталей при заданном уровне качества поверхности в условиях переменности параметров процесса резания на основе комплексного обеспечения оптимальных режимов обработки и применения твердосплавного инструмента с функционально-ориентированными свойствами.

Для достижения поставленной цели, в работе необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ особенностей и способов технологического обеспечения эффективности и качества обработки фасонных поверхностей деталей машин.
2. Разработать принципы и методику повышения эффективности токарной обработки фасонных поверхностей в условиях переменности параметров процесса резания.
3. Установить закономерности формирования и связи шероховатости поверхности, силовых и температурных характеристик процесса резания с учетом изменяющихся геометрических параметров и параметров среза в процессе обработки. Разработать методику многокритериальной оптимизации режимов токарной обработки фасонных поверхностей с учетом переменности параметров процесса резания и технических ограничений.
4. Исследовать особенности применения функционально-ориентированного подхода для обеспечения функциональных свойств твердосплавного инструмента и обосновать выбор материала и структуры износостойких покрытий.
5. Экспериментально установить влияние изнашивания лезвия инструмента на формирование шероховатости обработанной поверхности, оценить повышение стойкости инструмента и снижение температуры резания при точении твердосплавными резцами с износостойкими покрытиями.
6. Разработать рекомендации по повышению эффективности токарной обработки фасонных поверхностей за счет выбора оптимальных режимов резания и применения инструментов с функционально-ориентированными покрытиями. Внедрить результаты работы в производство.

## ОБЩИЙ ПОДХОД И МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

### 2.1. Общий подход и методика повышения эффективности обработки фасонных поверхностей деталей

Цель процесса механической обработки – достижение требуемых исходных характеристик – необходимой геометрической формы обработанной поверхности (включая микро и макрогеометрию), и физико-механических свойств поверхностного слоя за минимальное время или с минимальной себестоимостью. С этой позиции процесс обработки рассматривается как управляемый объект. [100].

Все внешние влияния на процесс делятся на управляемые и неуправляемые. К управляемым относятся те влияния, которыми можно целенаправленно варьировать в определенном диапазоне: скорость резания, смазочно-охлаждающие технологические среды, материал инструмента, подача формообразующего движения, поперечная подача, формообразующая траектория. Такие входные влияния, как исходная поверхность заготовки, исходная инструментальная поверхность, материал детали, являются заданными и выступают в роли возмущений. Скорость модификации возмущений существенно зависит от назначенных режимов резания и оценивается в сравнении с основным временем обработки и динамическими характеристиками технологической обрабатывающей системы [100, 101].

Известно, что для любого процесса резания, геометрические параметры слоя припуска определяют процесс в целом. Эти параметры зависят от формы заготовки, фактической формы инструментальной поверхности и фактической траектории формообразующего движения, которая определяет взаимное расположение инструмента и заготовки при обработке. В результате геометрического взаимодействия с удалением припуска формируется обработанная поверхность, а также ее макро- и микрогеометрия. Наиболее сложные процессы происходят при формировании фи-

зико-механических свойств поверхностного слоя (шероховатость, характер и величина остаточных напряжений, структурные преобразования).

Эксплуатационные свойства деталей и узлов машин существенно зависят от качества их сопрягающихся поверхностей и поверхностного слоя, которые определяются геометрическими (макроотклонение, волнистость, шероховатость) и физико-механическими (микротвердость, остаточные напряжения, структура) характеристиками и взаимным расположением микронеровностей на сопрягаемых элементах.

При этом процесс обработки фасонной поверхности характеризуется постоянным изменением параметров процесса резания, что обуславливает необходимость детального исследования их взаимного влияния, установления связей и закономерностей их влияния на процессы в зоне резания.

Исходя из этого, возникает ряд последовательных задач по обеспечению эффективности обработки при заданном уровне качества поверхности с учетом переменности параметров процесса резания. Во-первых, это управление процессом обработки фасонной поверхности детали (изменением ее геометрических характеристик со снятием припуска) [4, 61, 82]. Во-вторых, комплексная оценка возможностей повышения эффективности обработки (одновременное повышение производительности и снижение себестоимости) с учетом переменности условий процесса резания.

Значительным этапом является установление взаимосвязи между характеристиками инструмента (геометрия, инструментальный материал, покрытие) и обрабатываемой детали, а именно нахождение оптимального соответствия применяемого инструмента условиям обработки. В случае непрерывно изменяющихся условиях при точении фасонной детали выбор режущего инструмента, в частности резца, оказывает существенное влияние на ряд показателей при выполнении технологических воздействий:

- управление режимами резания с целью повышения производительности и снижения себестоимости обработки;
- увеличение периодов стойкости инструмента, а как следствие, сокращение количества их замен и связанных с этим простоев оборудования;

- расширение технических ограничений процесса обработки (например, увеличение максимальной силы резания);

- обеспечение заданных параметров качества обработанной поверхности;

При выборе режущего инструмента для данной операции следует руководствоваться следующими критериями:

- возможность обработки данной формы поверхности;

- возможность обеспечения требуемого качества обработанной поверхности;

- возможность повышения точности обработки;

- правильное сочетание формы режущей части с условиями обработки;

- высокие износостойкость и прочность инструмента;

- соответствие свойств обрабатываемого и инструментального материалов;

- требуемый период стойкости инструмента;

- возможность использования более жестких режимов обработки при сохранении необходимого качества обработанной поверхности.

Комплексный учет и аналитическое определение переменных параметров, положенные в основу работы, позволит наиболее точно смоделировать процессы в зоне резания при обработке фасонной поверхности (рисунок 2.1). Поскольку использование упрощенных аналитических зависимостей в данном случае приведет к снижению достоверности определения действующих ограничений при расчете оптимальных режимов обработки.

Решение данной проблемы возможно только путем разработки соответствующих аналитических методик, позволяющих определять весь комплекс особенностей обработки фасонной поверхности расчетным путем без проведения дополнительных экспериментальных исследований. Создание такой аналитической модели процесса течения криволинейной поверхности является довольно сложной задачей ввиду сложности и переменного характера процессов, протекающих в зоне обработки.

При обработке фасонной поверхности сложный характер изменения кинематических геометрических параметров лезвия инструмента и параметров среза поверхностного слоя существенно усложняет анализ влияния этих параметров на

формирование шероховатости поверхности, режимы обработки, силовые и температурные характеристики процесса резания.

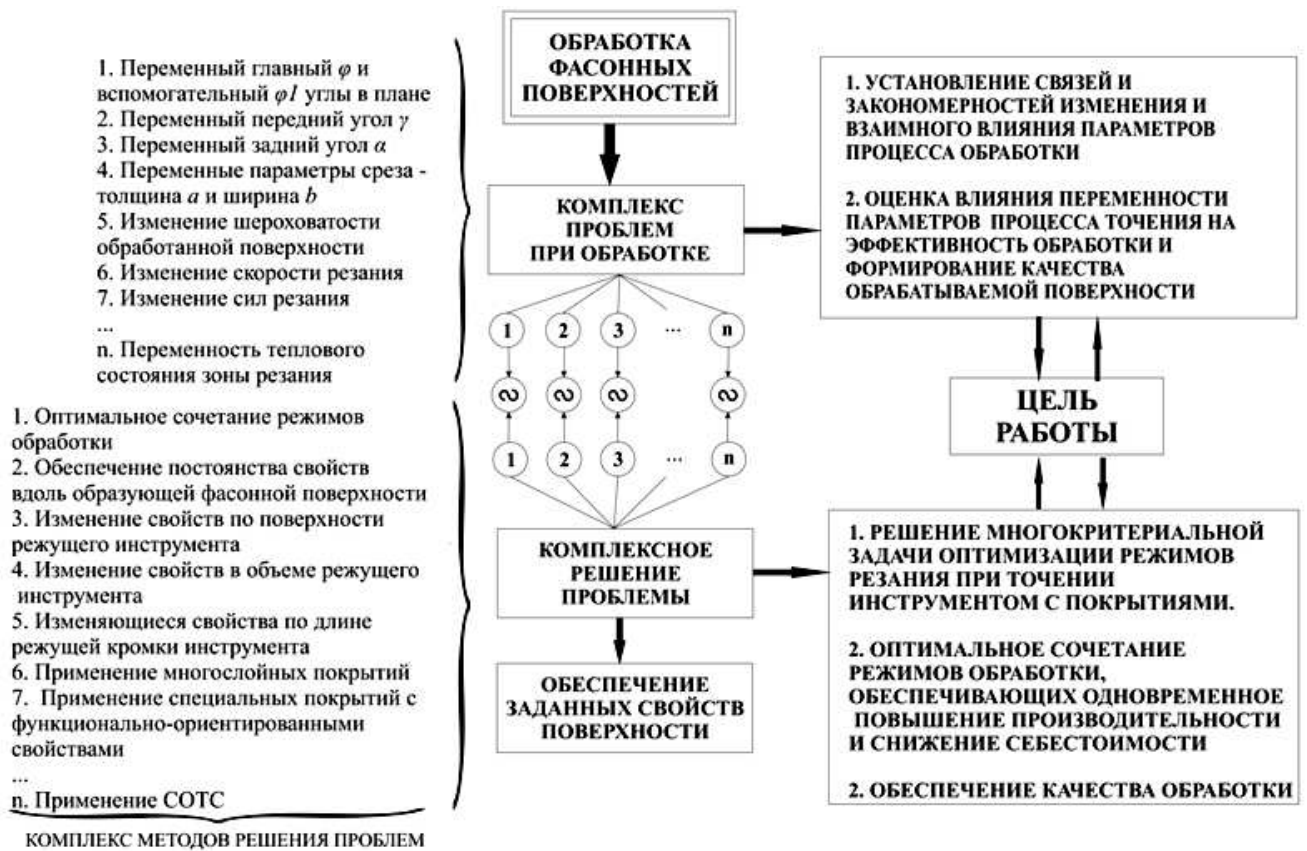


Рисунок 2.1. Общая методика работы

Вдоль криволинейной образующей переменными являются: углы в плане (главный  $\varphi$ , вспомогательный  $\varphi_1$ ), параметры среза - ширина  $b$  и толщина  $a$ . В результате нестационарный характер приобретают физические параметры процесса резания: скорость резания, параметры стружкообразования, силы резания.

С учетом переменности характера процесса обработки в настоящей работе предусмотрено исследование влияния геометрических параметров инструмента на параметры шероховатости обработанной поверхности и установление количественных связей шероховатости с углами в плане резца с целью обеспечения ее постоянства вдоль криволинейной образующей.

Производительность и качество обработанной поверхности с учетом переменности параметров инструмента и параметров сечения среза в значительной степени обусловлены тепловыми явлениями в зоне обработки. Исследование пе-

ременности тепловых потоков в зоне резания при обработке фасонных поверхностей, получение зависимости температуры резания от скорости резания, подачи, глубины резания и безразмерной координаты, определяющей положение вершины лезвия на обрабатываемой поверхности вдоль образующей обусловлено необходимостью учета температурных ограничений для определения оптимальных режимов резания при токарной обработке криволинейных поверхностей.

Снятие температурных ограничений за счет использования инструментов с покрытиями позволяет интенсифицировать процесс обработки. При этом снижение температуры резания и повышения стойкости инструмента за счет применения износостойких покрытий в настоящей работе подтверждается экспериментально.

Одним из существенных способов снятия температурных ограничений и повышения стойкости инструмента является применение смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) при обработке. В настоящей работе исследования действия СОТС не рассматривается ввиду недостаточного количества исследований в этой области и справочно-нормативной информации по повышению периода стойкости инструмента такими методами [121, 133, 146, 164]. Кроме того, применение СОТС обуславливает использование дополнительных систем их подачи в зону резания, что сказывается на удорожании процесса обработки в целом. В настоящее время в промышленности наметились тенденции к снижению негативного влияния производственных процессов на экологическое состояние окружающей среды. Применение СОТС в данном случае нецелесообразно, поскольку не отвечает современным требованиям снижения воздействия вредных веществ на экологию.

Дальнейшее обеспечение повышения эффективности обработки фасонной поверхности целесообразно осуществлять в соответствии с принципами функционально-ориентированного подхода. Применение твердосплавного инструмента с износостойкими покрытиями с функционально-ориентированными свойствами позволяет максимально повысить их общие эксплуатационные параметры за счет местного увеличения технических возможностей и свойств отдельных элементов, поверхностей и/или зон изделия в зависимости от функциональных местных особенностей их эксплуатации. При этом вид и структура покрытия на рабо-

чих поверхностях инструмента определяются, а также топологически, функционально и количественно ориентируются при их реализации в отдельные зоны инструмента в зависимости от заданных функциональных особенностей их эксплуатации. Здесь на начальном этапе предусмотрено деление инструмента на функциональные элементы по следующим уровням [72, 74, 161]: уровень изделия, уровень частей, уровень составляющих, уровень зон.

После деления инструмента на функциональные элементы выполняется определение характера воздействия на каждый из них в зависимости от особенностей эксплуатации изделия. Далее на основании основных принципов функционально-ориентированного подхода (структурного, функционального, топологического, количественного, адекватного структурно-функционального) определяется

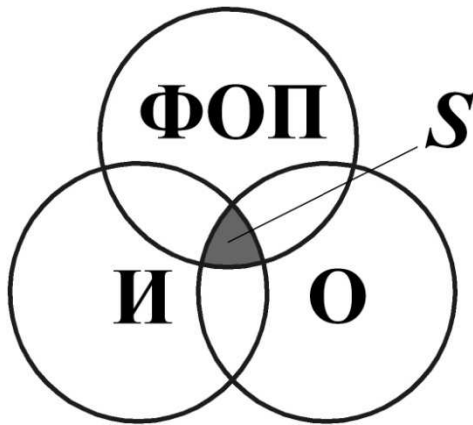


Рисунок 2.2. Схема поиска рациональных решений

вид, тип, качественные характеристики и структура покрытия режущей части инструмента с целью обеспечения необходимых свойств в функциональных элементах изделия.

Таким образом, в основу настоящей работы положено решение комплексной задачи повышения эффективности обработки, которое можно представить схематически (рисунок 2.2).

Здесь окружность И обозначает изменяющиеся условия обработки фасонной поверхности, их исследование и аналитическое описание. Окружность О представляет собой решение задачи оптимизации, а именно определение оптимальных режимов обработки с учетом изменяющихся условий обработки. Окружность ФОП представляет собой решение задачи обеспечения возможностей режущего инструмента за счет применения износостойких покрытий с функционально-ориентированными свойствами.

Область решений рассматриваемой задачи можно представить выражением:

$$S = И \cap О \cap ФОП.$$



Таким образом, представленный подход обеспечивает возможность комплексного решения задачи повышения эффективности обработки фасонных поверхностей деталей с учетом всех особенностей процесса.

## 2.2. Исследование переменности и взаимного влияния параметров токарной обработки фасонных поверхностей

### 2.2.1. Переменность геометрических параметров инструмента при обработке фасонной поверхности

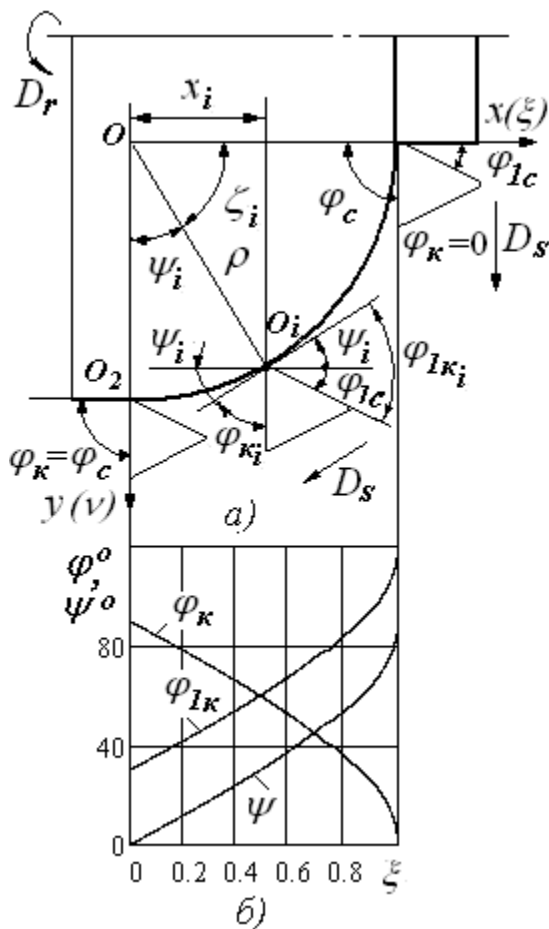


Рисунок 2.3. Схема определения углов в плане лезвия инструмента - а) и графики их изменения - б) при токарной обработке выпуклой фасонной поверхности

При обработке фасонных поверхностей кинематические углы в плане, как главные  $\varphi$ , так и вспомогательные  $\varphi_1$ , одновременно меняются [104].

Закономерности изменения углов в плане для двух основных типов фасонных поверхностей - выпуклых и вогнутых представлены на рисунках 2.3 и 2.4.

Пример определения кинематических главных  $\varphi_k$  и вспомогательных  $\varphi_{1k}$  углов в плане приведен для выпуклой поверхности (рисунок 2.3а) с постоянным радиусом кривизны  $\rho$  (образующая поверхности вращения - круг, центр принятой системы координат является центром кривизны, то есть центром окружности). Обработка выполняется инструментом с трехгранной пластиной, для которого статические углы в плане:  $\varphi_c = 90^\circ$ ;  $\varphi_{1c} = 30^\circ$ . Положение вершины лезвия на указанной

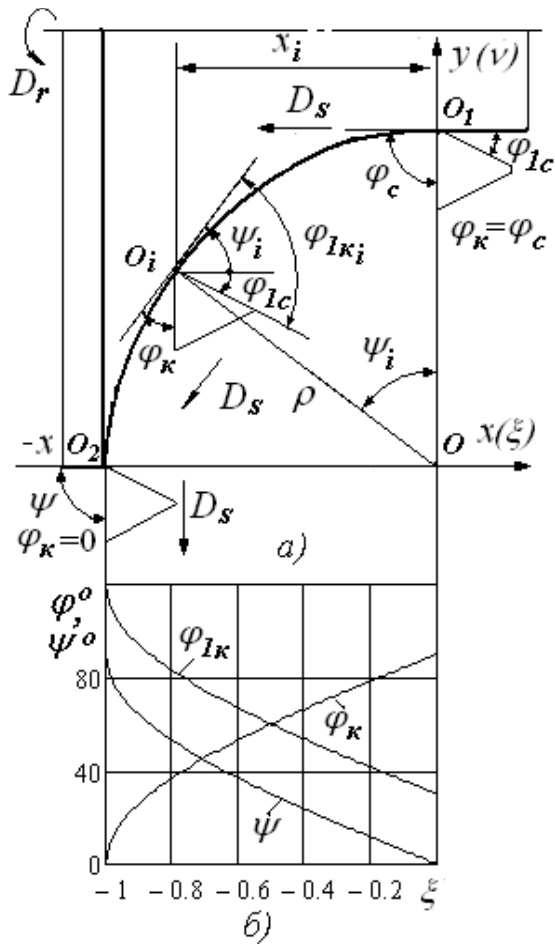


Рисунок 2.4. Схема определения углов в плане лезвия инструмента - а) и графики их изменения - б) при токарной обработке вогнутой фасонной поверхности

фасонной поверхности определяется мгновенным углом поворота  $\zeta_i = 90^\circ - \psi_i$ , который рассчитывается следующим образом:

$$\sin \psi_i = x_i / \rho = \zeta_i; \psi_i = \arcsin(\zeta_i), \quad (2.1)$$

где  $\zeta_i = x_i / \rho$  - безразмерная координата.

Кинематические главный  $\varphi_K$  и вспомогательный  $\varphi_{1K}$  углы в плане определяются относительно направления движения подачи  $D_S$  мгновенным углом поворота  $\psi_i$ :

$$\varphi_{Ki} = \varphi_C - \psi_i; \varphi_{1Ki} = \varphi_{1C} + \psi_i. \quad (2.2)$$

Графики изменения мгновенных углов поворота  $\psi_i$  и кинематических главных  $\varphi_K$  и вспомогательных  $\varphi_{1K}$  углов в плане вдоль безразмерной координаты  $\xi$  приведены на рисунке 2.3б. В начальный момент обработки (точка  $O_1$ ) фасонной поверхности угол поворота  $\psi_1 = 90^\circ$ , в связи с чем главный кинематический угол в плане  $\varphi_K = 0$  и вспомогательный  $\varphi_{1K} = 120^\circ$ .

При обработке угол поворота  $\psi_i$  уменьшается, в результате чего главный кинематический угол в плане  $\varphi_K$  увеличивается, вспомогательный  $\varphi_{1K}$  - уменьшается. В окончательный момент обработки (точка  $O_2$ ) кинематические углы в плане равны статическим:  $\varphi_K = \varphi_C = 90^\circ; \varphi_{1K} = \varphi_{1C} = 30^\circ$ .

Другой пример определения кинематических главных  $\varphi_K$  и вспомогательных  $\varphi_{1K}$  углов в плане приведен для вогнутой поверхности (рисунок 2.4а) с постоянным радиусом кривизны  $\rho$ . Положение вершины лезвия на указанной фасонной поверхности определяется мгновенным углом поворота  $\psi_i$ , который рассчитывается аналогично выпуклой поверхности (2.1) с учетом отрицательных значений безразмерной координаты  $\zeta_i$ :

$$\psi_i = \arcsin(-\zeta_i). \quad (2.3)$$

Кинематические главный  $\varphi_K$  и вспомогательный  $\varphi_{IK}$  углы в плане определяются относительно направления движения подачи  $D_S$  мгновенным углом поворота  $\psi_i$  аналогично выпуклой поверхности (2.2):

$$\varphi_K = \varphi_C - \psi_i; \varphi_{IK} = \varphi_{IC} + \psi_i. \quad (2.4)$$

Графики изменения мгновенных углов поворота  $\psi_i$  и кинематических главных  $\varphi_K$  и вспомогательных  $\varphi_{IK}$  углов в плане при токарной обработки вогнутой поверхности приведены на рисунке 2.4б.

В начальный момент обработки (точка  $O_1$ ) фасонной поверхности угол поворота  $\psi_1 = 0^\circ$ , в связи с чем главный кинематический угол в плане  $\varphi_K = \varphi_C = 90^\circ$  и вспомогательный  $\varphi_{IK} = \varphi_{IC} = 30^\circ$ . При обработке угол поворота  $\psi_i$  увеличивается, в результате чего главный кинематический угол в плане  $\varphi_K$  уменьшается, вспомогательный  $\varphi_{IK}$  - увеличивается. В окончательный момент обработки (точка  $O_2$ ) кинематические углы в плане равны:  $\varphi_K = 0$ ;  $\varphi_{IK} = 120^\circ$ .

Фасонные поверхности реальных поверхностей обычно состоят из различных сочетаний указанных на рисунках 2.3 и 2.4 основных типов выпуклых и вогнутых поверхностей.

Пример определения кинематических главных  $\varphi_K$  и вспомогательных  $\varphi_{IK}$  углов в плане для симметричной вогнутой поверхности, которая обрабатывается инструментом с ромбической пластиной со статическими углами в плане:  $\varphi_C = 90^\circ$ ;  $\varphi_{IC} = 35^\circ$  приведен на рисунке 2.5. Графики изменения кинематических углов в плане для этой поверхности приведены на рисунке 2.7.

Особенностью симметричной вогнутой поверхности является возможность обработки одним инструментом поверхности, начиная с точки  $O_1$ , для которой угол в плане  $\varphi_{IK} = 0^\circ$ ;  $\psi_1 = \varphi_{IC}$ . Безразмерные координаты точки  $O_1$ :  $\xi_1 = \sin(\varphi_{IC})$ ;  $\nu_1 = \cos(\varphi_{IC})$ . Максимальная возможная для обработки безразмерная глубина вогнутой поверхности:  $h/\rho = 1 - \cos(\varphi_{IC})$ . Область невозможной обработки на рисунке 2.7 заштрихована. Для угла в плане  $\varphi_{IC} = 35^\circ$  безразмерные координаты точки  $O_1$  (0,574; 0,819) безразмерная глубина вогнутой поверхности  $h/\rho = 0,181$ .

Пример определения кинематических главных  $\varphi_K$  и вспомогательных  $\varphi_{IK}$  углов в плане для симметричной выпуклой поверхности приведен на рисунке 2.6.

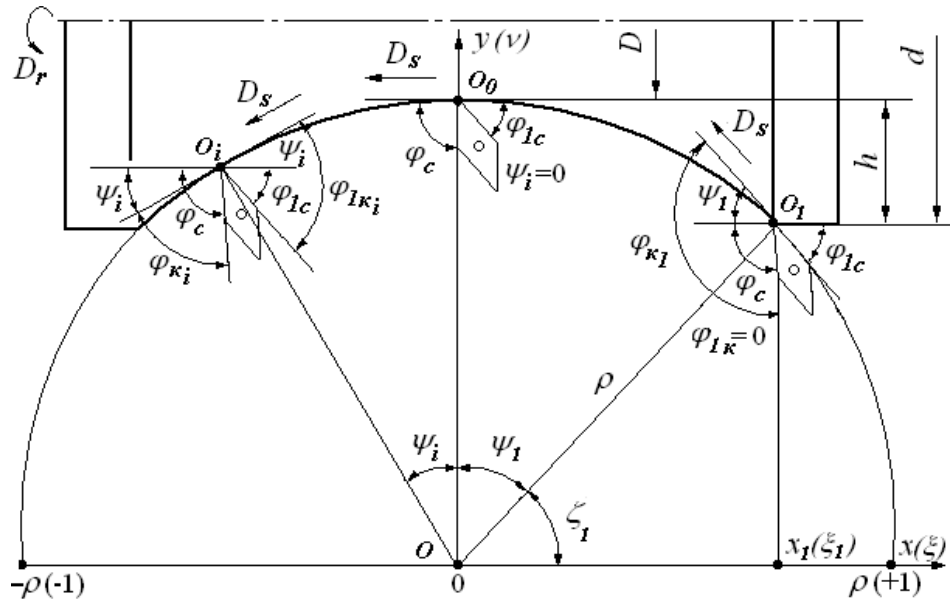


Рисунок 2.5. Схема определения углов в плане лезвия инструмента при токарной обработке симметричной вогнутой фасонной поверхности

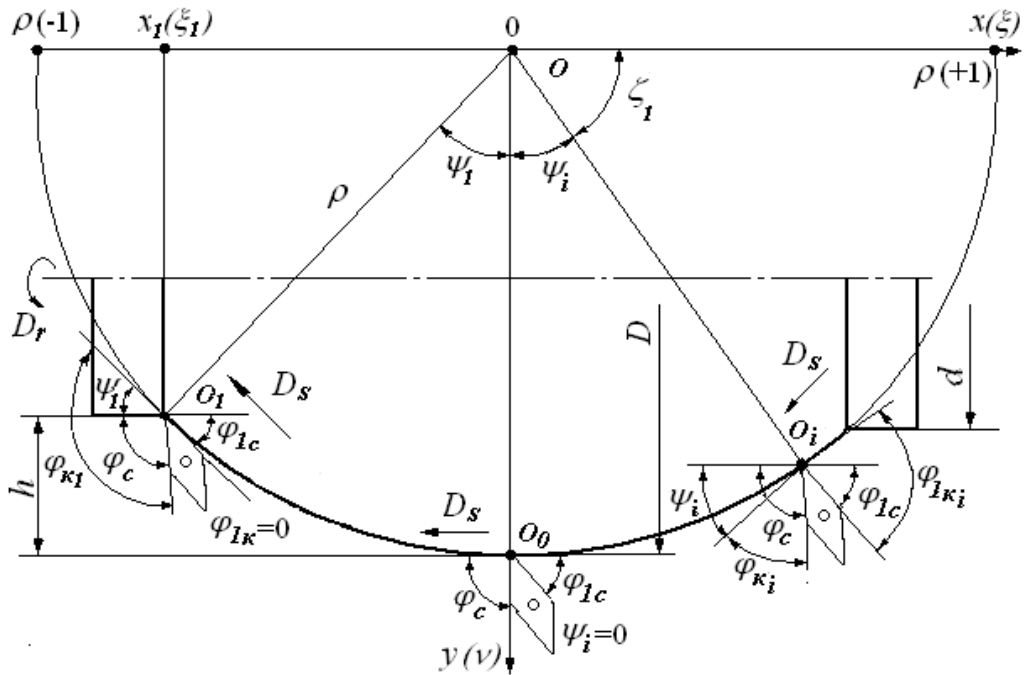


Рисунок 2.6. Схема определения углов в плане лезвия инструмента при токарной обработке симметричной выпуклой фасонной поверхности

Графики изменения кинематических углов в плане для этой поверхности приведены на рисунке 2.8.

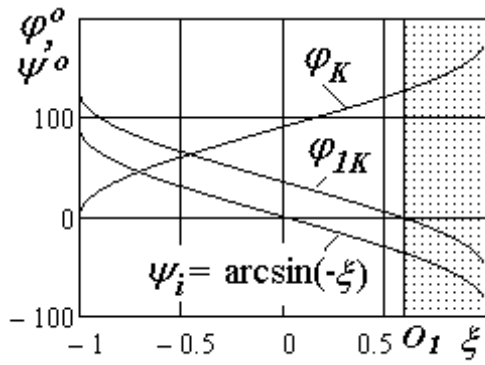


Рисунок 2.7. Графики изменения кинематических углов в плане при обработке вогнутой поверхности

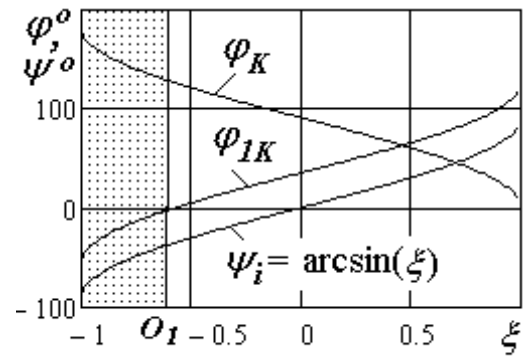


Рис. 2.8. Графики изменения кинематических углов в плане при обработке выпуклой поверхности

Особенностью симметричной выпуклой поверхности является возможность обработки одним инструментом поверхности, заканчивая в точке  $O_I$ , для которой угол в плане  $\varphi_{IK} = 0^\circ$ ;  $\psi_I = \varphi_{IC}$ . Безразмерные координаты точки  $O_I$ :  $\xi_I = -\sin(\varphi_{IC})$ ;  $\nu_I = -\cos(\varphi_{IC})$ . Максимальная возможная для обработки безразмерная глубина выпуклой поверхности:  $h/\rho = 1 - \cos(\varphi_{IC})$ . Для угла в плане  $\varphi_{IC} = 35^\circ$  в принятой системе координат безразмерные координаты точки  $O_I(-0,574; -0,819)$  безразмерная глубина вогнутой поверхности  $h/\rho = 0,181$ . Область невозможной обработки на рис.2.8 заштрихована.

### 2.2.2. Переменность параметров среза поверхностного слоя и скорости резания

Геометрические параметры сечения срезаемого слоя, или параметры среза - толщина  $a$  и ширина  $b$  зависят от технологических параметров - подачи  $S$  и глубины резания  $t$ , а также главного угла в плане  $\varphi$ .

При обработке фасонных поверхностей глубина резания  $t$  остается постоянной, в связи с чем ширина среза  $b$  меняется в зависимости от главного кинематического угла в плане  $\varphi_K$ :  $b = t/\sin\varphi_K$ . С учетом переменности кинематического угла в плане вдоль безразмерной координаты  $\xi$  ширина среза  $b(\xi) = t/\sin(\varphi_C - \arcsin\xi)$  (рисунок 2.9). Заштрихованная область и отвечает зоне невозможной обработки инст-

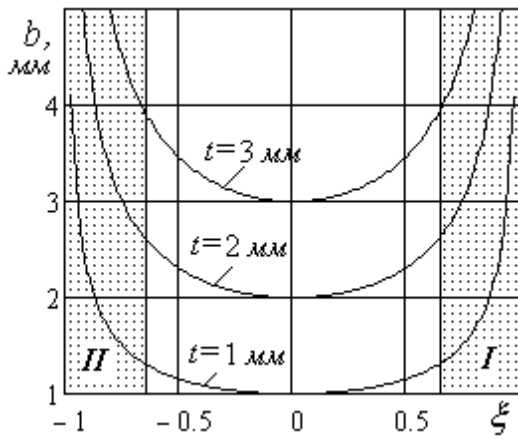


Рисунок 2.9. График изменения ширины среза  $b$  при токарной обработке фасонных поверхностей

введены на рисунке 2. 11.

рументом с ромбической пластиной для вогнутой поверхности, область II - для выпуклой.

При обработке на станках с постоянной подачей на оборот  $S_o$  (рисунок 2.10), толщина среза  $a = S_o$  остается постоянной, а кинематическая подача, которая совпадает с направлением движения подачи  $D_s$ , определяется как  $S_K = S_o / \sin \varphi_K$ .

Графики изменения кинематической подачи  $S_K(\xi) = S_o / \sin(\varphi_C - \arcsin \xi)$  при токарной обработке фасонной поверхности для различных постоянных подач на оборот  $S_o$  при-

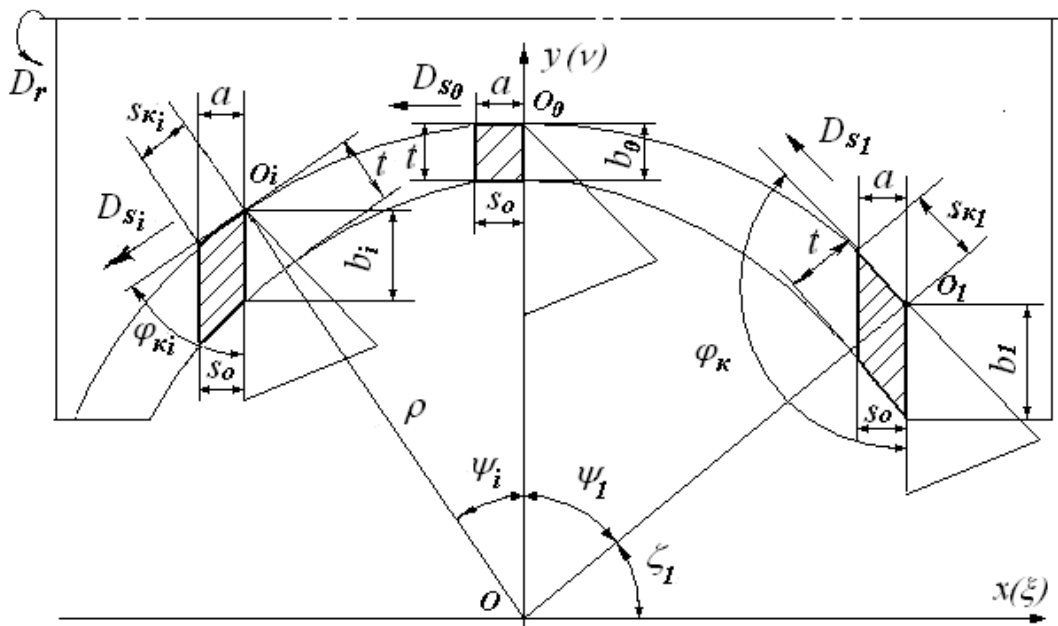


Рисунок 2.10. Схема определения углов в плане лезвия инструмента при токарной обработке фасонной поверхности на станках с постоянной подачей на оборот  $S_o$

Кинематическая подача имеет наименьшее значение в точке, соответствующей началу системы координат. В других точках вдоль безразмерной координата-

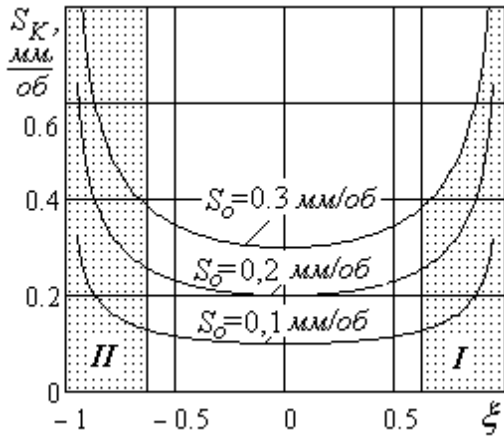


Рисунок 2.11. Графики изменения кинематической подачи  $S_K$  при токарной обработке фасонных поверхностей

ты  $\xi$  кинематическая подача увеличивается в связи с изменением кинематического угла в плане.

В случае обработки на станках с ЧПУ с постоянной контурной подачей  $S_K$  (рисунок 2.12), толщина среза  $a$  меняется в зависимости от главного кинематического угла в плане  $\varphi_K$ :  $a = S_K \sin\varphi_K$ . С учетом переменности кинематического угла в плане вдоль безразмерной координаты  $\xi$  толщина среза  $a(\xi) = S_K(\varphi_C - \arcsin\xi)$ .

Графики изменения толщины среза при токарной обработке фасонной поверхности для различных значений постоянной кинематической подачи  $S_K$  приведены на рисунке 2.13.

Графики изменения толщины среза при токарной обработке фасонной поверхности для различных значений постоянной кинематической подачи  $S_K$  приведены на рисунке 2.13.

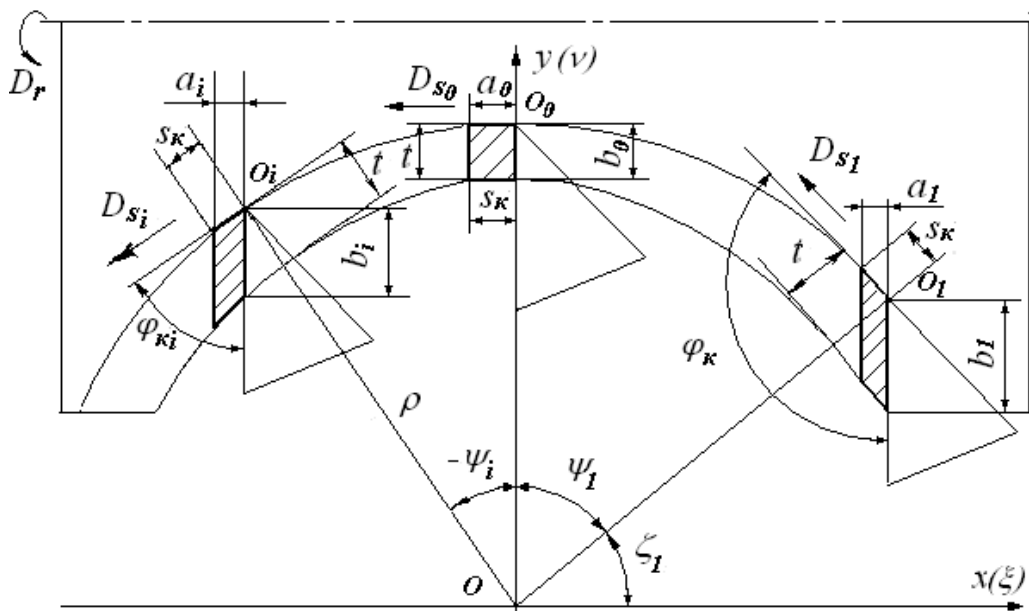


Рисунок 2.12. Схема определения углов в плане лезвия инструмента при токарной обработке фасонной поверхности на станках с ЧПУ с постоянной контурной подачей  $S_K$

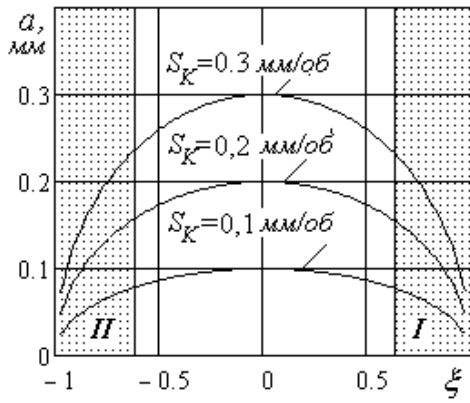


Рисунок 2.13. Графики изменения толщины среза  $a$  при токарной обработке фасонных поверхностей

Толщина среза имеет наибольшее значение, а ширина - наименьшее в точке, соответствующей началу системы координат. В других точках вдоль безразмерной координаты  $\xi$  толщина уменьшается, а ширина - увеличивается.

Схема определения переменной скорости резания при токарной обработке выпуклых  $V_{K1}$  и вогнутых  $V_{K2}$  фасонных поверхностей приведена на рисунке 2.14. Для постоянной частоты вращения детали  $n$  неизменной считается скорость резания  $V_d$  на цилиндрической поверхности диаметром  $d$ .

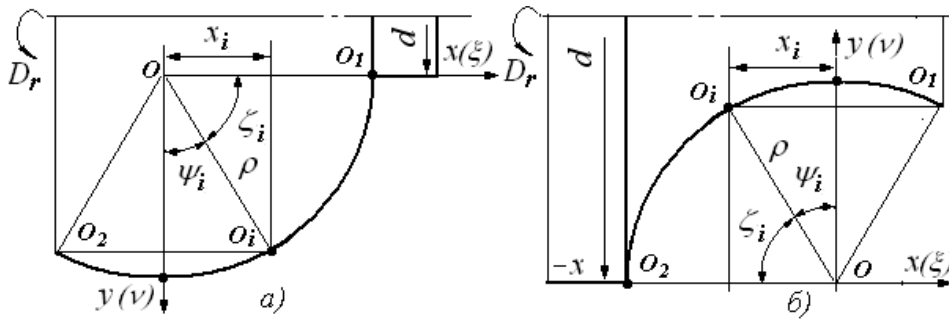


Рисунок 2.14. Схема определения скорости резания при токарной обработке выпуклых - а) и вогнутых - б) фасонных поверхностей

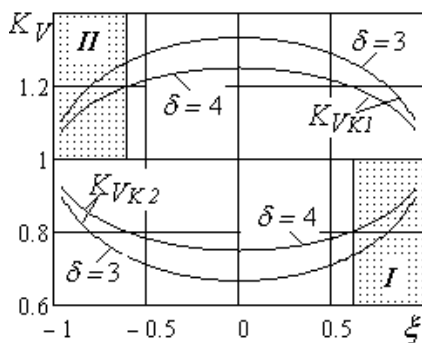


Рисунок 2.15. Графики изменения скорости резания  $V_K$  при обработке криволинейных поверхностей

Относительно этой скорости фактические кинематические скорости резания могут быть рассчитаны следующим образом:

$$V_{K1}(\xi) = V_d \delta^{-1} (\delta + \cos(\arcsin(\xi)));$$

$$V_{K2}(\xi) = V_d \delta^{-1} (\delta - \cos(\arcsin(\xi))), \quad (2.5)$$

где  $\delta = d/\rho$  - безразмерный диаметр цилиндрической поверхности.

Фактические скорости резания для выпуклых поверхностей увеличиваются, для вогнутых - уменьшаются тем больше, чем меньше



безразмерный диаметр  $\delta$ , о чем свидетельствуют приведенные на рисунке 2.15 коэффициенты  $K_{VK1} = V_{K1}/V_d$ ;  $K_{VK2} = V_{K2}/V_d$ .

### 2.2.3 Переменность параметров стружкообразования

Основным параметром стружкообразования, что рассматривается в настоящей работе, является коэффициент усадки стружки  $k$ , характеризующий степень деформирования слоя материала детали, который в процессе резания превращается в стружку.

Коэффициент усадки стружки существенно зависит от параметров процесса резания. Известно, что он уменьшается с ростом переднего угла лезвия инстру-

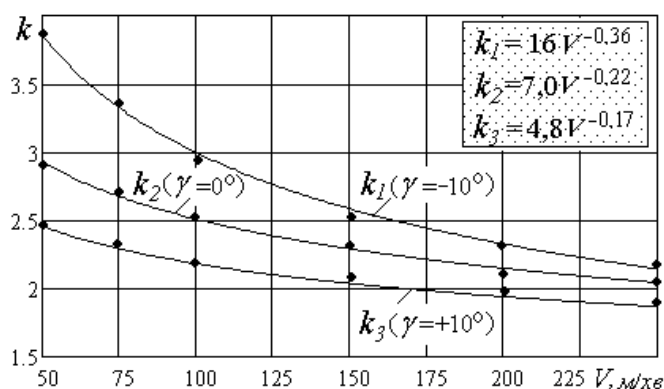


Рисунок 2.16. Графики зависимости коэффициента усадки стружки  $k$  от скорости резания  $V$  для различных передних углов  $\gamma$  (- ● - экспериментальные исследования [49])

нта  $\gamma$ , скорости резания  $V$  и подачи  $S$  [35, 49].

На основании экспериментальных исследований, представленных в работе [49] и выполненных в условиях обработки стали 40Х твердосплавными резцами Т15К6; толщина среза  $a = 0,45$ мм; ширина среза  $b = 2$ мм; (рисунок 2.16), установленные регрессионные зависимости (с погрешностью до 7%) коэффициента усадки стружки  $k$  от скорости резания  $V$  для различных передних углов  $\gamma$ :

$$\begin{aligned} k_1 &= 16V^{-0,36} (\gamma = -10^\circ); \\ k_2 &= 7,0V^{-0,22} (\gamma = -10^\circ); \\ k_3 &= 4,8V^{-0,17} (\gamma = +10^\circ). \end{aligned} \quad (2.6)$$

На основании экспериментальных исследований, представленных в работе [35] и выполненных в условиях обработки стали 40 твердосплавными резцами Т15К6; глубина резания  $t = 4$ мм; передний угол  $\gamma = +10^\circ$ ; (рис.2.19), установлена

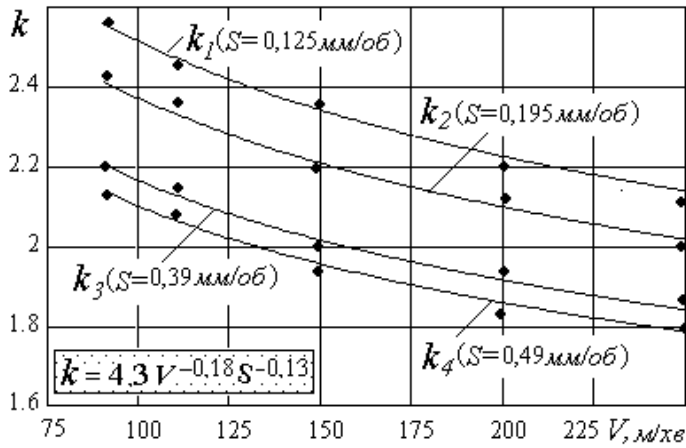


Рисунок 2.17. Графики зависимости коэффициента усадки стружки  $k$  от скорости резания  $V$  для различных подач  $S$  (- ● - экспериментальные исследования [35])

$V$ . Коэффициент усадки стружки  $k$  уменьшается с ростом скорости резания  $V$  и подачи  $S$ .

Результаты расчетов свидетельствуют о том, что степень влияния скорости резания  $V$  на коэффициент усадки стружки  $k$  в формулах для  $k_1$  и  $k_2$  (2.6) для одинаковых значений переднего угла  $\gamma = +10^\circ$  практически одинакова.

При токарной обработке фасонных поверхностей с учетом переменности кинематического угла в плане  $\varphi_K = (\varphi_C - \arcsin \xi)$  вдоль безразмерной координаты  $\xi$  и соответствующей сменности подачи  $S_K = S_0 / \sin \varphi_K$  (обработка на станках с постоянной подачей на оборот  $S_0$ ) и скорости резания  $V_{K2} = V_d \delta^{-1} (\delta \pm \cos(\arcsin(\xi)))$  (знак + относится к выпуклой поверхности, знак - к вогнутой) коэффициенты усадки стружки могут быть рассчитаны следующим образом:

$$\begin{aligned} K_{k1}(\xi) &= 16[V_d \delta^{-1} (\delta \pm \cos(\arcsin(\xi)))]^{-0,36} (S_0 / \sin(\varphi_C - \arcsin \xi))^{-0,13}; \\ K_{k2}(\xi) &= 7,0[V_d \delta^{-1} (\delta \pm \cos(\arcsin(\xi)))]^{-0,22} (S_0 / \sin(\varphi_C - \arcsin \xi))^{-0,13}; \\ K_{k3}(\xi) &= 4,3[V_d \delta^{-1} (\delta \pm \cos(\arcsin(\xi)))]^{-0,18} (S_0 / \sin(\varphi_C - \arcsin \xi))^{-0,13}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Графики изменения коэффициентов усадки стружки  $k$  вдоль безразмерной координаты  $\xi$ , приведенные на рисунке 2.18, свидетельствуют о существенных изменениях основного параметра стружкообразования при токарной обработке -

(с погрешностью до 10%) множественная регрессионная зависимость коэффициента усадки стружки  $k$  от скорости резания  $V$  и подачи  $S$ :

$$k = 4,3 V^{-0,18} S^{-0,13}. \quad (2.7)$$

Графики (рисунок 2.17.) свидетельствуют о том, что скорость резания влияет на коэффициент усадки стружки  $k$  тем сильнее, чем меньше передний угол  $\gamma$ ; и наоборот - передний угол  $\gamma$  влияет на коэффициент усадки стружки  $k$  тем сильнее, чем меньше скорость резания

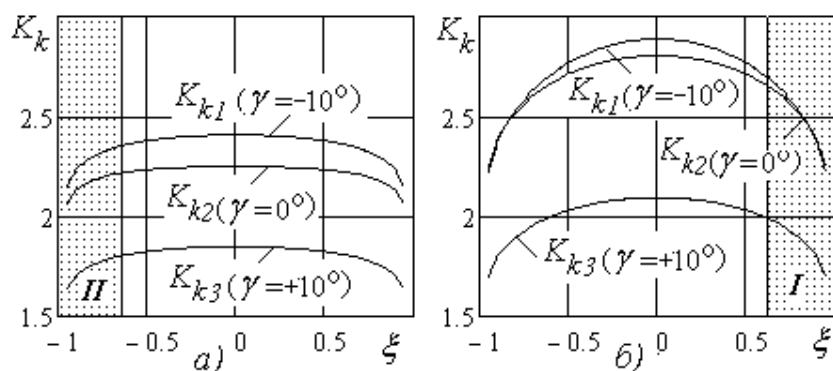


Рисунок 2.18. Графики изменения коэффициентов усадки стружки  $K_k$  вдоль безразмерной координаты  $\xi$  при обработке выпуклых - а) и вогнутых фасонных поверхностей

коэффициент усадки стружки в разных точках фасонной поверхности может меняться в 1,5 раза.

#### 2.2.4 Исследование переменности сил резания при обработке фасонных поверхностей

При токарной обработке поверхностей силы резания изменяются в зависимости от изменения углов в плане, которые изменяют толщину среза и усадку стружки.

С ростом главного угла в плане  $\varphi$  увеличивается толщина среза, уменьшается усадка стружки, вследствие чего уменьшается и сила резания  $P_z$ . Изменение главного угла в плане  $\varphi$  влияет на  $P_y$  и  $P_x$ :  $P_y = P_N \cos \varphi$ ;  $P_x = P_N \sin \varphi$ , то есть с увеличением главного угла в плане сила  $P_y$  существенно снижается, а сила  $P_x$  - растет. Зависимости коэффициентов изменения сил резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  от главного угла в плане  $\varphi$ , построенные по данным справочно - нормативной литературы [125], представленные на рисунке 2.19. С использованием регрессионного анализа (с погрешностью до 5%) на базе данных справочно - нормативной литературы установлены следующие зависимости коэффициента изменения сил резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  от главного угла в плане  $\varphi$ :

$$K_{\varphi P_z} = 0,68 \varphi^{-0,18}; K_{\varphi P_y} = 3,28 \varphi^{-0,87}; K_{\varphi P_x} = -1,44 \varphi^{0,37}. \quad (2.9)$$

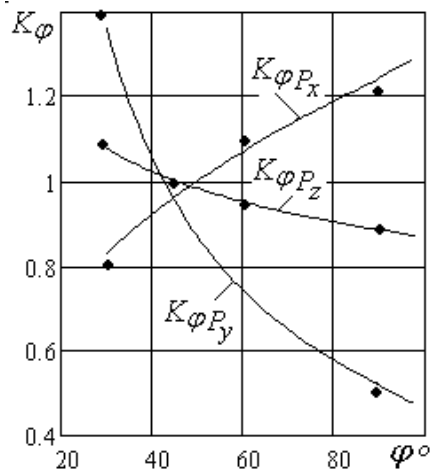


Рисунок 2.19. Графики зависимости коэффициентов изменения сил резания  $P_x, P_y, P_z$  от главного угла в плане  $\varphi$  (- ● - экспериментальные исследования [162])

При токарной обработке фасонных поверхностей с учетом переменности кинематического угла в плане  $\varphi_K(\zeta) = (\varphi_C - \arcsin \zeta)$  вдоль безразмерной координаты  $\zeta$  коэффициенты изменения сил резания  $P_x, P_y, P_z$  имеют вид:

- для вогнутой поверхности:

$$\begin{aligned} K_{\varphi P_z}(\zeta) &= 0,68(\varphi_C - \arcsin(-\zeta))^{-0,18}; \\ K_{\varphi P_y}(\zeta) &= 3,28(\varphi_C - \arcsin(-\zeta))^{-0,87}; \\ K_{\varphi P_x}(\zeta) &= -1,44(\varphi_C - \arcsin(-\zeta))^{0,37}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

- для выпуклой поверхности:

$$\begin{aligned} K_{\varphi P_z}(\zeta) &= 0,68(\varphi_C - \arcsin \zeta)^{-0,18}; \\ K_{\varphi P_y}(\zeta) &= 3,28(\varphi_C - \arcsin \zeta)^{-0,87}; \\ K_{\varphi P_x}(\zeta) &= -1,44(\varphi_C - \arcsin \zeta)^{0,37}. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Графики зависимости коэффициентов изменения сил резания  $P_x, P_y, P_z$  от безразмерной координаты  $\zeta$  приведены на рисунке 2.20. Заштрихованная область и отвечает зоне невозможной обработки инструментом с ромбической пластиной для вогнутой поверхности, область II - для выпуклой.

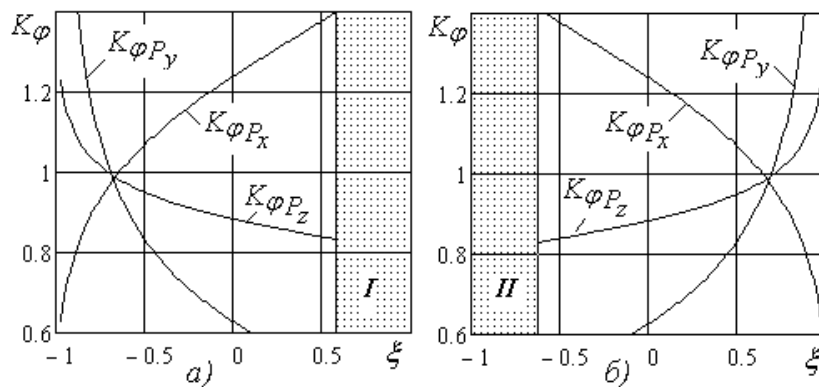


Рисунок 2.20. Графики зависимости коэффициентов изменения сил резания  $P_x, P_y, P_z$  от безразмерной координаты  $\zeta$  для вогнутой - а) и выпуклой - б) фасонных поверхностей

Для вогнутой криволинейной поверхности коэффициенты изменения сил резания  $P_z$  и  $P_y$  уменьшаются, а силы  $P_x$  - увеличиваются. Для выпуклой фасонной поверхности коэффициенты изменения сил резания  $P_z$  и  $P_y$  увеличиваются, а силы  $P_x$  - уменьшаются. В точке, соответствующей главному кинематическому углу в плане  $\varphi_K = 45^\circ$ , как для вогнутых, так и выпуклых фасонных поверхностей они имеют значение 1.

Известная зависимость силы резания от режимов резания [125] с учетом переменности кинематических скоростей резания  $V_K(\xi)$  и подач  $S_K(\xi)$  позволяет определить характер изменения силы резания вдоль безразмерной координаты  $\xi$  фасонной поверхности для конструкционных сталей следующим образом:

$$P_Z(\xi) = C_{PZ} K_{PZ} K_{\varphi P_z}(\xi) t S_K(\xi)^{0,75} V_K(\xi)^{-0,15}, \quad (2.12)$$

где  $C_{PZ}$ ,  $K_{PZ}$  – постоянный и переменный коэффициенты, зависящие от условий обработки.

Учитывая различный характер изменения подачи и скорости резания вдоль безразмерной координаты  $\xi$  фасонной поверхности для различных типов поверхностей и способов обработки, имеем различные возможные варианты изменения силы резания  $P_Z$ . Графики, приведенные на рисунке 2.21 (коэффициент  $K_{\varphi P_z}(\xi) = 1$ ) свидетельствуют о достаточно существенном изменении сил резания при токарной обработке фасонных поверхностей - в разных точках поверхности сила  $P_Z$  может изменяться до 2,5 раз.

Коэффициент  $K_{PT}(\xi) = P_Z(\xi)/P_Z(0)$  (рисунок 2.21), рассчитанный по теоретической зависимости силы резания (2.12) характеризует относительное изменение силы резания.

При токарной обработке фасонных поверхностей с постоянной подачей на оборот  $S_o$  сила резания  $P_Z(\xi)$  имеет наименьшее значение в точке, соответствующей началу системы координат. В других точках вдоль безразмерной координаты  $\xi$  сила резания  $P_Z(\xi)$  увеличивается в связи с увеличением кинематической подачи  $S_K$ . Во время обработки с постоянной кинематической подачей сила резания незначительно меняется только в связи с изменением скорости резания, влияние которой достаточно несущественно, и во время обработки вогнутых поверхностей

сила резания уменьшается, при обработке выпуклых поверхностей сила резания увеличивается.

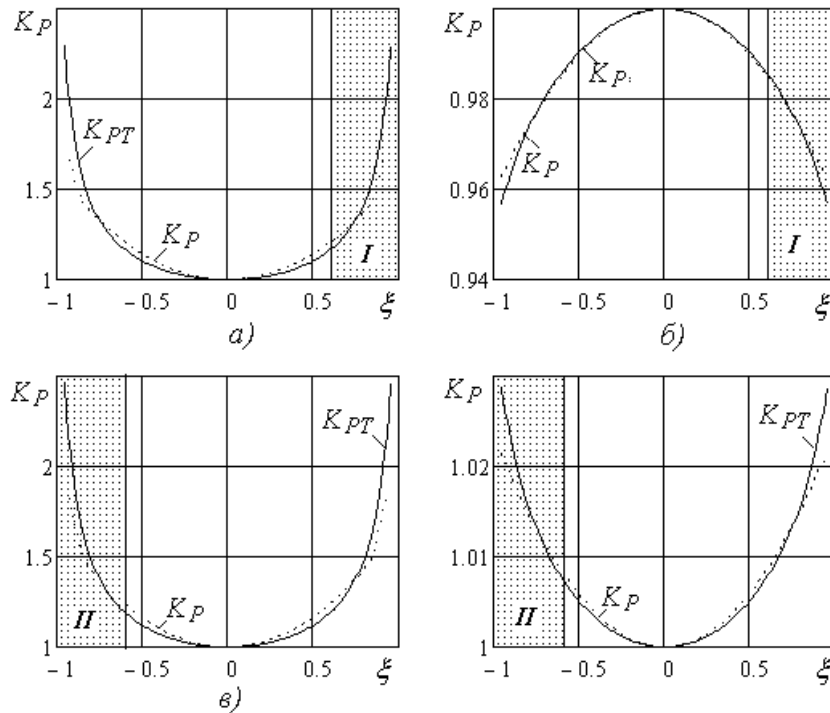


Рисунок 2.21. Графики изменения коэффициента относительной силы резания  $K_p$  при обработке вогнутых - а), б) выпуклых - в), г) поверхностей; с постоянной подачей на оборот  $S_o$  - а), в); с постоянной кинематической подачей  $S_K$  - б), г); — - коэффициент относительной силы резания  $K_p$  по теоретической зависимости; ..... - коэффициент относительной силы резания  $K_{pR}$  по регрессионной зависимости

С использованием множественного регрессионного анализа установлены зависимости коэффициента относительной силы резания  $K_p$  от безразмерной координаты  $\xi$ , которая определяет положение вершины лезвия на фасонной поверхности вдоль образующей:

$$K_p(\xi) = 1/\cos(c\xi); \quad c = \frac{1}{\xi_0} \arccos\left(\frac{P_z(0)}{P_z(\xi_0)}\right). \quad (2.13)$$

В том случае, когда сила резания имеет наибольшее значение в точке, соответствующей началу системы координат, и уменьшается в других точках вдоль

безразмерной координаты  $\xi$  (при обработке с постоянной кинематической подачей вогнутых фасонных поверхностей) коэффициент относительной силы резания  $K_P$  в зависимости от безразмерной координаты  $\xi$  должен определяться следующим образом:

$$K_P(\xi) = \cos(c\xi); \quad c = \frac{1}{\xi_0} \arccos\left(\frac{P_z(\xi_0)}{P_z(0)}\right). \quad (2.14)$$

Значения параметра  $c$  при  $\xi_0 = 0,75$  следующие:

- при обработке с постоянной подачей на оборот  $S_o$ :  $c = 1,015$  для выпуклой поверхности;  $c = 0,962$  для вогнутой поверхности;
- при обработке с постоянной кинематической подачей  $S_K$ :  $c = 0,217$  для выпуклой поверхности;  $c = 0,29$  для вогнутой поверхности.

Графики, приведенные на рисунке 2.21 показывают, что результаты расчетов коэффициента относительной силы резания по теоретическим  $K_{PT}(\xi)$  и регрессионным  $K_P(\xi)$  зависимостям достаточно совпадают (с погрешностью, не превышающей 5%). Это подтверждает возможность использования полученных регрессионных зависимостей коэффициента относительной силы резания от безразмерной координаты  $\xi$  для практических расчетов силы резания в любых условиях токарной обработки фасонных поверхностей.

В общем виде зависимости сила резания  $P_Z(\xi)$  от скорости резания  $V$ , подачи  $S$ , глубины резания  $t$  и безразмерной координаты  $\xi$  может быть рассчитана по известным зависимостям [125] с учетом коэффициентов относительного изменения силы резания  $K_{\phi P_z}(\xi)$  та  $K_P(\xi)$ :

$$P_z(\xi) = C_P K_P K_{\phi P_z}(\xi) K_P(\xi) V^{-n_p} S^{y_p} t^{x_p}. \quad (2.15)$$

где  $x_p$ ,  $y_p$ ,  $n_p$  – показатели степени влияния глубины, подачи и скорости резания на силу резания, зависящие от условий обработки.

## 2.3. Разработка блок-схемы работы

На основании проведенного анализа особенностей токарной обработки фасонных поверхностей, с учетом переменности параметров при точении, разработан общий алгоритм исследования (рисунок 2.22).



Рисунок 2.22. Блок-схема исследования возможностей повышения эффективности обработки фасонных поверхностей



Разработанная блок-схема позволяет оценить взаимосвязи между переменными параметрами обработки криволинейной поверхности и их влияние на процессы в зоне резания.

Также блок-схема позволяет решить общие вопросы повышения эффективности обработки в условиях переменности действующих ограничений и обеспечить достижение поставленной цели.

Для проведения экспериментальных исследований будет использовано следующее оборудование:

- экспериментальные исследования, связанные с точением стальных образцов проведены на экспериментальной установке на базе токарно-револьверного станка с числовым программным управлением Heipemann;

- исследования контактных поверхностей пластин производились на электронном сканирующем микроскопе «Стереоскан S-180» с системой "Линк" с увеличением до  $\times 1000$ ;

- контроль шероховатости обработанной поверхности и глубины лунки на передней поверхности пластин осуществлялись на модернизированном профилографе-профилометре мод.201.

- для нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия применена установка ННВ 6.6-И1;

- для определения величин составляющих силы резания использовался универсальный динамометр УДМ-600;

- температура при точении определялась бесконтактным способом с помощью инфракрасного термометра (пирометра) Fluke 572 с диапазоном измеряемых температур от  $-30$  до  $900^{\circ}\text{C}$ , предназначенного для измерения температуры по инфракрасному (ИК) излучению в спектральном диапазоне 8-14 мкм.

## 2.4. Выводы

В заключение раздела можно отметить, что в данной работе представлены комплексные исследования по повышению эффективности обработки фасонных поверхностей деталей. Для решения этой комплексной задачи выполнено следующее:

1. Установлены основные закономерности процесса резания при обработке фасонных поверхностей. Разработан общий подход и методика комплексных исследований повышения эффективности токарной обработки фасонных поверхностей с учетом переменности параметров процесса за счет применения твердосплавного инструмента с износостойкими покрытиями с функционально-ориентированными свойствами.

3. Представлены результаты исследования переменности углов в плане, параметров среза, скорости резания, параметров стружкообразования для двух основных типов криволинейных поверхностей - выпуклых и вогнутых в зависимости от положения вершины лезвия на указанных фасонных поверхностях, которое определяется мгновенным углом поворота.

4. С использованием регрессионного анализа определены зависимости коэффициента усадки стружки  $k$  от скорости резания  $V$  и подачи  $S$ , коэффициента изменения сил резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  от главного угла в плане  $\varphi$  с учетом изменения подачи и скорости резания вдоль безразмерной координаты  $\zeta$  фасонной поверхности. Установлено, что вдоль криволинейной образующей фасонной поверхности коэффициент усадки стружки может изменяться до 1,5 раз, сила резания  $P_z$  - до 2,5 раз.

4. Разработана блок-схема работы, позволяющая оценить взаимосвязи между переменными параметрами обработки фасонной поверхности и их влияние на процессы в зоне резания, а также решить общие вопросы повышения эффективности обработки в условиях переменности действующих ограничений.

## МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОСТИ ДЕЙСТВУЮЩИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

### 3.1 Обоснование критериев оптимизации

Задачи повышения производительности и снижения себестоимости механической обработки в машиностроительном производстве достаточно успешно решаются на основе оптимизации параметров процесса резания. При решении задач оптимизации режимов резания наиболее распространены критерии максимальной производительности  $P$  и минимальной себестоимости  $C$ .

Для обеспечения максимальной производительности обработки в качестве основного критерия оптимизации принимается переменная часть производительности, зависящая от режимов резания:

$$P = 1/t_o = nS/\pi DL, \quad (3.1)$$

где  $t_o$  - основное время обработки;  $n$  - частота вращения;  $S$  – подача;  $D, L$  - диаметр и длина обрабатываемой поверхности.

*Целевая функция* - выражающая зависимость переменной части производительности от режимов резания, максимум которой достигается при максимуме произведения скорости резания  $V$  и подачи  $S$ :

$$P(V, S) = VS \rightarrow \max. \quad (3.2)$$

Для обеспечения минимальной себестоимости в качестве основного критерия оптимизации принимается переменная часть себестоимости обработки детали, зависящая от режимов резания:

$$C = At_o + At_c t_o / T + A_u t_o / T, \quad (3.3)$$

где  $A$  - стоимость станка - минуты,  $A_u$  – стоимость одного периода стойкости инструмента;  $T$  – период стойкости инструмента;  $t_c$  - время смены инструмента.

Для формирования целевой функции используем известные соотношения основного времени обработки и стойкости инструмента с режимами резания:

$$t_o = \frac{\pi D l \Delta}{1000 V S t}; T = C_T / V^\mu S^\nu t^\chi, \quad (3.4)$$

где  $\Delta$  припуск на обработку;  $C_T, \chi, \mu$  – коэффициент и показатели степени, характеризующие степень влияния глубины, подачи и скорости резания на стойкость инструмента.

Целевая функция, выражающая зависимость переменной части себестоимости от режимов резания, при заданной глубине резания в условиях однопроходной обработки ( $t = \Delta$ ) имеет вид:

$$C = \frac{\pi D L}{1000} \left( A \frac{1}{V S} + A t_c \frac{V^{\frac{1}{m}-1} S^{\frac{y_v}{m}-1} t^{\frac{x_v}{m}}}{C_V^{1/m} K_V^{1/m}} + A_u \frac{V^{\frac{1}{m}-1} S^{\frac{y_v}{m}-1} t^{\frac{x_v}{m}}}{C_V^{1/m} K_V^{1/m}} \right), \quad (3.5)$$

где  $C_V, K_V$  ( $C_V K_V = C_T^m$ ) – коэффициенты и  $x_v, y_v, m$  ( $x_v = \chi/\mu$ ,  $y_v = \nu/\mu$ ,  $m = 1/\mu$ ) – показатели, характеризующие степень влияния глубины, подачи и стойкости на скорость резания.

После преобразований целевая функция может быть представлена в виде:

$$C(V, S) = V^{-1} S^{-1} + M V^{k_V} S^{k_S}, \quad (3.6)$$

где  $M = (t_c + A_u/A) t^{x_v/m} / C_V^{1/m} K_V^{1/m}$ ;  $k_V = 1/m - 1$ ;  $k_S = y_v/m - 1$  – постоянные коэффициенты.

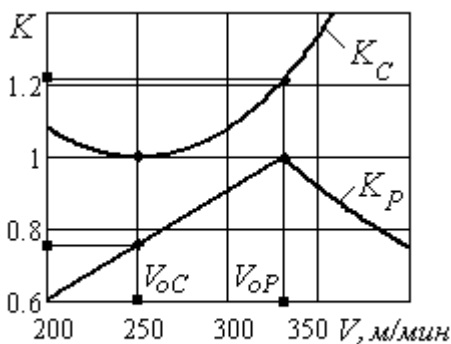


Рисунок 3.1. Зависимость относительных целевых функций производительности и себестоимости обработки от скорости резания

ные коэффициенты.

Известно, что оптимальные режимы резания, рассчитанные по критерию максимальной производительности на основе МЛП и по критерию минимальной себестоимости на основе МГП [32, 34], существенно различаются. Обеспечивая за счет выбора оптимальных режимов экстремальный уровень одного из критериев, мы существенно ухудшаем другой.

Графики изменения целевых функций  $P(V, S)$  (3.2) и  $C(V, S)$  (3.6) в зависимости от скорости резания при значении подачи  $S = S_o$  (рисунок 3.1)

целесообразно представить в относительном виде, что позволяет выполнить сравнительный анализ различных целевых функций - производительности и себестоимости:

$$K_P = \frac{VS}{V_{oP}S_o} = \begin{cases} V/V_o, & V \leq V_{oP}; \\ (V/V_o)^{(1-1/y_v)} & V \geq V_{oP}. \end{cases} \quad (3.7)$$

$$K_C = \frac{V^{-1}S^{-1} + MV^{k_V}S^{k_S}}{V_{oC}^{-1}S_o^{-1} + MV_{oC}^{k_V}S_o^{k_S}}. \quad (3.8)$$

Расчеты выполнены для следующих условий: обработка стали 45 резцами Т15К6 (передний угол  $\gamma = -7^\circ$ ; главный угол резца в плане  $\varphi = 90^\circ$ , радиус при вершине  $r = 1$ мм); глубина резания  $t = 1$ мм; стоимость станкоминуты  $A = 5$ коп/мин; стоимость 1 периода стойкости инструмента  $A_u = 50$  коп/период; время смены инструмента  $t_c = 5$ мин; требуемая шероховатость обработанной поверхности  $R_a = 1,25$ мкм.

Графики иллюстрируют характер изменения целевых функций и наличие экстремумов: минимума у функции себестоимости  $K_C$  и максимума у функции производительности  $K_P$ . Обеспечивая за счет выбора оптимальной по себестоимости скорости резания  $V_{oC}$  минимум себестоимости ( $K_C(V_{oC}) = 1$ ), получаем снижение производительности в 1,32 раза ( $K_P(V_{oC}) = 0,76$ ). Выбирая скорость резания  $V_{oP}$ , оптимальную по производительности, обеспечиваем максимум производительности ( $K_P(V_{oP}) = 1$ ), но получаем повышение себестоимости в 1,21 раза ( $K_C(V_{oP}) = 1,21$ ). То есть, обеспечивая экстремальный уровень одного из критериев, мы существенно ухудшаем другой.

Современные тенденции в оптимизации режимов резания направлены на решение многокритериальных задач, обеспечивающих одновременное улучшение параметров обработки по различным критериям. Одним из направлений многокритериальной оптимизации является использование мультипликативной свертки критериев, позволяющих различные критерии оптимизации привести к единому критерию, обеспечивающему наилучшее сочетание каждого из них.

Минимальных потерь каждой из целевых функций - производительности и себестоимости можно достичь, рассмотрев относительную функцию изменения разности  $F(V)$  и исследовав ее на наличие экстремума:

$$F(V) = \frac{K_C(V) - K_P(V)}{K_P(V)}; \quad F(V) = \left( \frac{V^{-1}S^{-1} + MV^{k_V} S^{k_S}}{V_o C^{-1} S_o^{-1} + MV_o C^{k_V} S_o^{k_S}} \right) \frac{V_o P S_o}{VS} - 1. \quad (3.9)$$

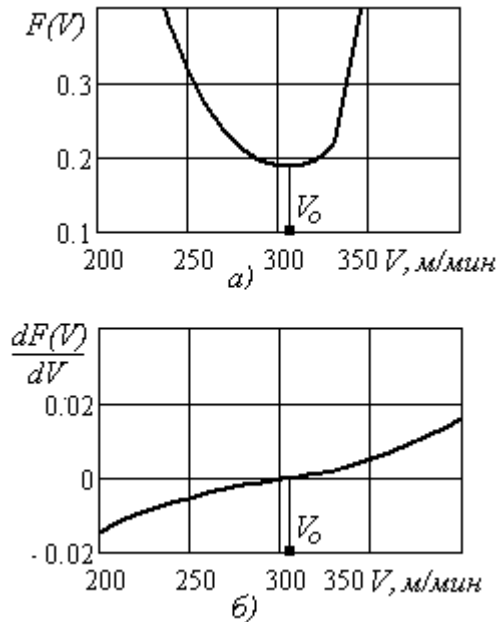


Рисунок 3.2. Графики зависимости функции  $F(V)$  – а) и ее производной  $dF(V)/dV$  – б) от скорости резания

Графики функции  $F(V)$  и ее производной  $dF(V)/dV$ , представленные на рисунке 3.2, свидетельствуют о том, что исследуемая функция имеет экстремум и существует значение скорости резания, его обеспечивающее. Численными методами решения уравнения  $dF(V)/dV = 0$  установлено значение  $V_o = 304$  м/мин.

При выборе этой скорости резания обеспечивается наилучшее сочетание критериев производительности и себестоимости – потери каждого из них будут минимальными, что подтверждается проведенными исследованиями.

Для решения задачи оптимизации и получения аналитических зависимостей режимов резания от условий обработки, необходимо преобразовать функцию  $F(V)$ , исключив из нее постоянные параметры. В этом случае критерий оптимизации будет представлять собой мультипликативную свертку критериев, а именно – отношение критериев себестоимости и производительности:

$$C = (At_o + At_c t_o / T + A_u t_o / T) / P, \quad (3.10)$$

Целевая функция с учетом известных соотношений основного времени обработки и стойкости инструмента с режимами резания имеет вид:

$$C = V^{-2} S^{-2} + MV^{k_V - 1} S^{k_S - 1}. \quad (3.11)$$

## 3.2 Исследование переменности ограничений, действующих при обработке фасонных поверхностей

### 3.2.1 Обоснование выбора действующих ограничений

При механической обработке действует множество технических ограничений: по возможностям режущего инструмента, по мощности резания, по прочности державки резца, по прочности пластины резца, по температуре резания, по шероховатости обработанной поверхности, по жесткости детали и инструмента, по допустимым диапазонам частоты вращения и подачи.

В связи с установленной ранее (глава 2) переменностью основных параметров процесса резания: главных кинематических углов в плане  $\varphi_K(\xi)$ , толщины среза  $a(\xi)$ , усадки стружки  $k(\xi)$ , силы резания  $P_z(\xi)$  переменными вдоль криволинейной образующей фасонной поверхности в зависимости от безразмерной координаты  $\xi$  становятся и действующие ограничения.

При чистовой токарной обработке фасонных поверхностей инструментами с покрытиями наиболее существенными являются следующие ограничения:

1) *по возможностям режущего инструмента*, обусловленным скоростью резания  $V$ , соответствующей его стойкости  $T$ :

$$V \leq C_V K_V K_T / T^{m_t} t^{x_v} S^{y_v}, \quad (3.11)$$

где  $K_T$  – коэффициент, учитывающий влияние покрытий на скорость резания;

2) *по температуре резания*, ограниченной допустимым уровнем  $\Theta$ :

$$C_\Theta K_\Theta k_\Theta(\xi) V^{n_t} S^{y_t} t^{x_t} \leq \Theta; \quad (3.12)$$

где  $C_\Theta$  – коэффициент и  $n_t$ ,  $y_t$ ,  $x_t$  – показатели степени, учитывающие влияние скорости резания, подачи и глубины резания на температуру резания;  $K_\Theta$  – коэффициент, учитывающий влияние покрытий на температуру резания;  $k_\Theta(\xi)$  – коэффициент, характеризующий изменение температуры резания вдоль безразмерной координаты  $\xi$ ;

3) *по шероховатости обработанной поверхности*, ограниченной допусти-

мым уровнем  $R_a$ :

$$C_R K_R k_R(\xi) V^{n_r} S^{y_r} t^{x_r} \leq R_a, \quad (3.13)$$

где  $C_R$  - коэффициент и  $n_r, y_r, x_r$  - показатели степени, учитывающие влияние скорости резания, подачи и глубины резания на шероховатость обработанной поверхности;  $K_R$  - коэффициент, учитывающий влияние покрытий на шероховатость поверхности;  $k_R(\xi)$  - коэффициент, характеризующий изменение шероховатости поверхности  $R_a$  вдоль безразмерной координаты  $\xi$ .

Необходимо учитывать, что рассчитываемые режимы резания должны соответствовать возможностям выбранного оборудования по предельно допустимым диапазонам частот вращения  $n_{min}, n_{max}$  и подач  $S_{min}, S_{max}$  (кинематические ограничения):  $n_{min} \leq n \leq n_{max}$ ;  $S_{min} \leq S \leq S_{max}$ .

### 3.2.2 Определение переменных тепловых потоков и температур резания

Общее количество теплоты, выделяющейся в процессе резания, эквивалентно работе резания в единицу времени и определяется силой резания  $P_z$  и скоростью резания  $V$ :  $Q = P_z V$  (Вт)

В зоне резания возникают три основных источника теплоты (рисунок 3.3):

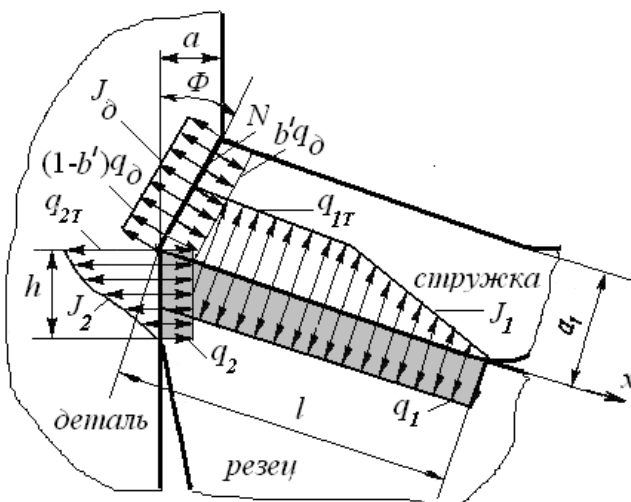


Рисунок 3.3 Схема расположения источников теплоты в зоне резания при точении

- теплота деформации в зоне стружкообразования на плоскости сдвига  $N$  - источник  $J_3$  с равномерным распределением плотности тепловыделения  $q_3$  и равномерным распределением плотности тепловых потоков в стружку  $b'q_3$  и деталь  $(1-b')q_3$ ;
- теплота трения на площадке контакта между стружкой и передней поверхностью лезвия инструмента - источник  $J_1$  с комбинированным



распределением плотности тепловыделения  $q_{ТП}$ ;

- теплота трения между задней поверхностью лезвия инструмента и деталью – источник  $J_2$  с нормальным несимметричным распределением плотности тепловыделения  $q_{ТЗ}$ .

Ось  $X$  в рассматриваемой системе координат ориентируется в направлении передней поверхности перпендикулярно главной режущей кромке;  $l$  - длина контактной площадки в направления схода стружки;  $h$  - износ по задней поверхности;  $a$  - толщина среза;  $a_1$  – толщина стружки;  $\Phi$ - угол сдвига.

Теплота каждого из источников передается всем твердым телам, участвующим в процессе обработки - детали, резцу, стружке, причем в зоне резания имеет место переплетение путей движения потоков теплоты, и поэтому математическое описание процесса теплообмена достаточно сложное.

Температура в режущем лезвии инструмента формируется под воздействием источников  $q_1$  и  $q_2$ , плотность которых для практических расчетов принимается равномерно распределенной по площадкам  $b \times l$  и  $b \times h$  ( $b$  – ширина среза).

Плотности тепловых потоков на передней  $q_1$  и задней  $q_2$  поверхностях лезвия инструмента, определяются из системы уравнений [114]:

$$\begin{cases} \frac{q_1 l}{\lambda_u} M_1 + \frac{q_2 h}{\lambda_u} N_2 = I_1 q_\partial + 0.75 K_{c1} I_2 \sqrt{kl/h} (q_{1T} - 1.3 q_1); \\ \frac{q_2 h}{\lambda_u} M_2 + \frac{q_1 l}{\lambda_u} N_1 = I_1 q_\partial T_\partial + I_2 (q_{2T} - 1.82 q_2), \end{cases} \quad (3.14)$$

где  $I_1 = (1 + c) \omega_\partial k b' / \lambda_\partial V$ ;  $I_2 = 0.75 K_{c2} \sqrt{\omega_\partial h} / \lambda_\partial \sqrt{V}$ ;  $\lambda_\partial$ ,  $\lambda_u$ ,  $\omega_\partial$ ,  $\omega_u$  – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности материалов детали и инструмента соответственно;  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $N_1$ ,  $N_2$  - безразмерные функции, определяющие нагрев площадок на передней и задней поверхностях лезвия инструмента;  $k$  - коэффициент усадки стружки;  $V$  - скорость резания;  $c$  - коэффициент, учитывающий подогрев слоев детали за один оборот;  $T_\partial$  – безразмерная функция распределения температур в детали, вызванных теплотой деформации;  $b'$  - коэффициент относительного количества теплоты, уходящего в стружку,  $K_{c1}$ ,  $K_{c2}$  – коэффициенты, учитывающие законы распределения плотности тепловых потоков на передней и

задней поверхностях лезвия соответственно.

В результате решения указанной системы уравнений (3.1) установлены плотности тепловых потоков на передней  $q_1$  и задней  $q_2$  поверхностях лезвия инструмента в зависимости от теплофизических характеристик детали и инструмента и основных параметров процесса резания:

$$q_1 = \frac{K_1 K_3 \lambda_u - K_2 N_2 h + K_1 M_2 h}{K_3 K_4 \lambda_u + M_2 K_4 h - N_1 N_2 l h / \lambda_u}; \quad q_2 = \frac{(K_1 - K_4 q_1) \lambda_u}{N_2 h}, \quad (3.15)$$

где  $K_1 = \frac{(1+c)\omega_\partial k b' q_\partial}{\lambda_\partial V} + \frac{K_{c1} q_1 \Gamma}{\lambda_\partial} \sqrt{\frac{\omega_\partial k l}{V}}$ ;  $K_2 = \frac{(1+c)\omega_\partial k b' q_\partial T_\partial}{\lambda_\partial V} + \frac{K_{c2} q_2 \Gamma}{\lambda_\partial} \sqrt{\frac{\omega_\partial h}{V}}$ ;

$$K_3 = 1,82 K_{c2} \sqrt{\omega_\partial h / V} / \lambda_\partial; \quad K_4 = 1,3 K_{c1} \sqrt{\omega_\partial k l / V} / \lambda_\partial + M_1 l / \lambda_u.$$

Все указанные тепловые потоки для фасонной поверхности различны в каждой точке криволинейной образующей в связи с переменностью в зависимости от безразмерной координаты  $\xi$  главных кинематических углов в плане  $\varphi_K(\xi)$ , толщины среза  $a(\xi)$ , усадки стружки  $k(\xi)$ , силы резания  $P_z(\xi)$ . С их учетом установлены переменные в зависимости от безразмерной координаты  $\xi$  параметры, определяющие тепловые потоки и температуры резания при обработке фасонных поверхностей.

Безразмерные функции, определяющие нагрев контактных площадок:

$$M_{1,2}(\xi) = (4,88 + 2,64 \eta_{1,2}(\xi)^{0,5} \lg \eta_{1,2}(\xi)) \beta^{0,85};$$

$$N_{1,2}(\xi) = (0,04 + 0,02 \eta_{1,2}(\xi)^{0,6} \lg \eta_{1,2}(\xi)) B_{1,2}(h/l(\xi)),$$

где  $\eta$  – безразмерный параметр:  $\eta_1(\xi) = b/l(\xi)$ ,  $\eta_2 = b/h$ ;  $\beta$  – угол заострения;  $B(h/l(\xi))$ ,  $B(l(\xi)/h)$  – специальные функции.

Для выполнения расчетов плотности тепловых потоков  $q_1$  и  $q_2$  целесообразно табулированные для разных углов заострения  $\beta$  функции  $B_T(h/l(\xi))$  и  $B_T(l(\xi)/h)$  [114], приведенные на рисунке 3.4, представить в аналитическом виде.

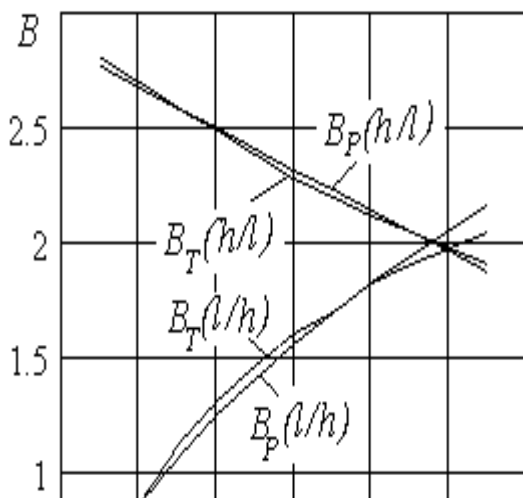


Рисунок 3.4. Графики зависимости коэффициента  $B$  от соотношения  $h/l$  для угла заострения  $\beta = 90^\circ$

В результате аппроксимации (погрешность не превышает 5%) для коэффициента  $B(h/l(\xi))$  установлена линейная зависимость, для коэффициента  $B(l(\xi)/h)$  – степенная (результаты аппроксимации  $B_P(h/l(\xi))$  и  $B_P(l(\xi)/h)$  для  $\beta = 90^\circ$  и  $\xi = 0$ , также представлены на рис. 3.4):

$$B_P(h/l(\xi)) = 2,85 - 0,89(h/l(\xi));$$

$$B_P(l(\xi)/h) = 2,05(l(\xi)/h)^{0,54}.$$

Длина контакта передней поверхности лезвия со стружкой:

$$l(\xi) = 2S \cdot \sin \xi [k(\xi) (1 - \operatorname{tg} \gamma) + \operatorname{sec} \gamma],$$

где  $k(\xi)$  - коэффициент усадки стружки;  $\gamma$  - передний угол.

Коэффициент, учитывающий подогрев слоев детали за один оборот:

$$c(\xi) = 0,23 \exp[-40(0,15 - \varphi_0(\xi))^2], \quad \text{при } 0,001 < \varphi_0(\xi) < 0,15;$$

$$c(\xi) = 0,23 \exp[-3,5(0,15 - \varphi_0(\xi))^2], \quad \text{при } 0,15 < \varphi_0(\xi) < 2,$$

где  $\varphi_0(\xi) = 4,17 \cdot 10^{-9} n a(\xi)^2 / \omega_\partial$  - безразмерный критерий;  $n$  – частота вращения.

Температура деформации:

$$\Theta_\partial(\xi) = 60 \omega_\partial k(\xi) b'(\xi) q_\partial / \lambda_\partial V(\xi),$$

где  $b'(\xi)$  - коэффициент относительного количества теплоты, уходящего в стружку:

$b'(\xi) = 1 / (1 + 1,5k(\xi) / \sqrt{Pe_o(\xi)})$ ;  $Pe_o$  - безразмерный критерий Пекле:

$Pe_o(\xi) = 10^{-3} V(\xi) a(\xi) / 60 \omega_\partial \sin \Phi(\xi)$ ;  $\Phi(\xi)$  - угол сдвига:

$$\Phi(\xi) = \arcsin \left( \cos \gamma / \sqrt{k(\xi)^2 - 2k(\xi) \sin \gamma + 1} \right).$$

Безразмерная функция распределения температур в детали, вызванных теплотой деформации:

$$T_\partial(\xi) = \sqrt{1 + \operatorname{htg} \Phi(\xi) / 2a} - \sqrt{\operatorname{htg} \Phi(\xi) / 2a(\xi)}.$$

Плотности тепловых потоков  $q_{1T}(\xi)$ ,  $q_{2T}(\xi)$ ,  $q_\partial(\xi)$ :

$$q_{1T}(\xi) = 10^6 V(\xi)(P_{Z0}(\xi)\sin\gamma + P_{N0}(\xi)\cos\gamma)/60k(\xi)b(\xi)l(\xi);$$

$$q_{2T}(\xi) = 10^6 \sqrt{3}F(\xi)V(\xi)/6\sqrt{\pi}b(\xi)h;$$

$$q_{\partial}(\xi) = \frac{10^6 V(\xi)\sin\Phi(\xi)[P_{Z0}(k(\xi) - \sin\gamma) - P_{N0}(\xi)\cos\gamma]}{60a(\xi)b(\xi)k(\xi)},$$

где  $P_{Z0}(\xi) = P_z(\xi) - F_{mp}(\xi)$  - разность тангенциальной силы резания и силы трения по задней поверхности резца;  $P_{N0}(\xi) = P_y(\xi) - N(\xi)$  - разность нормальной составляющей силы резания и нормальной силы на задней поверхности резца.

С учетом переменности указанных параметров установлены переменные в зависимости от безразмерной координаты  $\xi$  плотности тепловых потоков на передней  $q_1(\xi)$  и задней  $q_2(\xi)$  поверхностях лезвия инструмента, а также температура резания  $\Theta(\xi)$  – средняя температура на передней и задней поверхностях лезвия инструмента:

$$\begin{aligned} q_1(\xi) &= \frac{K_1(\xi)K_3(\xi)\lambda_u - K_2(\xi)N_2(\xi)h + K_1(\xi)M_2(\xi)h}{K_3(\xi)K_4(\xi)\lambda_u + M_2(\xi)K_4(\xi)h - N_1(\xi)N_2(\xi)l(\xi)h/\lambda_u}; \\ q_2(\xi) &= \frac{(K_1(\xi) - K_4(\xi)q_1(\xi))\lambda_u}{N_2(\xi)h}; \\ \Theta_T(\xi) &= \frac{q_1(\xi)l(\xi)(M_1(\xi)l(\xi) + N_1(\xi)h) + q_2(\xi)h(M_2(\xi)h + N_1(\xi)l(\xi))}{\lambda_u(l(\xi) + h)}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Основные закономерности изменения тепловых потоков на передней  $q_1(\xi)$  и задней  $q_2(\xi)$  поверхностях лезвия инструмента, а также температуры резания  $\Theta(\xi)$  вдоль криволинейной образующей в зависимости от безразмерной координаты  $\xi$  представлены на рисунке 3.5 (выпуклые поверхности) и на рисунке 3.6 (вогнутые поверхности). Расчеты выполнены для следующих условий: обработка стали 45 резцами Т15К6 (передний угол  $\gamma = -7^\circ$ , задний угол резца  $\alpha = 7^\circ$ , главный угол в плане  $\varphi = 90^\circ$ , радиус при вершине  $r = 1$  мм). Режимы резания: глубина резания  $t = 3$  мм, подача  $S = 0,2$  мм/об, скорость резания  $V = 200$  м/мин; износ по задней поверхности  $h = 0,1$  мм (Приложение 2).

Установлено, что в точке, соответствующей началу системы координат

плотности теплового потока на передней поверхности лезвия инструмента  $q_1$  и температура резания при обработке как выпуклой, так и вогнутой фасонной поверхностей имеют наибольшее значение, плотность теплового потока на задней поверхности - наименьшее. В других точках вдоль безразмерной координаты  $\xi$  тепловой поток на передней поверхности лезвия инструмента  $q_1$  и температура резания уменьшаются, а на задней поверхности  $q_2$  – возрастает.

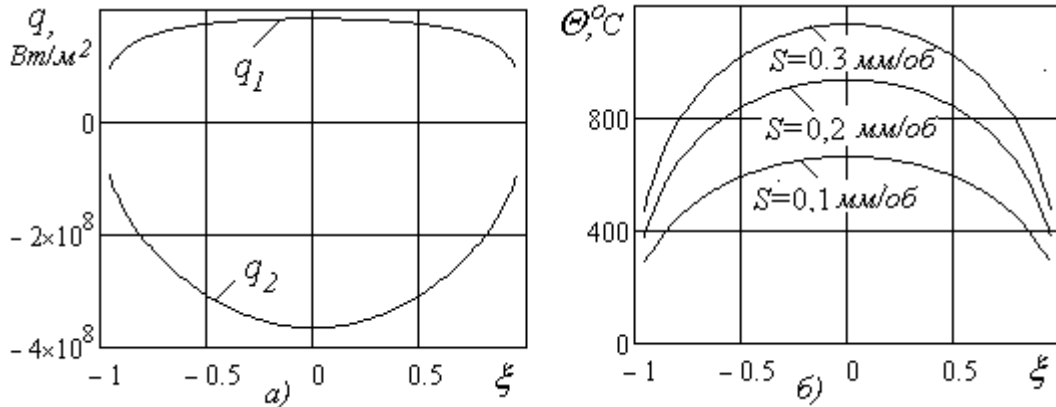


Рисунок 3.5. Графики изменения тепловых потоков  $q_1$  и  $q_2$  - а) и температуры резания  $\Theta$  - б) в зависимости от безразмерной координаты  $\xi$  при обработке выпуклой фасонной поверхности

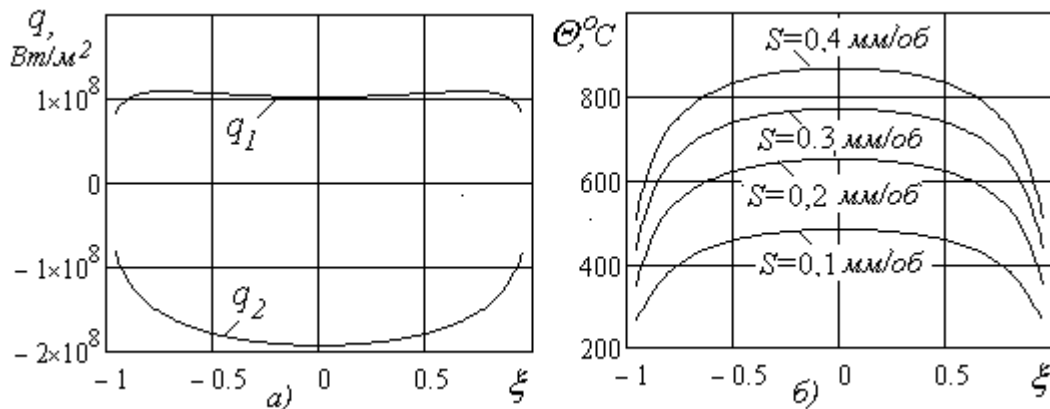


Рисунок 3.6. Графики изменения тепловых потоков  $q_1$  и  $q_2$  - а) и температуры резания  $\Theta$  - б) в зависимости от безразмерной координаты  $\xi$  при обработке вогнутой фасонной поверхности

Максимальная температура резания при токарной обработке выпуклой кри-

волинейной поверхности значительно больше (до 1,5 раз), чем для вогнутой. Графики также свидетельствуют о достаточно высоком уровне температур, возникающих как для выпуклых, так и для вогнутых поверхностей в отдельных точках, а именно - в точках, находящихся вблизи начала системы координат. Этот уровень температур может превышать допустимый - 800°C для заданных материалов, что требует учета температурных ограничений для определения режимов резания при токарной обработке фасонных поверхностей.

С использованием множественного регрессионного анализа установлена зависимость температуры резания  $\Theta(\xi)$  от скорости резания, подачи, глубины резания с учетом изменений вдоль безразмерной координаты  $\xi$ :

$$\Theta(\xi) = C_{\Theta} k_{\Theta}(\xi) V^{0,55} S^{0,4} t^{0,2}, \quad (3.17)$$

где  $C_{\Theta}$  – постоянный коэффициент: для стали 45 -  $C_{\Theta} = 54$ , для стали 95X18 -  $C_{\Theta} = 90$ ;  $k_{\Theta}(\xi)$  – коэффициент изменения температуры резания вдоль безразмерной координаты  $\xi$ :

$$k_{\Theta}(\xi) = \cos(a\xi); \quad a = \frac{1}{\xi_0} \arccos\left(\frac{\Theta(\xi_0)}{\Theta(0)}\right).$$

Коэффициент  $a$  рассчитывается для фиксированного значения безразмерной координаты  $\xi = \xi_0$ . Значение параметра  $a$  при  $\xi_0 = 0,75$  следующие: при обработке с постоянной подачей на оборот  $S_0$ :  $a = 0,6$  для выпуклой поверхности;  $a = 0,35$  для вогнутой поверхности; при обработке с постоянной кинематической подачей  $S_K$ :  $a = 0,94$  для выпуклой поверхности;  $a = 0,64$  для вогнутой.

Результаты расчетов температуры резания по теоретическим  $\Theta_T(\xi)$  (3.16) и регрессионным  $\Theta_P(\xi)$  (3.17) зависимостям, представленные на рис. 3.7, достаточно совпадают (с погрешностью, не превышающей 5%). Это подтверждает возможность использования полученных регрессионных зависимостей температуры резания  $\Theta(\xi)$  от скорости резания, подачи, глубины резания и безразмерной координаты  $\xi$  для практических расчетов температуры резания для любых условий токарной обработки фасонных поверхностей.

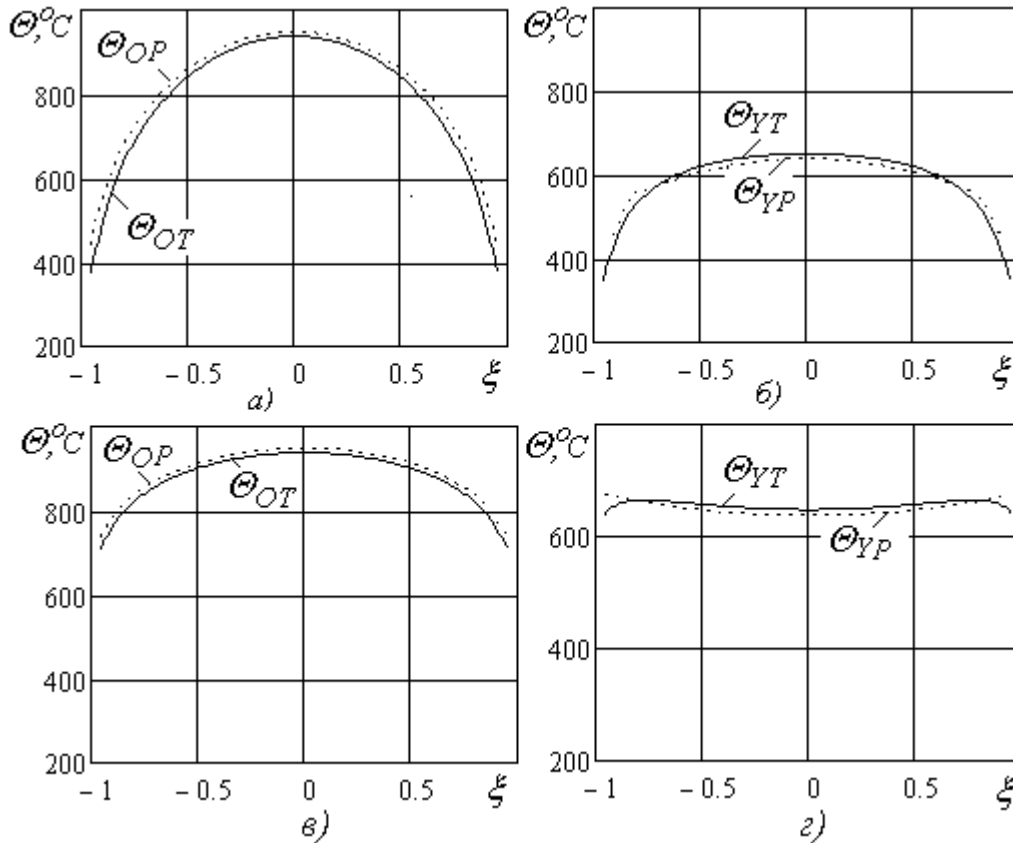


Рисунок. 3.7. Графики изменения температуры резания  $\Theta$  вдоль безразмерной координаты  $\xi$  при обработке выпуклой - а), в) вогнутой – б, г) фасонных поверхностей

Для теоретического анализа возможностей снижения температуры при обработке инструментом с покрытиями  $\Theta_c$  установлен коэффициент  $K_{\Theta_c}$ , учитывающий влияние как толщины покрытия  $m$  ( $K_{\Theta_1}$ ), так и коэффициент уменьшения сил резания  $k_{pc}$  ( $K_{\Theta_2}$ ) вследствие снижения коэффициента трения:

$$K_{\Theta_c} = K_{\Theta_1} K_{\Theta_2}; K_{\Theta_1}(m) = 1 - m\lambda_u / \lambda_c M_c l; K_{\Theta_2}(k_{pc}) = \Theta_c / \Theta, \quad (3.18)$$

где  $\lambda_u$ ,  $\lambda_c$  – коэффициенты теплопроводности инструментального материала и покрытия;  $M$  – коэффициент, учитывающий распределение температур на передней поверхности лезвия инструмента, зависящий от соотношения длины  $b$  и ширины  $l$  источника теплоты  $\eta = b/l$ :  $M = (4,88 + 2,64\eta^{0,5} \lg \eta) \beta^{0,85}$ .

Ранее для анализа возможностей снижения температуры при обработке инструментами с покрытием, учитывающий влияние толщины покрытия  $m$ , Резниковым был предложен коэффициент:  $\nu = 1 - m\lambda_p \sqrt{\pi} / 20\lambda_c \sqrt{\omega_p \tau}$  [144].

Формула получена при следующей схематизации теплофизической системы: плоский неподвижный непрерывно действующий равномерно распределенный источник интенсивностью  $q$  функционирует в стержне или неограниченном теле. В результате анализа установлено, что после  $\tau = 10$ с функционирования источника теплоты температура снижается всего на 0,7%.

При теплофизическом анализе закономерностей формирования тепловых потоков и температур в лезвии режущего инструмента общепринята следующая схематизация элементов теплофизической системы [33, 144]: - плоский (размеры - длина и ширина  $b \times l$ ) непрерывно действующий равномерно распределенный источник интенсивностью  $q$  функционирует в неограниченном клине с углом заострения  $\beta$  в условиях установившегося теплообмена. Для условий обработки острозаточенным инструментом (износ по задней поверхности  $h = 0$ ), в которых учитывается действие источника теплоты только на передней поверхности, получена уточненная формула для расчета коэффициента  $K_{\Theta 1}(m)$ , позволяющая уточнить степень влияния покрытий на температуру резания.

Графики зависимости коэффициента снижения температуры в зоне резания  $K_{\Theta 1}$  от толщины покрытия  $m$  и  $K_{\Theta 2}$  от снижения сил резания  $k_{pc}$  даны на рисунке 3.8.

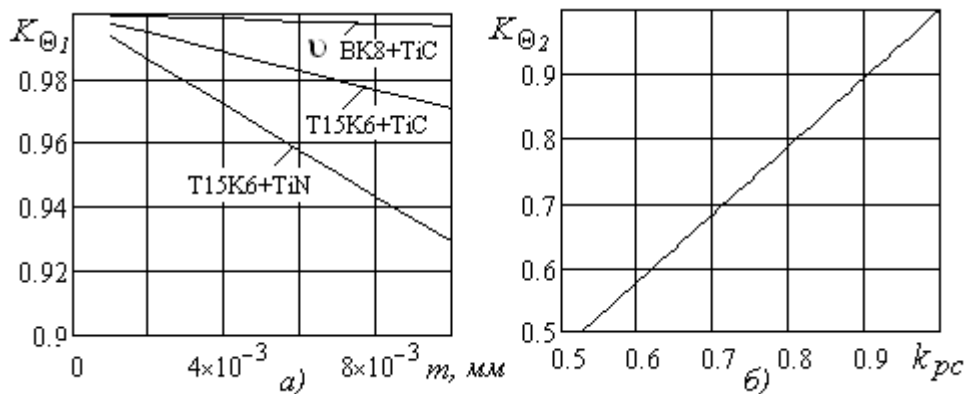


Рисунок 3.8. Зависимость коэффициентов снижения температуры резания от толщины покрытия – а) и снижения сил резания б)



Для сравнения на графике (рисунок 3.8.a) представлен коэффициент снижения температуры  $\psi$ , рассчитанный по формуле Резникова. Предложенный уточненный коэффициент снижения температуры резания  $K_{\theta 1}$ , учитывающий свойства и толщину покрытия свидетельствует о более существенном влиянии покрытий на температуру в зоне резания. Однако, графики свидетельствуют о том, что в области малых толщин покрытий изменение температуры весьма незначительно (до 5%). С увеличением толщины покрытия и снижением коэффициента его теплопроводности коэффициент снижения температуры существенно уменьшается. При обработке инструментами с покрытием нитридом титана TiN температура резания значительно ниже, чем для покрытия карбидом титана TiC,

Значительно большее влияние на снижение температуры резания (до 2-х раз) оказывает изменение сил резания. Покрытия, обеспечивающие меньшую степень пластических деформаций и более низкие коэффициенты трения, уменьшают силы резания, что приводит к снижению общей мощности тепловыделения, тепловых потоков и температур резания.

Наличие износостойкого покрытия со значительно меньшим коэффициентом теплопроводности в сравнении с твердосплавной основой изменяет термическое сопротивление лезвия инструмента в целом. Эквивалентный коэффициент теплопроводности может быть рассчитан следующим образом:  $\lambda_e = \Delta / (m/\lambda_c + (\Delta - m)/\lambda_p)$  (где  $\Delta$  - высота твердосплавной пластинки).

Расчеты свидетельствуют о том, что при традиционных соотношениях толщин пластин и покрытий, изменение эквивалентного коэффициента теплопроводности весьма незначительно (в сравнении с коэффициентом теплопроводности твердых сплавов не превышает 0,5%). Этот анализ позволяет пренебречь влиянием теплопроводности покрытия на суммарную теплопроводность лезвия инструмента.

В результате проведенных исследований установлено, что основной причиной снижения тепловых потоков и температур в зоне резания инструментами с износостойкими покрытиями является снижение сил резания.

### 3.2.3. Определение переменных параметров шероховатости обработанных поверхностей

При обработке резцами среднее арифметическое отклонение профиля определяется следующими общими уравнениями [1]:

$$R_a = 200 \begin{cases} R_{z1}, \sin \varphi_1 \geq \frac{S}{2r} \leq \sin \varphi; & R_{z2}, \sin \varphi_1 < \frac{S}{2r} \leq \sin \varphi; \\ R_{z3}, \sin \varphi_1 < \frac{S}{2r} \geq \sin \varphi; & R_{z4}, \sin \varphi_1 \geq \frac{S}{2r} \geq \sin \varphi, \end{cases} \quad (3.19)$$

где  $r$  – радиус при вершине резца;  $\varphi$  – главный угол в плане резца;  $\varphi_1$  – вспомогательный угол в плане резца;  $R_{zi}$  – расчетная высота неровностей профиля:

$$R_{z1} = \frac{r}{\cos \gamma} - \frac{\sqrt{4r^2 - S^2}}{2 \cos \gamma} + \frac{b_c(2S + b_c)}{32r} + R_u;$$

$$R_{z2} = \frac{r(1 - \cos \varphi_1) + \sin \varphi_1 \left[ S \cos \varphi_1 - \sqrt{S \sin \varphi_1 (2r - S \sin \varphi_1)} \right]}{\cos \gamma} +$$

$$+ b_c / (1/\operatorname{tg} \varphi + 2r/S) + R_u;$$

$$R_{z3} = \frac{r(1 - \cos \varphi)}{\cos \gamma} + \frac{\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \varphi_1 (S - r(\sin \varphi + \sin \varphi_1)) - r \operatorname{tg} \varphi (\cos \varphi_1 - \cos \varphi)}{\cos \gamma (\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi)} +$$

$$+ b_c / (1/\operatorname{tg} \varphi + 1/\operatorname{tg} \varphi_1) + R_u;$$

$$R_{z4} = \frac{r(1 - \cos \varphi) + \sin \varphi \left[ S \cos \varphi - \sqrt{S \sin \varphi (2r - S \sin \varphi)} \right]}{\cos \gamma} +$$

$$+ b_c / (1/\operatorname{tg} \varphi + 2r/S) + R_u,$$

где  $\gamma$  – передний угол резца;  $R_u$  – высота неровностей профиля на вершине резца;  $b_c$  – величина пластического оттеснения:  $b_c = 0.5 \rho_u (1 - 2\tau_0/\sigma_T)$ ,  $\rho_u$  – радиус округления режущей кромки инструмента;  $\sigma_T$ ,  $\tau_0$  – предел текучести и прочность на сдвиг обрабатываемого материала.

Графики, представленные на рисунке 3.9, свидетельствуют о том, что существенное влияние на шероховатость поверхности  $R_a$  углы в плане имеют лишь в диапазоне их изменения до  $30^\circ$ , когда с увеличением как главных  $\varphi$ , так и вспомо-

гательных  $\varphi_1$  углов в плане шероховатость растет. Дальнейшее изменение углов в плане не влияет на шероховатость, которая определяется только шероховатостью

$R_{a1}$ , не зависящей от углов  $\varphi$  и  $\varphi_1$ .

Особенности формирования шероховатости криволинейной поверхности заключаются в одновременном изменении кинематических главных  $\varphi_K$  и вспомогательных  $\varphi_{1K}$  углов в плане в зависимости от безразмерной координаты  $\zeta$  (Приложение 1).

При токарной обработке фасонных поверхностей на станках с ЧПУ с постоянной кинематической подачей  $S_K = const$ , среднее арифметическое отклонение профиля

$R_a(\zeta) = 0,005R_z(\zeta)$  определяется только в зависимости от кинематических главных  $\varphi_K$  и вспомогательных  $\varphi_{1K}$  углов в плане (рисунок 3.10)

При токарной обработке фасонных поверхностей на станках с постоянной подачей на оборот  $S_o = const$ , среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a(\zeta)$  определяется в зависимости от кинематических главных  $\varphi_K$  и вспомогательных  $\varphi_{1K}$  углов в плане и дополнительно от переменной фактической подачи  $S_K(\zeta) = S_o/\sin\zeta$  (рисунок 3.11).

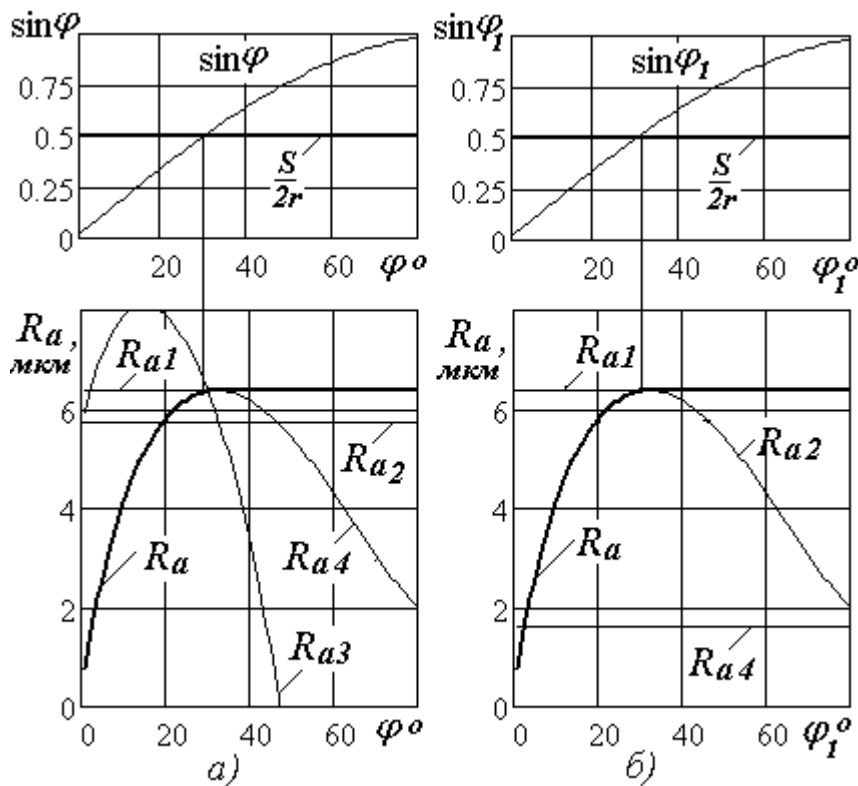


Рисунок 3.9. Графики зависимостей параметров шероховатости поверхности  $R_{ai}$  от главных  $\varphi$ - а) и вспомогательных  $\varphi_1$ - б) углов в плане лезвия инструмента

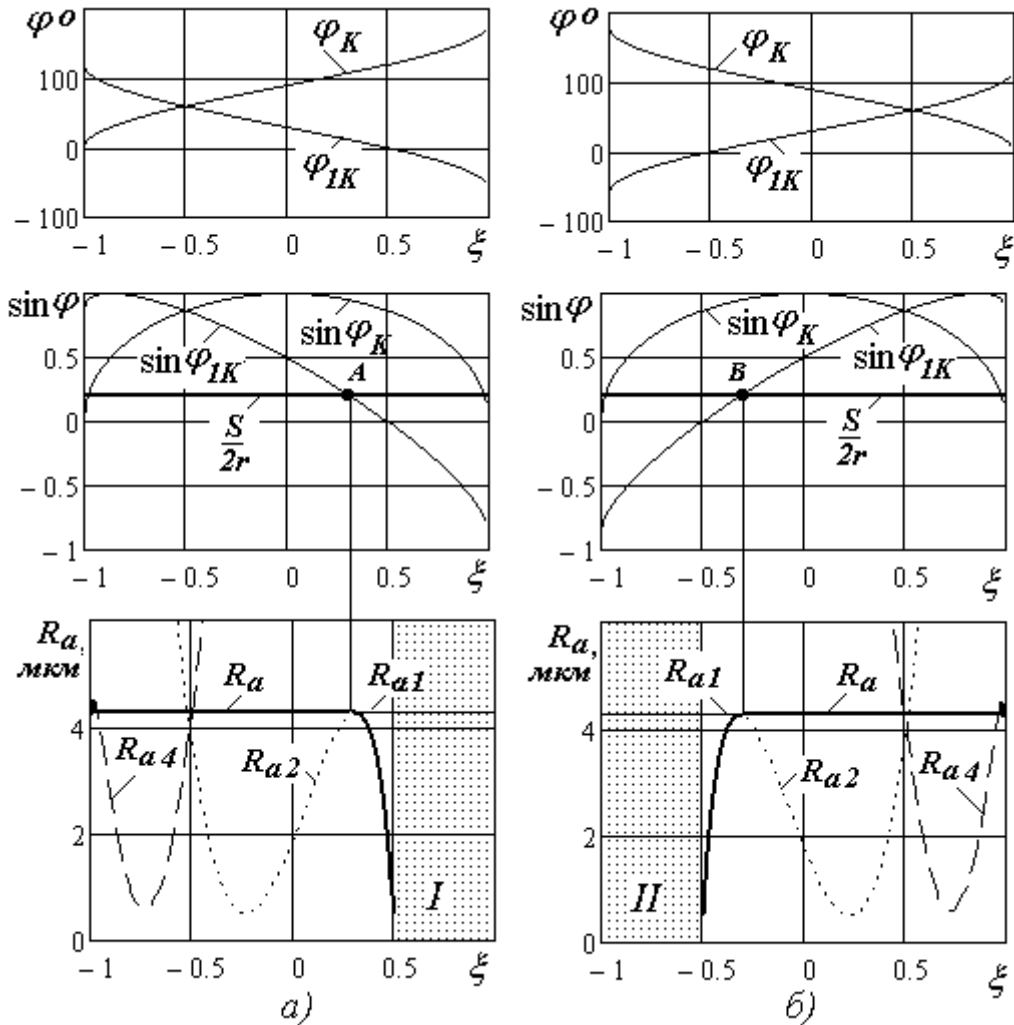


Рисунок 3.10. Графики изменения кинематических главных и вспомогательных углов в плане  $\varphi_K$ ,  $\varphi_{1K}$  и шероховатости  $R_a$  для вогнутых - а) и выпуклых - б) фасонных поверхностей в зависимости от безразмерной координаты  $\xi$  при обработке с постоянной кинематической подачей  $S_K$

Установлено, что для вогнутой поверхности до точки  $A$ , а также для выпуклой поверхности после точки  $B$ , для которых  $\sin \varphi_1 \geq S/2r \leq \sin \varphi$ , шероховатость остается постоянной, так как определяется шероховатостью  $R_{a1}$ , которая от углов в плане не зависит. После точки  $A$  для вогнутой поверхности и до точки  $B$  для выпуклой поверхности, для которых шероховатость резко уменьшается соответственно шероховатости  $R_{a2}$ . Заштрихованные области  $I$  для вогнутой поверхности и  $II$  - для выпуклой отвечают зоне невозможной обработки инструментом с трехгранной пластиной.

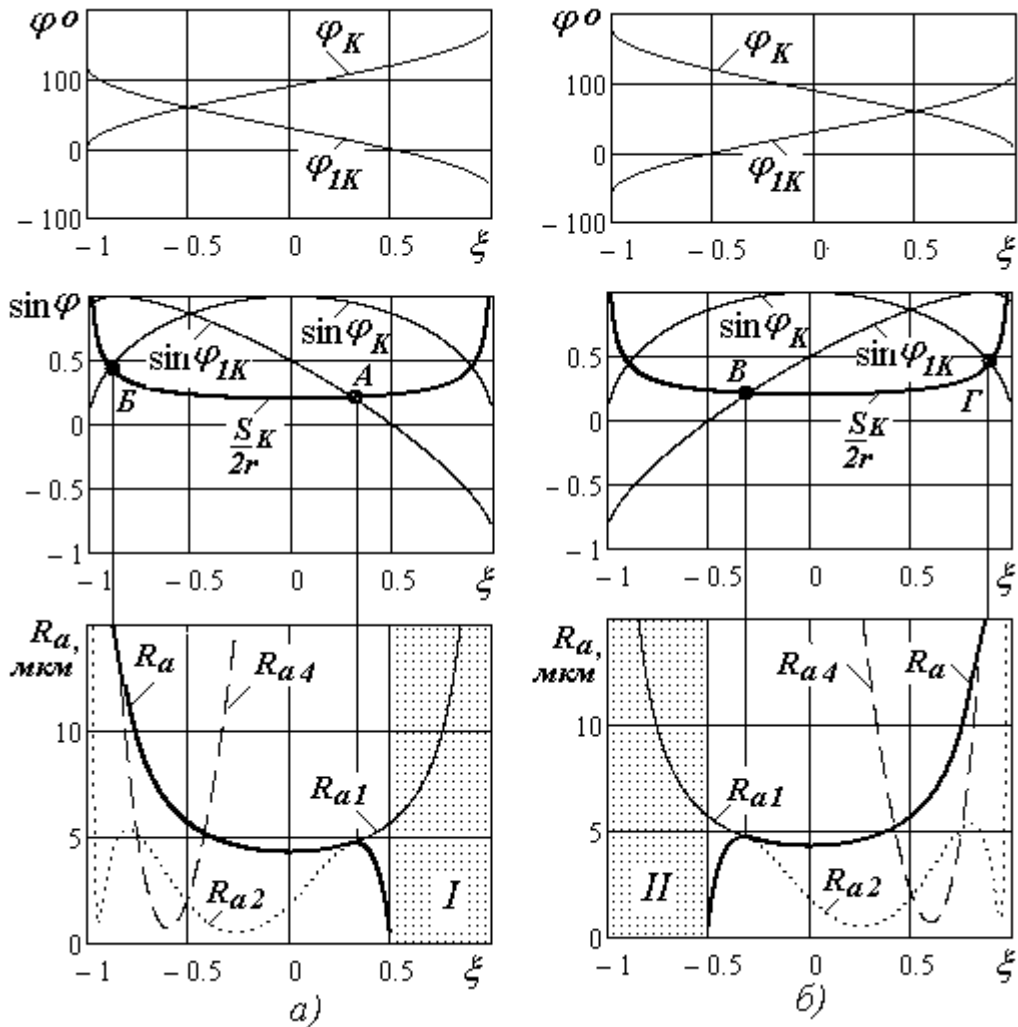


Рисунок 3.11. Графики изменения кинематических главных и вспомогательных углов в плане  $\varphi_K$ ,  $\varphi_{1K}$  и шероховатости  $R_a$  для вогнутых - а) и выпуклых - б) фасонных поверхностей в зависимости от безразмерной координаты  $\xi$  при обработке с постоянной подачей на оборот  $S_0$ .

Установлено, что параметр шероховатости  $R_{a1}$ , не зависящий от углов в плане, существенно меняется в зависимости от кинематической подачи  $S_K(\xi)$ . В результате чего как для вогнутой (до точки А), так и для выпуклой (после точки В) поверхностей шероховатость  $R_a$  сначала уменьшается до нулевой точки, которая соответствует началу координат, а затем увеличивается. Кроме того, для вогнутой поверхности до точки В, а также для выпуклой поверхности после точки  $\Gamma$ , для которых  $\sin \varphi_1 \geq S/2r \geq \sin \varphi$ , шероховатость также существенно возрастает соответственно шероховатости  $R_{a4}$ .

Расчеты выполнены для обработки трехгранной пластиной при следующих условиях: радиус при вершине  $r = 1$  мм; подача  $S = 0,4$  мм/об; ( $S/2r = 0,2$ ); главный угол в плане  $\varphi_C = 90^\circ$ ; вспомогательный угол в плане  $\varphi_{IC} = 30^\circ$  (Приложение 1).

С использованием множественного регрессионного анализа установлены зависимости параметра шероховатости  $R_a$  от подачи  $S$  и радиуса при вершине  $r$  с учетом изменений вдоль безразмерной координаты  $\xi$ :

$$R_{aP}(\xi) = 1,4k_R(\xi)S^{1,75}r^{-0,42}, \quad (3.20)$$

где  $k_R(\xi)$  - коэффициент изменения параметра шероховатости вдоль безразмерной координаты  $\xi$ :

$$k_R(\xi) = 1/\cos(p\xi); \quad p = \frac{1}{\xi_o} \arccos\left(\frac{R_a(0)}{R_a(\xi_o)}\right).$$

Коэффициент  $p$  рассчитывается для фиксированного значения безразмерной координаты  $\xi = \xi_o$ . Для  $\xi_o = 0,75$  значения параметра  $p = 1,485$ .

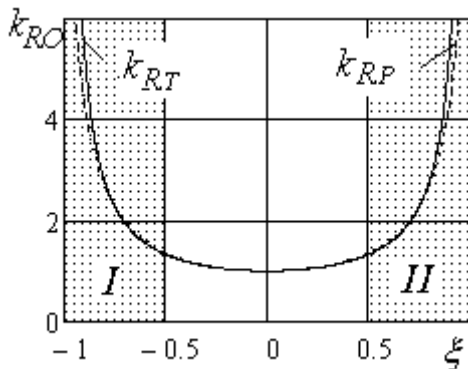


Рисунок 3.12. Графики изменения коэффициента относительного параметра шероховатости  $k_{RO}$  при обработке фасонных поверхностей с постоянной подачей на оборот

Коэффициент  $k_{RO}(\xi) = R_a(\xi)/R_a(0)$  (рисунок 3.12) характеризует относительный параметр шероховатости  $R_a$ . Графики, приведенные на рисунке 3.12, показывают, что результаты расчетов шероховатости обработанной поверхности по теоретическим  $k_{RT}(\xi)$  и регрессионным  $k_{RP}(\xi)$  (3.29) зависимостям достаточно совпадают (с погрешностью, не превышающей 5%). Это подтверждает возможность использования полученных регрессионных зависимостей шероховатости обработанной поверхности  $R_{aP}(\xi)$  от подачи, радиуса при вершине и безразмерной координаты для практических расчетов шероховатости

в любых условиях обработки фасонных поверхностей.

### 3.3 Определение оптимальных по различным критериям режимов резания при чистовом точении фасонных поверхностей

#### 3.3.1 Обеспечение максимальной производительности обработки

Для решения задачи оптимизации используется метод линейного программирования (МЛП). В результате линеаризации целевой функции и ограничений ( $X1 = \ln n$ ;  $X2 = \ln S$ ) с учетом того, что  $n = 1000V/\pi D$ , математическая модель процесса резания при чистовом точении фасонных поверхностей инструментами с покрытиями может быть представлена системой линейных неравенств:

$$\begin{cases} X1 + y_v X2 \leq b_1; & b_1 = \ln(1000 C_V K_V K_T / \pi D T^m t^{x_v}); \\ n_t X1 + y_t X2 \leq b_2; & b_2 = \ln(1000^{n_t} \Theta / C_\Theta K_\Theta k_\Theta(\xi) (\pi D)^{n_t} t^{x_t}); \\ n_r X1 + y_r X2 \leq b_3; & b_3 = \ln(1000^{n_r} R_a / C_R K_R k_R(\xi) (\pi D)^{n_r} t^{x_r}); \\ X1 \geq b_4, \quad X1 \leq b_5; & b_4 = \ln n_{min}; \quad b_5 = \ln n_{max}; \quad b_6 = \ln S_{min}; \quad b_7 = \ln S_{max}. \\ X2 \geq b_6, \quad X2 \leq b_7; & \\ (X1 + X2) \rightarrow \max. & \end{cases} \quad (3.21)$$

В результате решения системы линейных неравенств (3.21) установлены оптимальные по производительности подача  $S_{oP}$  и скорость резания  $V_{oP}$ :

$$S_{oP}(\xi) = \left( \frac{R_a}{C_R K_R k_R(\xi)} \right)^{1/y_r}; \quad V_{oP}(\xi) = \begin{cases} \left( \frac{\Theta}{C_\Theta K_\Theta k_\Theta(\xi) t^{x_t} S_{o1}^{y_t}} \right)^{1/n_t}, & K_{\Theta o} \leq 1; \\ \frac{C_V K_V K_T}{T^m t^{x_v} S_{o1}^{y_v}}, & K_{\Theta o} \geq 1, \end{cases} \quad (3.22)$$

где  $K_{\Theta o}$  - граничное значение коэффициента снижения температуры резания, свидетельствующее о необходимости учета температурного ограничения:

$$K_{\Theta o} = \Theta / C_\Theta K_\Theta t^{x_t} \left( C_V K_V / T^m t^{x_v} \right)^{n_t} \left( R_a / C_R K_R t^{x_r} \right)^{(y_v n_t - y_t)/y_r}.$$

Примеры расчетов оптимальных режимов резания приведены для двух вариантов обработки: конструкционной стали 45 и нержавеющей стали 95X18 в следующих условиях: чистовое точение резцами Т15К6 (передний угол  $\gamma = 0^\circ$ ; главный угол резца в плане  $\varphi = 90^\circ$ , радиус при вершине  $r = 1\text{ мм}$ ); глубина резания  $t = 1\text{ мм}$ ; шероховатость обработанной поверхности  $R_a = 2,5\text{ мкм}$  (Приложение 2).

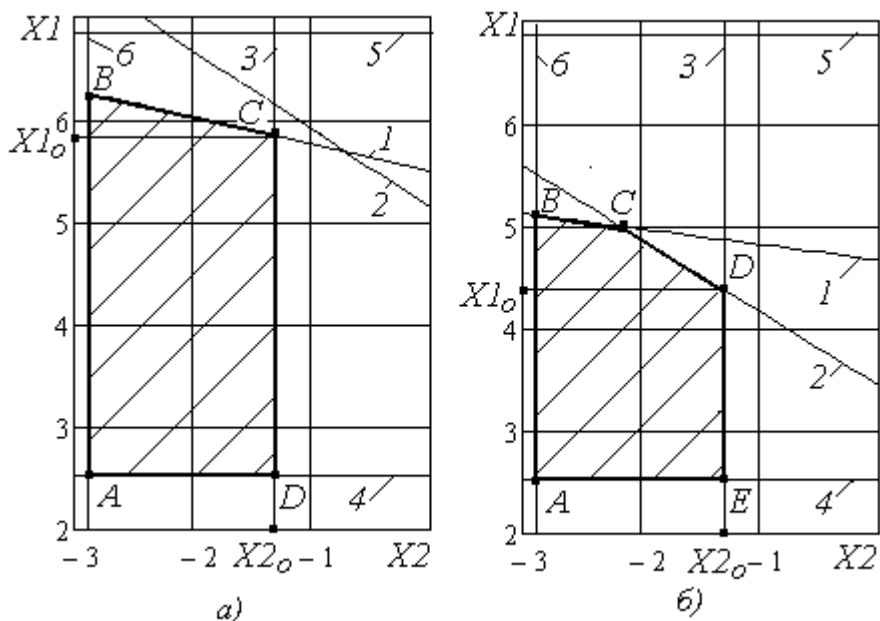


Рисунок 3.13. Схема определения оптимальных режимов резания для чистового точения стали 45 – а) и стали 95X18 – б)

Для стали 45 точка  $C$  в многоугольнике  $ABCD$  (рис. 3.13а), в которой целевая функция принимает максимальное значение, является точкой пересечения ограничений по предельно допустимой шероховатости обработанной поверхности (3) и режущим свойствам инструмента (1). Оптимальные режимы резания:  $X2_0 = -1,2$ ;  $X1_0 = 5,7$ ;  $S_0 = 0,3\text{ мм/об}$ ;  $V_0 = 293\text{ м/мин}$ .

Для стали 95X18 точка экстремума целевой функции  $C$  является точкой пересечения ограничений по предельно допустимой шероховатости обработанной поверхности (3) и допустимой температуре резания (2). Оптимальная подача при этом не меняется:  $X2_0 = -1,2$ ;  $S_0 = 0,3\text{ мм/об}$ . Оптимальная скорость резания при этом существенно снижается:  $X1_0 = 4,6$ ;  $V_0 = 58\text{ м/мин}$ .



### 3.3.2 Обеспечение минимальной себестоимости обработки

Основные ограничения при чистовом точении - по температуре резания (3.12) и по шероховатости обработанной поверхности (3.13).

Особенностью температурных ограничений является их существенное влияние на стойкость режущего инструмента, то есть непосредственно на критерий оптимизации (3.3). При превышении температурой резания  $\Theta_p$  допустимого уровня  $\Theta$ , ( $K_\Theta = \Theta/\Theta_p$  - коэффициент снижения температуры резания) необходимо уменьшать режимы резания и прежде всего – скорость резания. Это приводит к изменению стойкости инструмента, что должно быть учтено в целевой функции коэффициентом  $M_T = (t_c + A_u/A)t^{x_v/m} / C_V^{1/m} K_\Theta^{1/mn_t} = M K_\Theta^{-1/mn_t}$  (Приложение 2.)

С учетом температурных ограничений целевая функция имеет вид:

$$C = V^{-1} S^{-1} + M K_\Theta^{-1/mn_t} V^{k_V} S^{k_S}. \quad (3.23)$$

Для решения задачи оптимизации используется метод геометрического программирования (МГП). Ограничение по шероховатости обработанной поверхности при оптимизации с использованием МГП представляются в виде:

$$C_1 S^{y_r} \leq 1; C_1 = C_R K_R V^{n_r} t^{x_r} / R_a. \quad (3.24)$$

Согласно МГП на первом этапе оптимизации решается задача поиска экстремума целевой функции или максимума функции  $V(W)$ :

$$V(W) = (1/W_{01})^{W_{01}} \left( M K_\Theta^{-1/mn_t} / W_{02} \right)^{W_{02}} C_1^{W_{11}}, \quad (3.25)$$

где  $W_{01}$ ,  $W_{02}$ ,  $W_{11}$  - коэффициенты весоностей, определяемые из системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} W_{01} + W_{02} = 1; \\ -W_{01} + k_V W_{02} = 0; \\ -W_{01} + k_S W_{02} + y_r W_{11} = 0; \end{cases} \quad W_{01} = \frac{k_V}{1+k_V}; W_{02} = \frac{1}{1+k_V}; W_{11} = \frac{k_V - k_S}{(1+k_V)y_r}.$$

С учетом преобразований:

$$W_{01} = 1 - m, W_{02} = m, W_{11} = (1 - y_v)/y_r. \quad (3.26)$$

Оптимальные подача  $S_o$  и скорость резания  $V_o$  определяются в результате решения системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} V(W)W_{01} = V^{-1}S^{-1}; \\ V(W)W_{02} = MK_{\Theta}^{-1/mn_t} V^{k_V} S^{k_S}. \end{cases} \quad (3.27)$$

В результате решения системы линейных уравнений (3.27) установлены оптимальные по себестоимости подача  $S_o$  и скорость резания  $V_o$ :

$$S_o = \left( \frac{W_{01}^{k_V} W_{02} V(W)^{k_V+1}}{MK_{\Theta}^{-1/mn_t}} \right)^{1/(k_S - k_V)} ; \quad V_o = \left( \frac{W_{01}^{k_S} W_{02} V(W)^{k_S+1}}{MK_{\Theta}^{-1/mn_t}} \right)^{1/(k_V - k_S)}. \quad (3.28)$$

Подставляя рассчитанные значения коэффициентов весомостей и, выполняя ряд преобразований, определяем подачу  $S_o$  и скорость резания  $V_o$ :

$$S_o = C_1^{-1/y_r} ; \quad V_o = \begin{cases} \left( \frac{m}{(1-m)MK_{\Theta}^{-1/mn_t}} \right)^m S_o^{-y_v}, & K_{\Theta o} \leq 1, \\ \left( \frac{m}{(1-m)M} \right)^m S_o^{-y_v}, & K_{\Theta o} \geq 1 \end{cases}, \quad (3.29)$$

где  $K_{\Theta o} = \Theta / \Theta_p(V_o, S_o)$  - граничное значение коэффициента снижения температуры резания, определяющее необходимость учета температурного ограничения:

$$K_{\Theta o} = \Theta_o / C_{\Theta} (m/(1-m)M)^m C_i^{(y_v n_t - y_t)/y_i} t^{x_t}.$$

Выполняя ряд дополнительных преобразований, в окончательном виде оптимальные по себестоимости подача  $S_{oC}$  и скорость резания  $V_{oC}$  в зависимости от параметров механообработки определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} S_{oC}(\xi) &= \left( \frac{R_a}{C_R K_R k_R(\xi)} \right)^{1/y_r} ; \\ V_{oC}(\xi) &= \begin{cases} \left( \frac{\Theta}{C_{\Theta} K_{\Theta} k_{\Theta}(\xi) t^{x_t} S_{oC}^{y_t}} \right)^{1/n_t}, & K_{\Theta o} \leq 1; \\ \left( \frac{m}{(1-m)(t_c + A_u/A)} \right)^m \frac{C_V K_V K_T}{t^{x_v} S_{oC}^{y_v}}, & K_{\Theta o} \geq 1, \end{cases} \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$\text{где } K_{\Theta o} = \Theta_o / C_{\Theta} t^{x_t} \left( \frac{m}{(1-m)(t_c + A_u/A)} \right)^m \frac{C_V K_V}{t^{x_v} S_o^{y_v}} \left( \frac{C_R K_R t^{x_r}}{R_a} \right)^{(y_v n_t - y_t)/y_r}.$$

3.3.3 Обеспечение минимального соотношения себестоимости и производительности на основе мультипликативной свертки критериев

С учетом температурных ограничений целевая функция имеет вид:

$$C = V^{-2} S^{-2} + M K_{\Theta}^{-1/mn_t} V^{k_V - 1} S^{k_S - 1}. \quad (3.31)$$

Ограничение по шероховатости задаются аналогично (3.24):

Оптимальные подача  $S_o$  и скорость резания  $V_o$  определяются в результате решения системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} V(W)W_{01} = V^{-2} S^{-2}; \\ V(W)W_{02} = M V^{k_V - 1} S^{k_S - 1}, \end{cases} \quad (3.32)$$

где  $V(W) = (1/W_{01})^{W_{01}} (M/W_{02})^{W_{02}} C_1^{W_{11}}$  – специальная функция;  $W_{01}$ ,  $W_{01}$ ,  $W_{11}$  – коэффициенты весомостей, определяемые из системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} W_{01} + W_{02} = 1; \\ -2W_{01} + (k_V - 1)W_{02} = 0; \\ -2W_{01} + (k_S - 1)W_{02} + y_r W_{11} = 0. \end{cases} \quad W_{01} = \frac{k_V - 1}{k_V + 1}; \quad W_{02} = \frac{2}{k_V + 1}; \quad W_{11} = \frac{2(k_V - k_S)}{(1 + k_V)y_r}.$$

С учетом преобразований:

$$W_{01} = 1 - 2m, \quad W_{02} = 2m, \quad W_{11} = 2(1 - y_v)/y_r. \quad (3.33)$$

В результате решения системы (4.28) и подстановки рассчитанных значений коэффициентов весомостей  $W_{01}$ ,  $W_{01}$ ,  $W_{11}$ , определяются оптимальные подача  $S_o$  и скорость резания  $V_o$ :

$$S_o = C_1^{-1/y_r}; \quad V_o = \begin{cases} \left( 2m/(1-2m) M K_{\Theta}^{-1/mn_t} \right)^m S_o^{-y_v}, & K_{\Theta o} \leq 1, \\ \left( 2m/(1-2m) M \right)^m S_o^{-y_v}, & K_{\Theta o} \geq 1 \end{cases}, \quad (3.34)$$

где  $K_{\Theta o} = \Theta/\Theta_p(V_o, S_o)$  – граничное значение коэффициента снижения температуры резания, свидетельствующее о необходимости учета температурного ограни-

чения:  $K_{\Theta o} = \Theta_o / C_{\Theta} (2m/(1-2m)M)^m C_i^{(y_v n_t - y_t)/y_i} t^{x_t}$ .

Выполняя ряд дополнительных преобразований, в окончательном виде оптимальные по мультипликативной свертке критериев себестоимости и производительности подача  $S_{oM}$  и скорость резания  $V_{oM}$  в зависимости от параметров механической обработки определяются следующим образом:

$$S_{oM}(\xi) = \left( \frac{R_a}{C_R K_R k_R(\xi)} \right)^{1/y_r};$$

$$V_{oM}(\xi) = \begin{cases} \left( \frac{\Theta}{C_{\Theta} K_{\Theta} k_{\Theta}(\xi) t^{x_t} S_{oM}^{y_t}} \right)^{1/n_t}, & K_{\Theta o} \leq 1; \\ \left( \frac{2m}{(1-2m)(t_c + A_u/A)} \right)^m \frac{C_V K_V K_T}{t^{x_v} S_{oM}^{y_v}}, & K_{\Theta o} \geq 1, \end{cases} \quad (3.35)$$

где  $K_{\Theta o} = \Theta_o / C_{\Theta} t^{x_t} \left( \frac{2m}{(1-2m)(t_c + A_u/A)} \right)^m \frac{C_V K_V}{t^{x_v} S_{o2}^{y_v}} \left( \frac{C_R K_R t^{x_r}}{R_a} \right)^{(y_v n_t - y_t)/y_r}$ .

### 3.3.4. Сравнительный анализ оптимальных режимов резания при чистовом точении фасонных поверхностей, рассчитанных по различным критериям

В результате сравнительного анализа зависимостей оптимальных подач и скоростей резания от условий обработки, определяемых по различным критериям – максимальной производительности (3.22), минимальной себестоимости (3.30) и мультипликативной свертки критериев себестоимости и производительности (3.35) установлено:

- оптимальная подача не зависит от выбора критерия оптимальности и определяется ограничением по шероховатости (это справедливо в том случае, когда скорость резания несущественно влияет на шероховатость и не учитывается в этом ограничении);
- оптимальная скорость резания не зависит от выбора критерия оптимально-

сти в том случае, когда она определяется с учетом температурного ограничения при превышении фактической температурой резания допустимого уровня;

- оптимальные скорости резания, определяемые без учета температурного ограничения при температурах резания, ниже допустимого уровня (с учетом ограничения по режущим свойствам инструмента), существенно отличаются:

- оптимальная по себестоимости скорость резания меньше скорости, оптимальной по производительности (коэффициент изменения  $K_{VC}$ ); оптимальная по мультипликативной свертке критериев скорости резания меньше скорости резания, оптимальной по производительности (коэффициент изменения  $K_{VM}$ ):

$$K_{VC} = \frac{V_{oC}}{V_{oP}} = \left[ \frac{mT}{(1-m)(t_c + A_u/A)} \right]^m ; K_{VM} = \frac{V_{oM}}{V_{oP}} = \left[ \frac{2mT}{(1-2m)(t_c + A_u/A)} \right]^m . (3.36)$$

Таким образом, рассчитав оптимальную по производительности скорость резания  $V_{oP}$ , можно установить оптимальные по другим критериям скорости резания достаточно простым расчетом:  $V_{oC} = K_{VC} V_{oP}$ ,  $V_{oM} = K_{VM} V_{oP}$ .

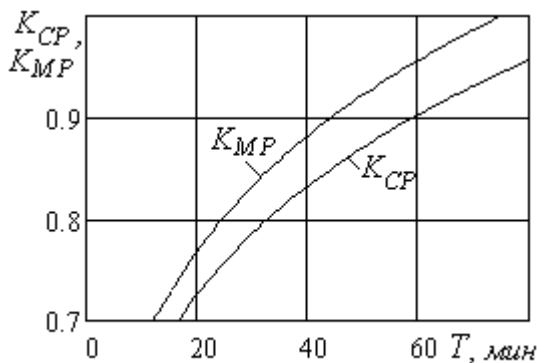


Рисунок 3.14. Графики зависимости коэффициентов связи между оптимальными по различным критериям скоростями резания  $K_{CP}$  и  $K_{MP}$  от стойкости инструмента  $T$

Установленные коэффициенты позволяют выполнить сравнительный анализ оптимальных по различным критериям скоростей резания. Оптимальные по себестоимости и свертке критериев себестоимости и производительности скорости резания рассчитываются с помощью коэффициентов связи, представленных на рисунке 3.14. Коэффициенты, связывающие оптимальные по различным критериям скорости резания увеличиваются с увеличением стойкости режущего инструмента,

принятой для расчетов оптимальных по производительности скоростей резания. Скорости резания, оптимальные по себестоимости в среднем на 5% ниже, чем скорости, оптимальные по критерию свертки и на 5% - 15% ниже скоростей, оптимальных по производительности.

Примеры расчетов оптимальных режимов резания приведены для двух вариантов обработки: конструкционной стали 45 и нержавеющей стали 95X18 в следующих условиях: чистовое точение резцами Т15К6 (передний угол  $\gamma = 0^\circ$ ; главный угол резца в плане  $\varphi = 90^\circ$ , радиус при вершине  $r = 1\text{ мм}$ ); глубина резания  $t = 1\text{ мм}$ ; стоимость станкоминуты  $A = 5\text{ коп/мин}$ ; стоимость 1 периода стойкости инструмента  $A_u = 50\text{ коп/период}$ ; время смены инструмента  $t_c = 5\text{ мин}$ ; требуемая шероховатость обработанной поверхности  $R_a = 2,5\text{ мкм}$  (Приложение 2).

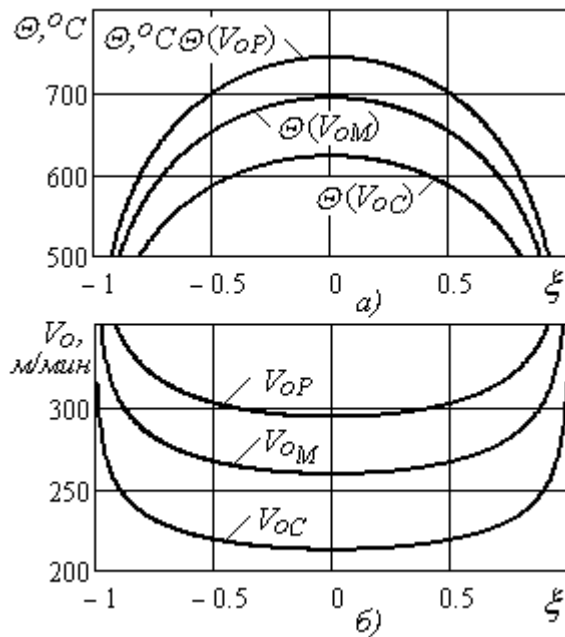


Рисунок 3.15. Графики изменения температур резания – а) и оптимальных по различным критериям скоростей резания – б) вдоль безразмерной координаты  $\xi$  при обработке стали 45

сти, оптимальной по производительности (коэффициент изменения  $K_{VC} = 0,72$ ); оптимальная по мультипликативной свертке критериев скорость резания в 1,1 раз меньше скорости резания, оптимальной по производительности (коэффициент изменения  $K_{VM} = 0,88$ ).

Закономерности изменения оптимальных скоростей резания  $V_o$  вдоль безразмерной координаты  $\xi$ , по различным критериям оптимизации, представлены на

Закономерности изменения температур резания вдоль безразмерной координаты  $\xi$  для указанных условий обработки стали 45, рассчитанных для оптимальных по различным критериям значениям подач и скоростей резания, представлены на рис. 3.15а. Во всем диапазоне изменения температуры резания не превышают допустимого уровня  $\Theta_o = 800^\circ\text{C}$ . Следовательно, оптимальные режимы резания определяются без учета температурных ограничений ( $K_{\Theta} \geq 1$ ):  $S_o = 0,3\text{ мм/об}$ ;  $V_{oP} = 293\text{ м/мин}$ ;  $V_{oC} = 212\text{ м/мин}$ ,  $V_{oM} = 258\text{ м/мин}$ .

В результате сравнения полученных оптимальных скоростей резания установлено, что оптимальная по себестоимости скорость резания в 1,4 раз меньше скорости

рис. 3.15б. Установлено, что в разных точках криволинейной поверхности оптимальные режимы могут изменяться до 1,5 раз. Это необходимо учитывать при выборе оптимальных режимов резания.

Для обеспечения возможности сравнительного анализа принятые целевые функции производительности (3.2), себестоимости  $C$  (3.6) и их мультипликативной свертки  $C_M$  (3.11) целесообразно представить в относительном виде, где в качестве базы для сравнения приняты их значения при оптимальных режимах резания - подачах  $S_o$  и скоростях  $V_o$ :  $K_P = P(V,S)/P(V_o,S_o)$ ;  $K_C = C(V,S)/C(V_o,S_o)$ ;  $K_M = C_M(V,S)/C_M(V_o,S_o)$ :

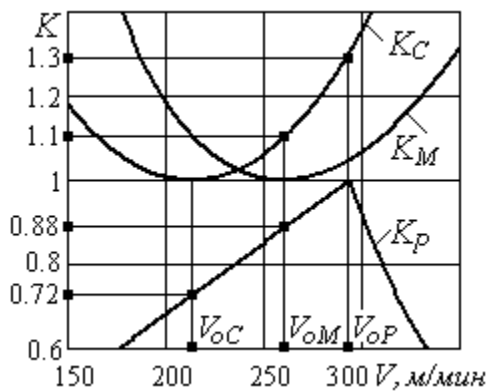


Рисунок 3.16. Зависимость относительных целевых функций производительности, себестоимости и их мультипликативной свертки от скорости резания

Графики изменения относительных целевых функций производительности  $K_P$ , себестоимости  $K_C$  и их мультипликативной свертки  $K_M$  в зависимости от скорости резания представлены на рисунке 3.16.

Графики свидетельствуют о наличии экстремумов: максимума у функции производительности  $K_P$  и минимума у функций себестоимости  $K_C$  и их мультипликативной свертки  $K_M$ . Обеспечивая за счет выбора оптимальной по себестоимости скорости резания  $V_{oC}$  минимум себестоимости ( $K_C(V_{oC}) = 1$ ), получаем снижение производительности в 1,4 раза ( $K_P(V_{oC}) = 0,72$ ). Выбирая скорость резания  $V_{oP}$ , оптимальную по производительности, обеспечиваем максимум производительности ( $K_P(V_{oP}) = 1$ ), но получаем повышение себестоимости в 1,3 раза ( $K_C(V_{oP}) = 1,3$ ). Минимальные потери каждой из целевых функций - производительности ( $K_P(V_{oM}) = 0,88$ ) и себестоимости ( $K_C(V_{oM}) = 1,1$ ) достигаются при выборе оптимальной по мультипликативной свертке критериев себестоимости и производительности скорости резания  $V_{oM}$ .

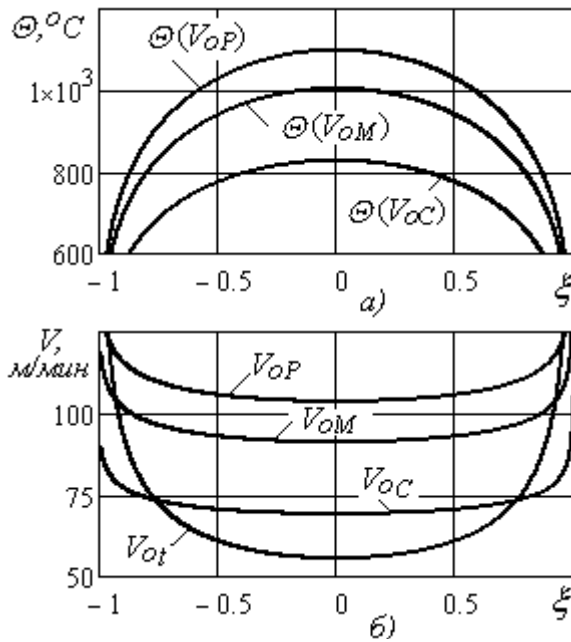


Рисунок 3.17. Графики изменения температур резания – а) и оптимальных по различным критериям скоростей резания – б) вдоль безразмерной координаты  $\xi$  при обработке стали 95X18

Второй пример расчета приведен для труднообрабатываемой стали 95X18, которая наиболее распространена при изготовлении деталей металлургического оборудования. Вследствие низкой теплопроводности этой стали температура в зоне резания значительно выше, чем при обработке конструкционных сталей.

Закономерности изменения температур резания вдоль безразмерной координаты  $\xi$  для указанных ранее условий обработки стали 95X18, рассчитанных для оптимальных по различным критериям значениям подач и скоростей резания, представлены на рисунке 3.17а. Оптимальные режимы резания, рассчитанные без учета температурных ограничений:  $S_o = 0,3\text{мм/об}$ ;  $V_{oP} = 100\text{м/мин}$ ;  $V_{oC} = 67\text{м/мин}$ ,  $V_{oM} = 88\text{м/мин}$ . В определенном диапазоне изменения безразмерной координаты температуры резания превышают допустимый уровень  $\Theta_o = 800^{\circ}\text{C}$ . В этом случае оптимальная скорость резания должна определяться с учетом температурных ограничений и составляет  $V_{ot} = 58\text{м/мин}$ .

Учет температурных ограничений значительно снижает оптимальную скорость резания. Снятие температурных ограничений позволит существенно повысить эффективность обработки.

Количественная оценка возможностей интенсификации режимов резания за счет снятия температурных ограничений может быть выполнена на основании коэффициентов повышения производительности  $K_P$ ; снижения себестоимости  $K_C$ ; снижения отношения себестоимости к производительности  $K_M$ :



$$K_P = K_{\Theta}^{-1/n_t}; K_C = \frac{1 + MV_o^{k_V} S_o^{k_S}}{1 + MK_{\Theta}^{-1/mn_t} V_o^{k_V} S_o^{k_S}}; K_M = \frac{1 + MV_o^{k_V-1} S_o^{k_S-1}}{1 + MK_{\Theta}^{-1/mn_t} V_o^{k_V-1} S_o^{k_S-1}}. \quad (3.37)$$

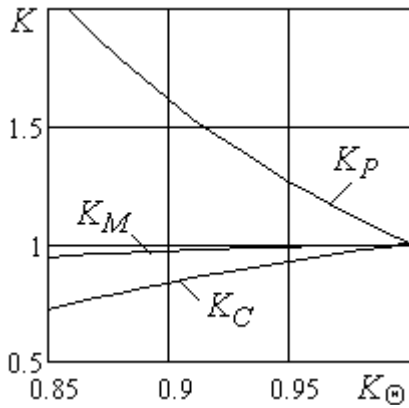


Рисунок 3.18. Влияние коэффициента снижения температуры резания на коэффициенты повышения эффективности

Графики зависимости этих коэффициентов от коэффициента снижения температуры резания (рис. 3.18) позволяют оценивать рост производительности и снижение себестоимости при снятии температурных ограничений.

Известным способом снижения температуры резания является использование смазочно – охлаждающих технологических сред. Этот способ достаточно хорошо изучен и описан в литературе [121, 133, 146, 164].

Эффективным способом снижения температуры резания, исследуемым в настоящей работе, является использование инструментов с износостойкими покрытиями.

Для заданных ранее условий обработки снятие температурных ограничений позволит повысить производительность обработки в 2 раза, снизить себестоимость в 1,25раза.

### 3.4. Выводы

1. На основании исследования переменности теплового состояния зоны резания при обработке криволинейных поверхностей определена температура резания с учетом переменности тепловых потоков. Установлено, что в различных точках криволинейной поверхности температура резания может изменяться до 2 раз. Уровень температур, возникающих как для выпуклых, так и для вогнутых поверхностей в отдельных точках достаточно высок и может превышать допустимый для исследуемых материалов - 800°С, что требует учета температурных ограничений для определения режимов резания при токарной обработке криволинейных

поверхностей.

3. Полученные регрессионные зависимости температуры резания  $\Theta(\xi)$  от скорости резания, подачи, глубины с учетом переменности параметров процесса, могут быть использованы в практических расчетах температуры резания для любых условий токарной обработки фасонных поверхностей.

4. С использованием метода линейного программирования выполнена оптимизация по критерию максимальной производительности режимов чистовой токарной обработки фасонных поверхностей с учетом переменности параметров процесса резания. Установлены зависимости оптимальных подач и скоростей резания от условий обработки и характер их изменения вдоль образующих выпуклых и вогнутых поверхностей, которые создают основу для обоснования рекомендаций по выбору оптимальных режимов резания для различных условий обработки. Установлено, что в разных точках криволинейной поверхности оптимальные режимы могут изменяться до 4 раз.

5. Усовершенствована методика оптимизации режимов резания методом геометрического программирования по критерию минимальной себестоимости при точении с учетом переменности действующих ограничений. Методика позволяет обоснованно выбирать оптимальные режимы резания при обработке фасонных поверхностей и может быть использована для любых видов обработки.

6. Разработанная методика многокритериальной оптимизации режимов токарной обработки фасонной поверхности на основе оценки повышения производительности и снижения себестоимости основу для обоснования рекомендаций по выбору оптимальных режимов резания для различных условий обработки фасонной поверхности. Установлено: скорости резания, оптимальные по себестоимости в среднем на 5% ниже, чем скорости, оптимальные по критерию свертки и на 5% - 15% ниже скоростей, оптимальных по производительности.

7. Выполненное исследование позволило определить, что снятие температурных ограничений позволит повысить производительность обработки в 2 раза, снизить себестоимость в 1,25 раза.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ  
ТВЕРДОСПЛАВНОЙ ПЛАСТИНЫ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ  
ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ С ФУНКЦИОНАЛЬНО-  
ОРИЕНТИРОВАННЫМИ СВОЙСТВАМИ

4.1. Особенности применения функционально-ориентированного подхода  
при реализации технологических процессов обработки

Для обеспечения нормальной работы изделия, машины или технологической системы необходимо обеспечить необходимые эксплуатационные свойства. Согласно исследованиям [71, 72] достаточно актуальным на данный момент является обеспечение свойств изделий в машиностроении по функциональной зависимости (зависимо изменяющиеся свойства, независимо изменяющиеся свойства).

Функционально-ориентированная технология дает возможность полностью адаптировать изделие при изготовлении к особенностям его эксплуатации, создает предельный его эксплуатационный потенциал и качественно новую совокупность свойств, и меру полезности изделия. При этом заданные, требуемые или предельные свойства изделия реализуются за счет местного увеличения технических возможностей и свойств отдельных элементов, поверхностей и/или зон изделия в зависимости от функциональных местных особенностей их эксплуатации.

В данной работе предлагается вести разработку технологических процессов более тонко и прецизионно с разбивкой изделия по уровням глубины технологии. Функционально-ориентированный подход при выполнении технологических процессов предусматривает разбивку изделия по уровням глубины технологии в зависимости от функциональных элементов по следующим уровням: на уровне всего изделия, на уровне частей изделия, на уровне составляющих изделия (поверхностная точка, объемная точка, поверхностная линия, объемная линия, поверхность, поверхностный слой, объем), на уровне зон изделия, на уровне макро зон, на уровне микро зон, на уровне нанозон (в случае, если эксплуатационные функ-

ции реализуются на микро- и нано- уровне.) [72].

Реализацию технологических воздействий на каждый функциональный элемент изделия необходимо выполнять на местном уровне. При этом с возможностью обеспечения изменения его свойств в пространстве и во времени в зависимости от особенностей эксплуатации функционального элемента изделия в машине или технологической системе, а также в зависимости от заданного, требуемого или предельного эксплуатационного потенциала всего изделия в целом.

Поскольку обработка фасонных поверхностей деталей характеризуется постоянным изменением параметров процесса резания, то равномерное обеспечение требуемых свойств вдоль образующей целесообразно осуществлять именно на базе функционально-ориентированного подхода.

Алгоритм реализации функционально-ориентированных технологий должен выполняться в соответствии со следующей последовательностью [72]:

- установление особенностей действия эксплуатационных функций на отдельные элементы, поверхности и/или зоны изделия;
- определение параметров отдельных элементов, поверхностей и/или зон, в которых действуют различные эксплуатационные функции;
- определение необходимых технологических воздействий орудий и средств обработки на изделие, которые бы соответствовали и были адекватны по результатам действию эксплуатационных функций;
- ориентация технологических воздействий на отдельные элементы, поверхности и/или зоны изделия на базе определенных новых принципов;
- реализация технологических воздействий в соответствии и адекватно действию эксплуатационных функций;
- обеспечение заданной совокупности свойств отдельных элементов, поверхностей и/или зон изделия в зависимости от особенностей действия в них эксплуатационных функций.

Применение функционально-ориентированного подхода на этапах выполнения технологического процесса обработки необходимо вести итерационно на базе предельного критерия качества и эффективности, например, с использовани-

ем методов оптимизации технологических процессов [92]. Это позволяет реализовать качественно новую совокупность свойств и меру полезности изделия.

Функцию технологических преобразований изделия можно представить с помощью следующего выражения:

$$\varphi : C_V \rightarrow C_W ,$$

где  $\varphi$  - функция преобразований,  $C_V$  - вектор начальных свойств (показателей качества) заготовки,  $C_W$  - вектор конечных свойств (показателей качества) изделия.

Здесь:

$$C_V = \left\{ \begin{array}{c} C_{V1} \\ C_{V2} \\ \dots \\ C_{VR} \end{array} \right\}, \quad C_W = \left\{ \begin{array}{c} C_{W1} \\ C_{W2} \\ \dots \\ C_{WS} \end{array} \right\}; \quad (4.1)$$

где  $C_{Vi}$  -  $i$ -й элемент множества  $C_V$ ,  $C_{Wj}$  -  $j$ -й элемент множества  $C_W$ ,  $R$  - мощность множества  $C_V$ ,  $S$  - мощность множества  $C_W$ .

При этом заданные, требуемые и предельные свойства изделий должны обеспечиваться на базе особых принципов.

В настоящем исследовании представлено обоснование эффективности применения специального твердосплавного металлорежущего инструмента с функционально-ориентированными свойствами на базе следующих основных принципов [72]:

1. Принцип функционального соответствия особенностей действия элементарной функции в каждом функциональном элементе изделия, характеристик реализации технологических воздействий и параметров обеспечения необходимых свойств этом функциональном элементе изделия (рисунок 4.1) на каждом уровне глубины технологии.

Этот принцип отвечает на вопрос: какое технологическое воздействие или свойство изделия нужно выполнить или обеспечить в зависимости от особенностей действия эксплуатационной функции? То есть он обеспечивает заданное свойство функционального элемента в микро, макро зоне и участке изделия. Поэтому первый принцип ориентации технологических воздействий и свойств изделия в соответствии с действующей функцией можно математически представить следующими тремя отображениями (преобразованиями) [72]:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{11} : F &\rightarrow TB ; \\ \varphi_{12} : TB &\rightarrow C ; \\ \varphi_{13} : C &\rightarrow F , \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

где  $\varphi_{11}$  - отображение (преобразование) эксплуатационной функции  $F$  изделия в технологические воздействия  $TB$ ;  $\varphi_{12}$  - отображение (преобразование) технологических воздействий  $TB$  в свойства  $C$  изделия;  $\varphi_{13}$  - отображение (преобразование) свойств  $C$  в технологические воздействия  $TB$ .

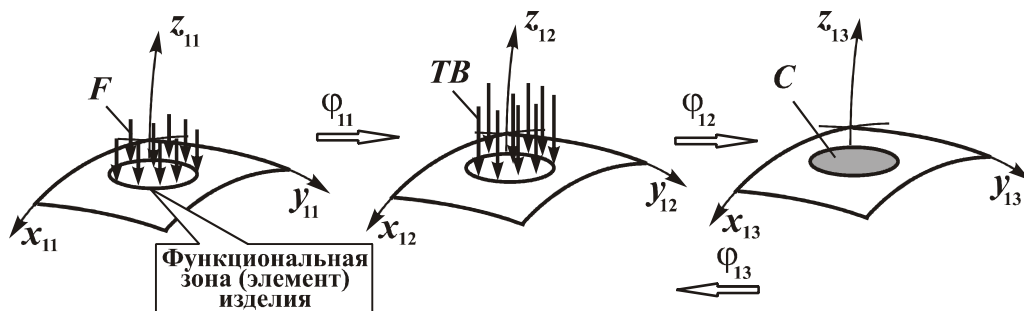


Рисунок 4.1. Гипотетическая схема, поясняющая реализацию первого принципа ориентации технологических воздействий  $TB$  и свойств  $C$  функционального элемента изделия в зависимости от действия эксплуатационной функции  $F$

2. Принцип топологического соответствия геометрических параметров функционального элемента изделия, в котором действует элементарная функция при эксплуатации, геометрическим параметрам зонального элемента реализации технологических воздействий потоков материи, энергии и информации на изделие и геометрических параметров зонного элемента обеспечения необходимых свойств (рисунок 4.2) на каждом уровне глубины технологии.

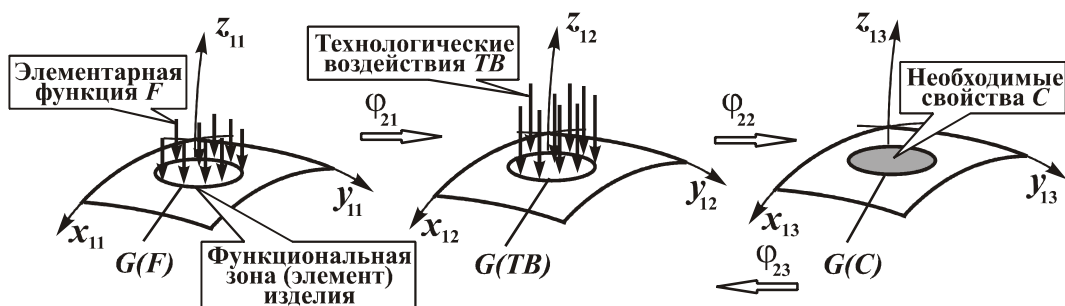


Рисунок 4.2. Гипотетическая схема, поясняющая реализацию второго принципа ориентации технологических воздействий  $TB$  и свойств  $C$  функционального элемента изделия в зависимости от действия эксплуатационной функции

Этот принцип, в полной мере, дает ответы на вопросы: куда нужно реализовывать технологические воздействия и где обеспечивать необходимые свойства изделия. Он отвечает за пространственную точность реализации технологических воздействий в заданные функциональные микро, макро зоны и участки изделия, а также за пространственное расположение в них необходимых свойств изделия. При этом второй принцип ориентации можно описать следующими тремя отображениями (преобразованиями) [72]:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{21} : G(F) &\rightarrow G(TB); \\ \varphi_{22} : G(TB) &\rightarrow G(C); \\ \varphi_{23} : G(C) &\rightarrow G(F), \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

где  $\varphi_{21}$  - отображение (преобразование) геометрических параметров зоны действия эксплуатационной функции  $G(F)$  изделия в геометрические параметры зоны реализации технологических воздействий  $G(TB)$ ;  $\varphi_{22}$  - отображение (преобразование) геометрических параметров зоны реализации технологических воздействий  $G(TB)$  в геометрические параметры зоны обеспечения свойств  $G(C)$  изделия;  $\varphi_{23}$  - отображение (преобразование) геометрических параметров зоны обеспечения свойств  $G(C)$  в геометрические параметры зоны действия эксплуатационной функции  $G(F)$  изделия.

3. Принцип адекватной зависимости пространственных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, технологических воздействий и эксплуатационных свойств в пространстве каждого функционального элемента изделия (рисунок 4.3) на каждом уровне глубины технологии.

Этот принцип отвечает на вопрос: как изменяются свойства в пространстве каждого функционального элемента изделия, и как нужно реализовать технологическое воздействие (постоянное или переменное) на функциональный элемент изделия.

Это качественный принцип, но действующий на микро уровне функционального элемента изделия и обеспечивающий возможность изменения функциональных свойств изделия за счет переменных технологических воздействий по заданному закону.

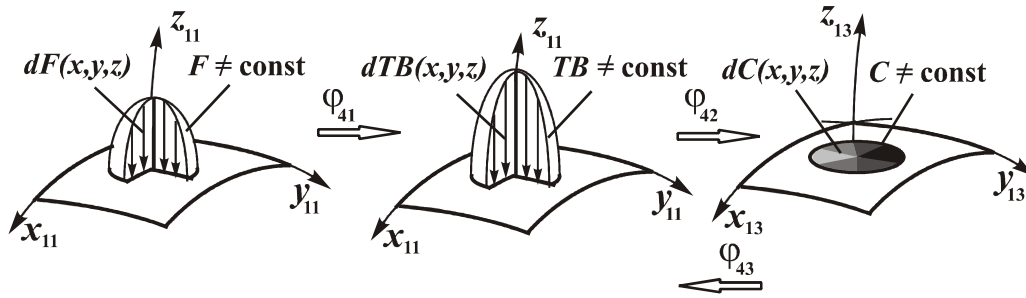


Рисунок 4.3. Гипотетическая схема, поясняющая реализацию принципа ориентации переменных технологических воздействий  $TB \neq \text{const}$  и переменных свойств  $C \neq \text{const}$  в функциональный элемент изделия в зависимости от действия переменной эксплуатационной функции  $F \neq \text{const}$

Этот принцип ориентации технологических воздействий и свойств изделия в зависимости от особенностей действия эксплуатационной функции в элементарном объеме материала изделия можно представить следующими отображениями [72]:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{41} : dF(x, y, z) &\rightarrow dTB(x, y, z); \\ \varphi_{42} : dTB(x, y, z) &\rightarrow dC(x, y, z); \\ \varphi_{43} : dC(x, y, z) &\rightarrow dF(x, y, z), \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

где  $\varphi_{41}$  - отображение (преобразование) элемента эксплуатационной функции  $dF(x, y, z)$  изделия в элемент технологических воздействий  $dTB(x, y, z)$ ;  $\varphi_{42}$  - отображение (преобразование) элемента технологических воздействий  $dTB(x, y, z)$  в элемент свойств  $dC(x, y, z)$  изделия;  $\varphi_{43}$  - отображение (преобразование) элемента свойств  $dC(x, y, z)$  в элемент эксплуатационной функции  $dF(x, y, z)$  изделия.

4. Принцип структурного соответствия действия множества элементарных функций, реализации множества технологических воздействий и выполнения множества свойств в функциональных элементах изделия из условия обеспечения заданных, требуемых или предельных свойств всего изделия на каждом уровне глубины технологии.

Этот принцип математически можно представить следующей системой [72]:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{61} : Str\{F, A\} &\rightarrow Str\{TB, B\}; \\ \varphi_{62} : Str\{TB, B\} &\rightarrow Str\{C, D\}; \\ \varphi_{63} : Str\{C, D\} &\rightarrow Str\{F, A\}, \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$



где  $\varphi_{61}$  - отображение (преобразование) структуры множества эксплуатационной функции  $F = \{F_1, F_2, F_3, \dots, F_m\}$  и множества отношений  $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$  изделия в структуру множества технологических воздействий  $TB = \{TB_1, TB_2, TB_3, \dots, TB_m\}$  и множества отношений  $B = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_m\}$ ;  $\varphi_{62}$  - отображение (преобразование) структуры множества технологических воздействий  $TB = \{TB_1, TB_2, TB_3, \dots, TB_m\}$  и множества отношений  $B = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_m\}$  в структуру множества свойств  $C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_m\}$  и множества отношений  $D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_m\}$  изделия;  $\varphi_{63}$  - отображение (преобразование) структуры множества свойств  $C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_m\}$  и множества отношений  $D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_m\}$  в структуру множества эксплуатационной функции  $F = \{F_1, F_2, F_3, \dots, F_m\}$  и множества отношений  $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$  изделия.

Этот принцип может обеспечивать полное или частичное структурное соответствие множеств параметров ориентации элементарных функций, технологических воздействий и свойств, а также отношений между ними.

5. Принцип адекватного структурно-функционального соответствия свойств в пространстве и во времени каждого функционального элемента заданному, требуемому или предельному потенциалу общих свойств всего изделия в целом на каждом уровне глубины технологии. Этот принцип можно представить следующим отображением (преобразованием) [72]:

$$\varphi_{7\xi} : C_\xi \rightarrow C, \quad (4.6)$$

где  $\varphi_{7\xi}$  - функция отображения свойств в пространстве и во времени каждого функционального элемента в предельные или заданные свойства всего изделия в целом;  $C_\xi$  - свойство любого  $\xi$ -го элемента изделия;  $C$  - общие свойства всего изделия в целом.

На базе этого принципа ориентации реализуется процесс обеспечения необходимой совокупности свойств изделия в функциональных зонах и элементах, его полной адаптации при изготовлении к особенностям эксплуатации и обеспечения максимального потенциала свойств изделия.

#### 4.2. Функционально-ориентированный подход при нанесении износостойких покрытий с целью обеспечения эксплуатационных свойств функциональных элементов твердосплавной пластины

При создании функционально-ориентированных технологий, для обеспечения заданной совокупности свойств изделий, должны реализовываться следующие виды обеспечения: обеспечение по свойствам материала, структурное обеспечение, конструкторское обеспечение, технологическое обеспечение, эксплуатационное обеспечение.

Можно отметить, что функционально-ориентированные технологии позволяют не только обеспечивать высокие физико-механические местные свойства материала изделия, но и создавать местные специальные нетрадиционные его свойства. На базе создания местных свойств материала изделия на различных уровнях ориентации и реализации, обеспечивается возможность создания общих свойств для всего изделия в целом, а именно с особыми функциональными и эксплуатационными свойствами.

В качестве примера на рисунке 4.4 приведены некоторые варианты схем, поясняющие различные виды реализации специальных функциональных свойств материала элементов изделий, изготавливаемых с применением функционально-ориентированных технологий. Здесь, на рисунке 4.4,а представлена схема изделия с функционально-зависимыми свойствами материала  $F(C) = f(x)$  в одном направлении  $x$ ; на рисунке. 4.4,б – с функционально-зависимыми свойствами материала  $F(C) = f(x, y)$  в двух направлениях  $x$  и  $y$ ; на рисунке. 4.4,в – с функционально-зависимыми свойствами материала  $F(C) = f(x, y, z)$  в трех направлениях  $x$ ,  $y$  и  $z$ ; на рисунке. 4.4,г – со ступенчатыми свойствами материала в одном направлении  $F(C) = f(x_i)$ , где  $i$  – количество ступеней свойств материала в направлении  $x$ ; на рис. 4.4,д – со ступенчатыми свойствами материала в двух направлениях  $F(C) = f(x_i, y_j)$ , где  $i$  – количество ступеней свойств материала в первом направлении  $x$ ,  $j$  – количество ступеней свойств материала во втором направлении  $y$ ; на ри-

сунке. 4.4,ж – со ступенчатыми свойства материала в трех направлениях  $F(C) = f(x_i, y_j, z_k)$ , где  $i$  – количество ступеней свойств материала в одном направлении  $x$ ,  $j$  – количество ступеней свойств материала во втором направлении  $y$ ,  $k$  – количество ступеней свойств материала в третьем направлении  $z$ ; на рисунке. 4.4,з, е, и – со специальными свойствами материала изделия  $F_1(C)$ ,  $F_2(C)$ ,  $F_3(C)$  соответственно. Возможны и другие множества различных вариантов свойств изделий.

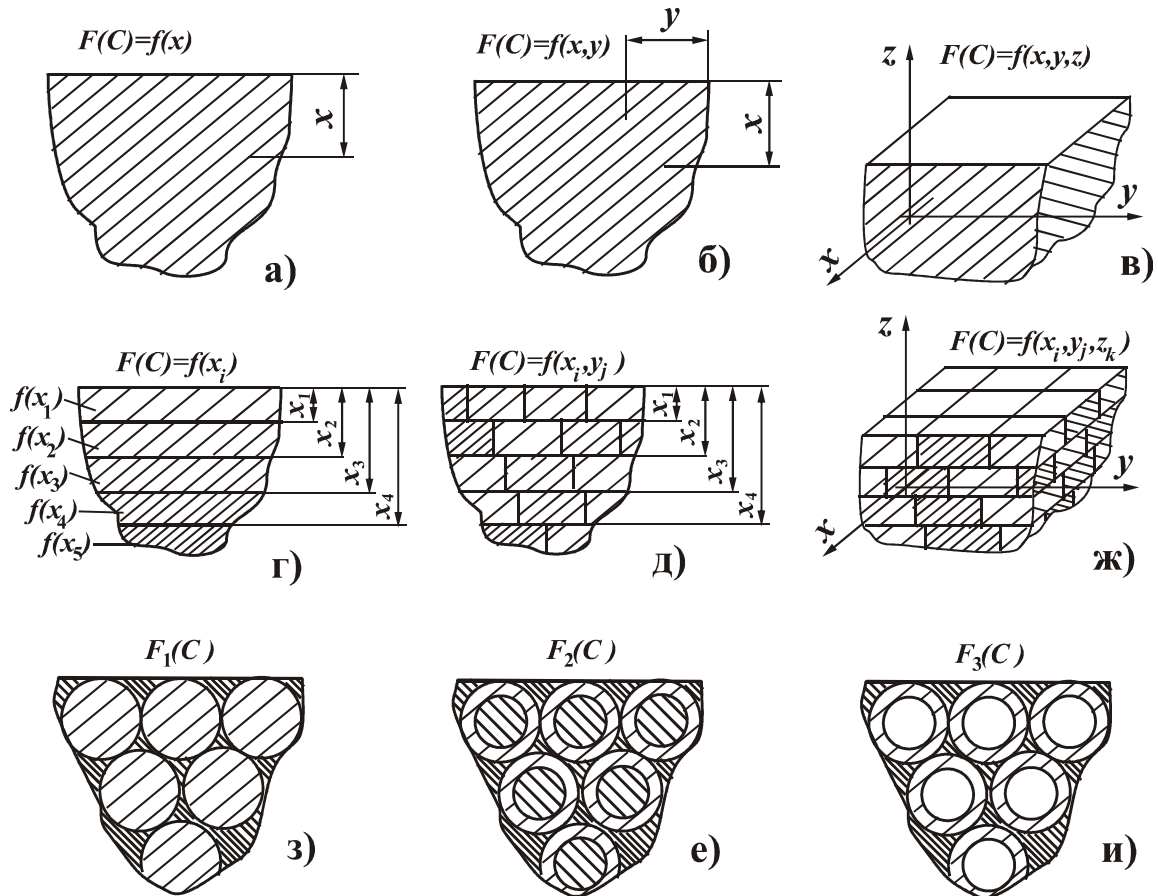


Рисунок 4.4. Варианты схем, поясняющие различные виды специальных местных свойств материала изделий на базе функционально-ориентированных технологий: а – функционально-зависимые свойства в одном направлении; б – функционально-зависимые свойства в двух направлениях; в – функционально-зависимые свойства в трех направлениях; г – ступенчатые свойства в одном направлении; д - ступенчатые свойства в двух направлениях; ж - ступенчатые свойства в трех направлениях; з, е, и – специальные свойства

На рисунке. 4.5 представлены некоторые варианты схем со специальными

покрытиями изделий, наносимых на базе функционально-ориентированных технологий, обеспечивающих новые местные свойства.

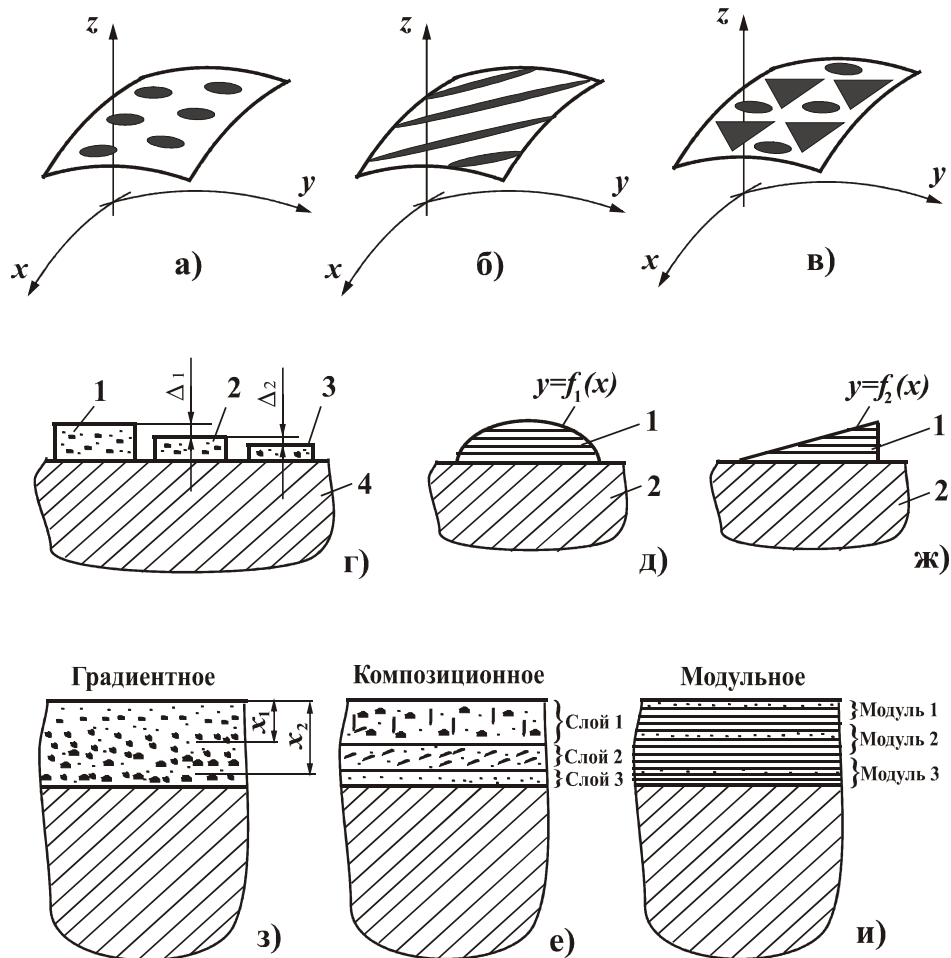


Рисунок 4.5. Варианты схем со специальными покрытиями изделий с новыми местными свойствами на базе функционально-ориентированных технологий: а, б, в – варианты геометрических форм покрытий на поверхности изделий; г, д, ж – варианты геометрических форм покрытий по высоте

Здесь, на рисунке. 4.5,а, б, в приведены варианты геометрических форм покрытий на поверхностях изделий. Различные топологические формы покрытия поверхности изделия обеспечивают различные их функциональные свойства в зависимости от требуемых эксплуатационных особенностей. На рисунке. 4.5,г, д, ж – варианты геометрических форм покрытий по высоте. На рисунке. 4.5,г показаны покрытия 1, 2, 3, отличающиеся друг от друга по высоте  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  на изделии 4. Разновысотная толщина покрытия обеспечивает различные схемы приработки со-

пряженных поверхностей, при этом создаются необходимые свойства, например, пары трения. При этом выполнение покрытия по высоте с определенной формой  $y = f_1(x)$  или  $y = f_2(x)$  может также обеспечивать различные нетрадиционные свойства эксплуатации различных элементов машин. На рисунке. 4.57,з, е, и – варианты покрытий со специальными свойствами, а именно градиентное, композиционное и модульное покрытия. Можно отметить, что в настоящее время представляют большой интерес модульные покрытия, в которых модули особо тонких пленок на микро или наноуровне решают заданные эксплуатационные задачи изделия [70, 73, 74].

Применительно к данной работе под функциональными свойствами материала следует понимать свойства инструментального материала с износостойкими покрытиями.

Таким образом, функционально-ориентированные технологии дают возможность изготавливать различные изделия машиностроения с прецизионной местной ориентацией свойств на наноуровне, микроуровне, макроуровне, на уровне зон, составляющих и участков в зависимости от эксплуатационных местных особенностей изделия. Это в целом дает возможность достигать существенного повышения свойств изделий в период их эксплуатации, а также создавать новые свойства, ранее неизвестные, что обеспечивает высокие технико-экономические показатели машин и технических систем.

#### 4.3. Анализ эффективности обеспечения эксплуатационных функций элементов твердосплавной пластины за счет применения износостойких покрытий с функционально-ориентированными свойствами

В целом функционально-ориентированный подход базируется на комплексном анализе изделия и установлении особенностей действия эксплуатационных функций на его функциональные (исполнительные) части, элементы и зоны. Далее предусмотрено деление изделия на функциональные (исполнительные) части  $\Phi Ч$ , составляющие  $\Phi С$ , зоны  $\Phi З$  и определение необходимых параметров функ-

циональных (исполнительных) частей, элементов и зон изделия. К этим параметрам можно отнести функциональные, геометрические, количественные, качественные и другие свойства функциональных частей, элементов и зон изделия.

На рисунке 4.6 показана иерархическая структура функциональных элементов резца с механическим креплением твердосплавной пластины, на каждом уровне деления располагаются различные виды функциональных элементов. Можно отметить, что в целом функционально-ориентированный подход в дополнительно предусматривает деление изделия еще по следующим уровням: уровень макрозон, уровень микрозон и уровень нанозон. В данной работе деление изделия будем выполнять по четырем уровням [72].

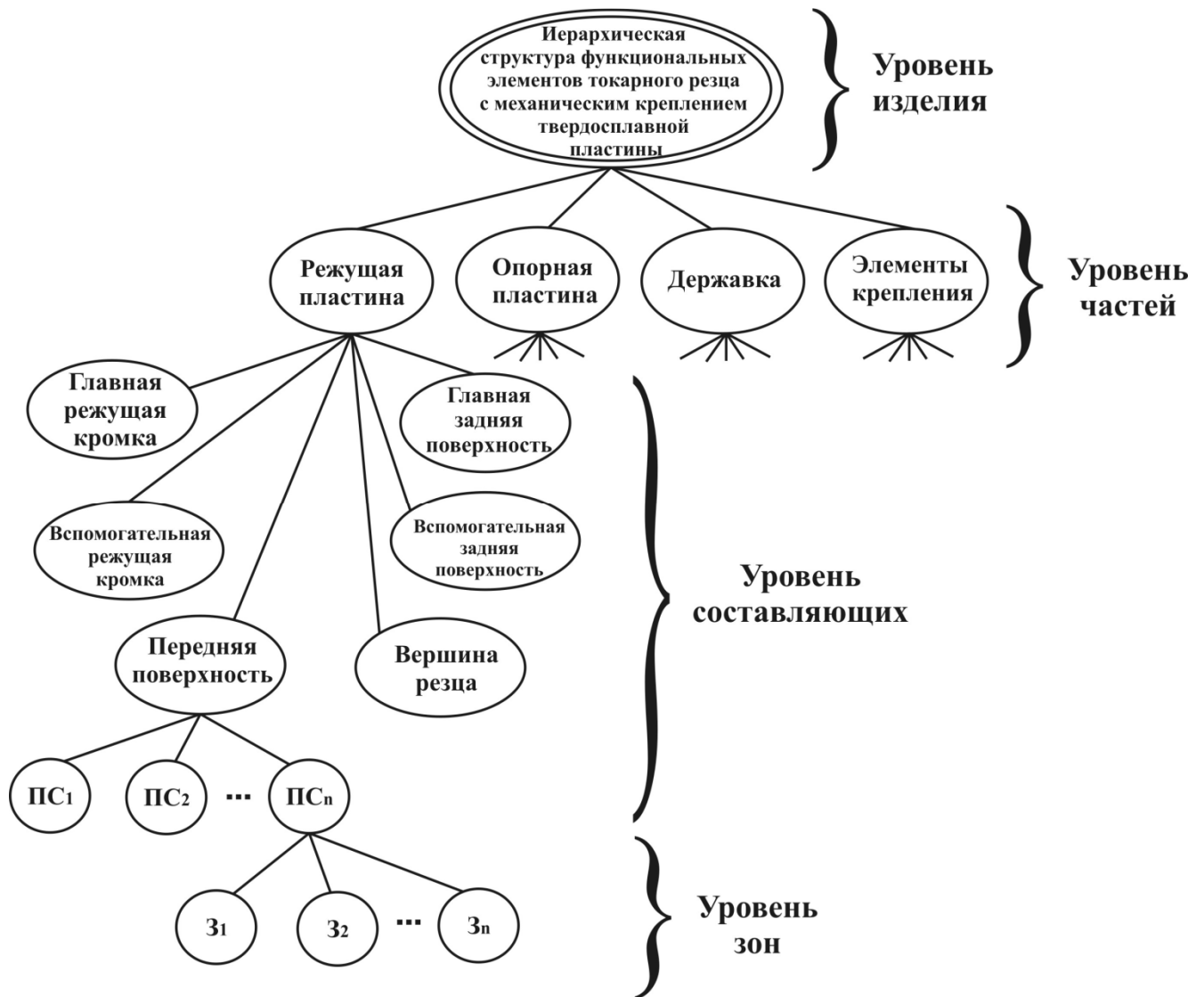


Рисунок 4.6. Иерархическая структура функциональных элементов изделия

$ПС_n$  – n-й поверхностный слой,  $З_n$  - зональные элементы

После деления изделия на функциональные элементы определяется способ реализации заданных свойств изделия на базе группы особых принципов ориентации. В данной работе предусмотрено обеспечение свойств твердосплавных резцов за счет нанесения функционально-ориентированных покрытий. При этом, их тип, вид, вариант, количество и качество целенаправленно определяются, а также топологически, функционально и количественно ориентируются при их реализации в отдельные зоны инструмента в зависимости от заданных функциональных особенностей его эксплуатации. Применение функционально-ориентированных технологий для режущего инструмента позволяет максимально повысить его общие эксплуатационные параметры за счет местного увеличения технических возможностей и свойств отдельных элементов, поверхностей и/или зон в зависимости от функциональных местных особенностей их эксплуатации [72]. При этом инструмент максимально адаптирован по своим свойствам к особенностям его эксплуатации и проявляет свой полный потенциал.

В качестве эксплуатационных функций, действующих на резец, в данной работе предусмотрено рассматривать тепловые воздействия в зоне обработки.

Качество деталей в значительной степени определяется поверхностным слоем, формируемым под влиянием температурных процессов в процессе механической обработки. Тепловые процессы в значительной степени определяют функционирование технологических систем, оказывая существенное влияние на работоспособность режущего инструмента и качество обработки деталей [114, 129].

Распределение температуры на рабочих поверхностях режущего лезвия, является одной из важнейших характеристик тепловых явлений при эксплуатации инструмента и влияет на закономерности износа этих поверхностей. Инструментальные материалы сохраняют свои исходные свойства - механическую прочность, твердость, износостойкость при повышении температуры до значений, не превышающих их температуростойкости. При более высокой температуре в материале происходят структурно-фазовые превращения, вызывающие снижение его твердости. Следствием этого является уменьшение износостойкости, повышения интенсивности износа и сокращение периода стойкости инструмента.

Одним из способов исследования температурного состояния инструмента является использование программного пакета SolidWorks 2012 элементов как эффективного средства решения различных задач, в том числе исследования, расчета и анализа тепловых процессов в технических системах. Модель сделана в SolidWorks, а расчеты выполнены с применением расчетного модуля Simulation, который входит в этот программный пакет. Решение задачи определения теплового состояния резца, которое осуществляется с помощью данного программного пакета, позволяет сделать численный анализ тепловых явлений методом конечных элементов (МКЭ).

Первым этапом исследований является аналитическое определение температурного поля лезвия инструмента и температуры резания, позволяют прогнозировать его тепловое состояние в зависимости от условий обработки.

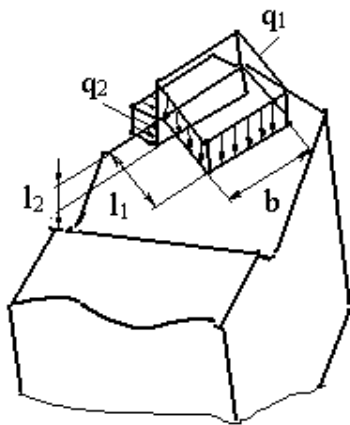


Рисунок 4.7. Схема расположения потоков теплоты при тчении

В зоне резания имеет место переплетение путей движения потоков теплоты, поэтому математическое описание процесса теплообмена оказывается очень сложным. Без потери точности и без отклонений от реальной физики процесса схему движения теплоты можно значительно упростить, введя понятие об итоговых потоки теплообмена через контактные поверхности инструмента [114]. Эти потоки показаны на рисунке 4.7 в виде источников интенсивностью  $q_1$  и  $q_2$ . Интенсивность этих источников распределена по площадкам  $b \times l_1$  и  $b \times l_2$  неравномерно. Однако отсутствие надежных данных по описанию законов распределения интенсивности позволяет для практических расчетов считать источники  $q_1$  и  $q_2$  распределенными по соответствующим площадкам равномерно [114].

Расчет величин плотности тепловых потоков осуществлен с помощью математического пакета Mathcad Professional 15 (приложение 2). Установлено, что при обработке фасонной поверхности наблюдается изменение тепловых потоков и температуры резания в зоне обработки вдоль образующей. Температура резания имеет наибольшее значение в точке, соответствующей началу системы координат (рис. 3.5, 3.6).



Аналитически определены температурные поля лезвия инструмента и значения температуры резания. Расчеты выполнены для следующих условий обработки: обрабатываемый материал – сталь 45, инструментальный материал – твердый сплав Т15К6; износостойкие покрытия - карбид титана TiC, нитрид титана TiN. Геометрические параметры инструмента: главный угол в плане  $\varphi = 93^\circ$ , вспомогательный  $\varphi_1 = 8^\circ$ , задний  $\alpha = 5^\circ$ , передний  $\gamma = 15^\circ$ . Режимы резания: глубина резания  $t = 1$  мм, подача  $s = 0.2$  мм/об, скорость резания  $V = 3$  м/с. Расчет величин плотности тепловых потоков осуществлен с помощью математического пакета Mathcad Professional 15. Так, для инструмента без покрытия плотность равномерно распределенного теплового потока составила: по передней поверхности -  $q_1 = 2,421 \times 10^8$  Вт / м<sup>2</sup>, на задней поверхности -  $q_2 = -6,481 \times 10^8$  Вт / м<sup>2</sup>.

Исследования температурного состояния инструмента выполнялись при помощи программного пакета SolidWorks 2012, в котором получена конечно-элементная модель резца с режущей пластиной трехгранной и ромбической формы из твердого сплава без покрытия (рисунок 4.8) и с покрытиями карбида титана TiC; нитрида титана TiN (рисунок 4.9); тепловые расчеты выполнены с применением расчетного модуля Simulation, входящего в этот программный пакет.

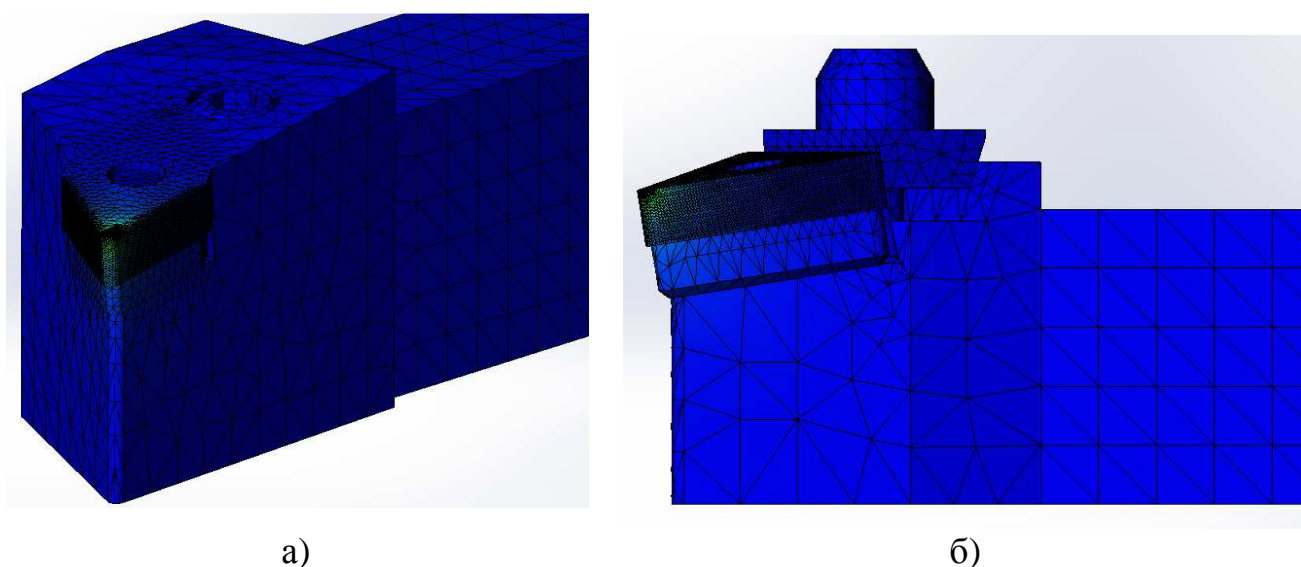


Рисунок 4.8. Конечно-элементная модель резцов без покрытия:

а) – с режущей пластиной ромбической формы; б) – с режущей пластиной трехгранной формы

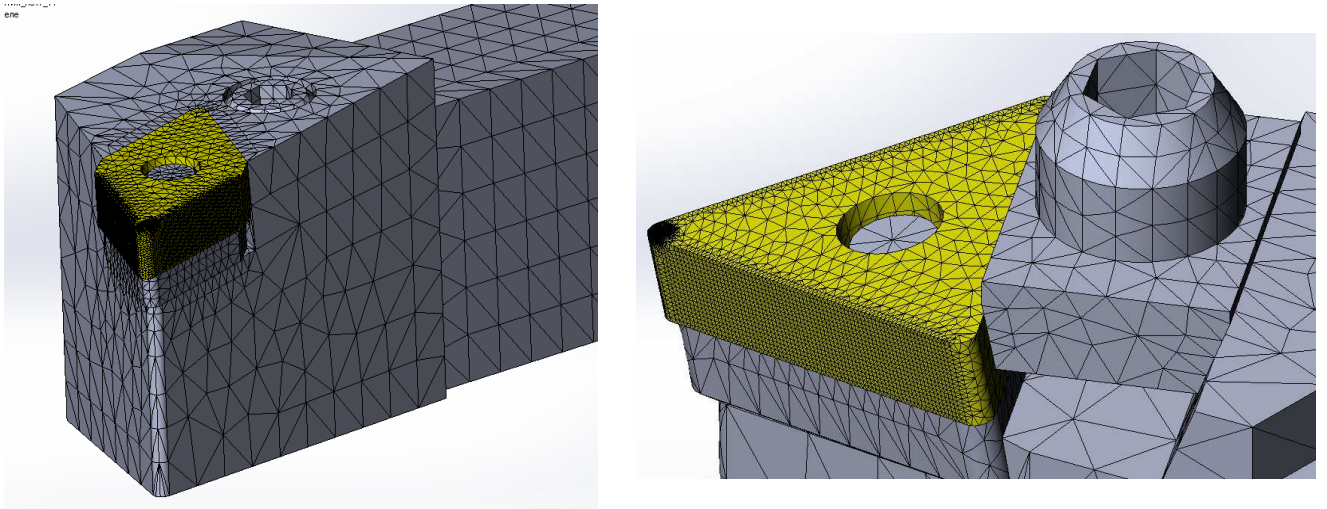


Рисунок 4.9. Конечно-элементная модель резцов с покрытием:

а) – с режущей пластиной ромбической формы; б) – с режущей пластиной трехгранной формы

По результатам расчетов получены картины распределения температуры по поверхности резца, которые отображают особенности нагружения передней и задней поверхностей в целом и функциональных зон этих поверхностей. (рисунок 4.10). Аналогично определены величины плотности тепловых потоков и распределения температур для инструмента с покрытиями карбида титана TiC; нитрида титана TiN (рисунок 4.11, 4.12)

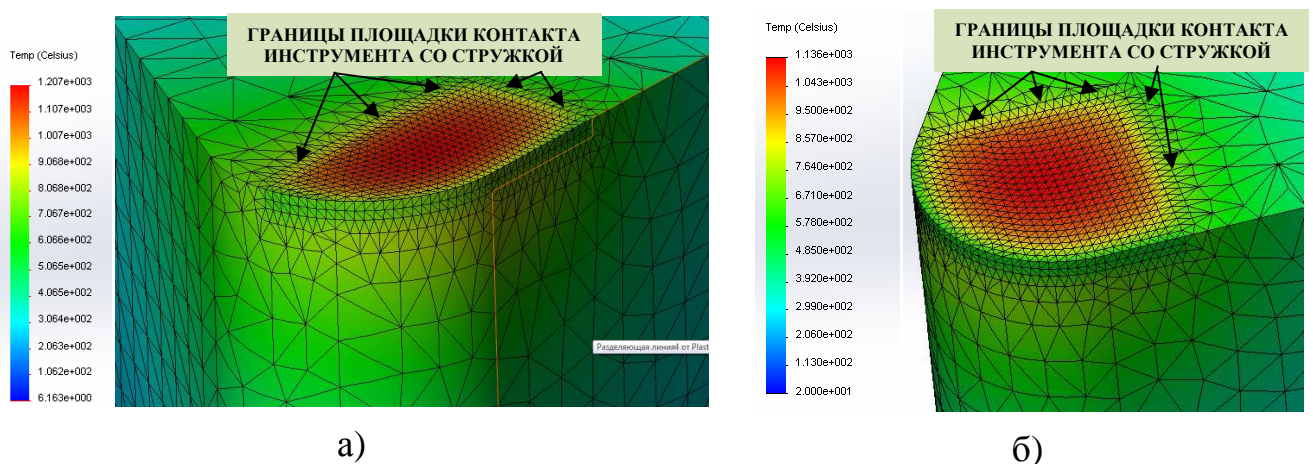


Рисунок 4.10. Распределение температур по поверхностям резца без покрытия:

а) – с режущей пластиной ромбической формы; б) – с режущей пластиной трехгранной формы

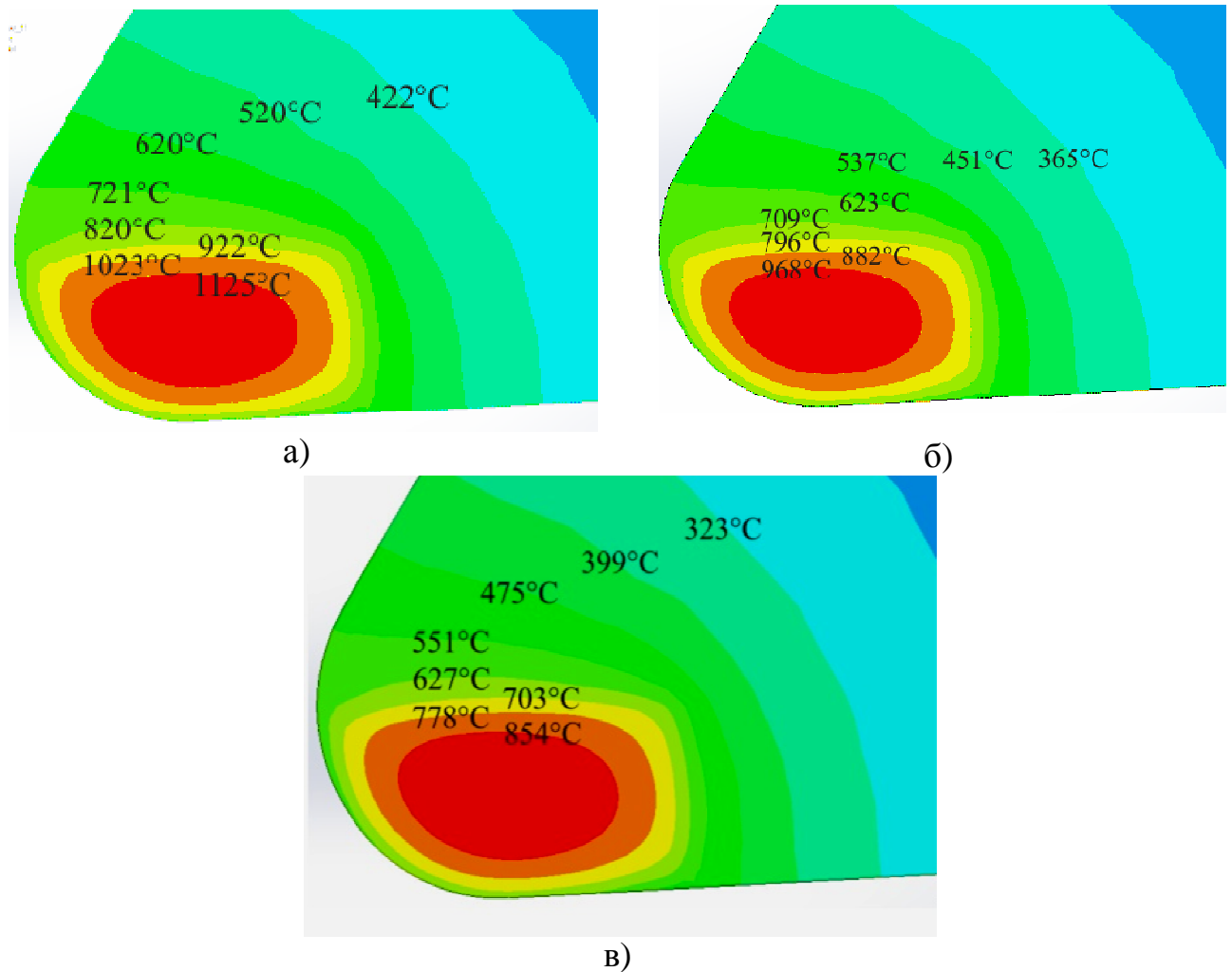


Рисунок 4.11. Распределение температур по передней поверхности твердосплавной пластины ромбической формы: а) – без покрытия; б) – с покрытием карбида титана TiC; в) – с покрытием нитрида титана - TiN

Полученные картины распределения температуры по поверхностям режущей части инструмента без покрытия, показывают, что максимальное значение температуры на площадке контакта стружки с передней поверхностью превышает 1000°C, далее при удалении от зоны резания температура снижается.

В данном случае температура резания превышает предельно допустимую для заданных условий обработки. Кроме того, представленная модель термомеханических нагрузений позволяет выделить функциональные зоны превышения предельно допустимой температуры с целью обеспечения требуемых эксплуатационных свойств режущего инструмента.



для покрытий карбида титана TiC до 14%; нитрида титана TiN до 24% по сравнению с инструментом без покрытий.

Ранее установлено, что при обработке фасонной поверхности наблюдается непрерывное изменение тепловых потоков и температуры резания в зоне обработки вдоль образующей. Выявлены зоны превышения предельно допустимой температуры для заданных условий обработки. Для уменьшения термомеханической напряженности в этих зонах, на основании вышеуказанных принципов функционально-ориентированного подхода, предложено нанесение износостойких покрытий особой структуры. При этом на передней поверхности твердосплавной пластины с износостойким покрытием из карбида титана TiC зонально (область при вершине) целесообразно нанесение дополнительного слоя покрытия из нитрида титана TiN. Модель такого инструмента представлена на рисунке 4.13.

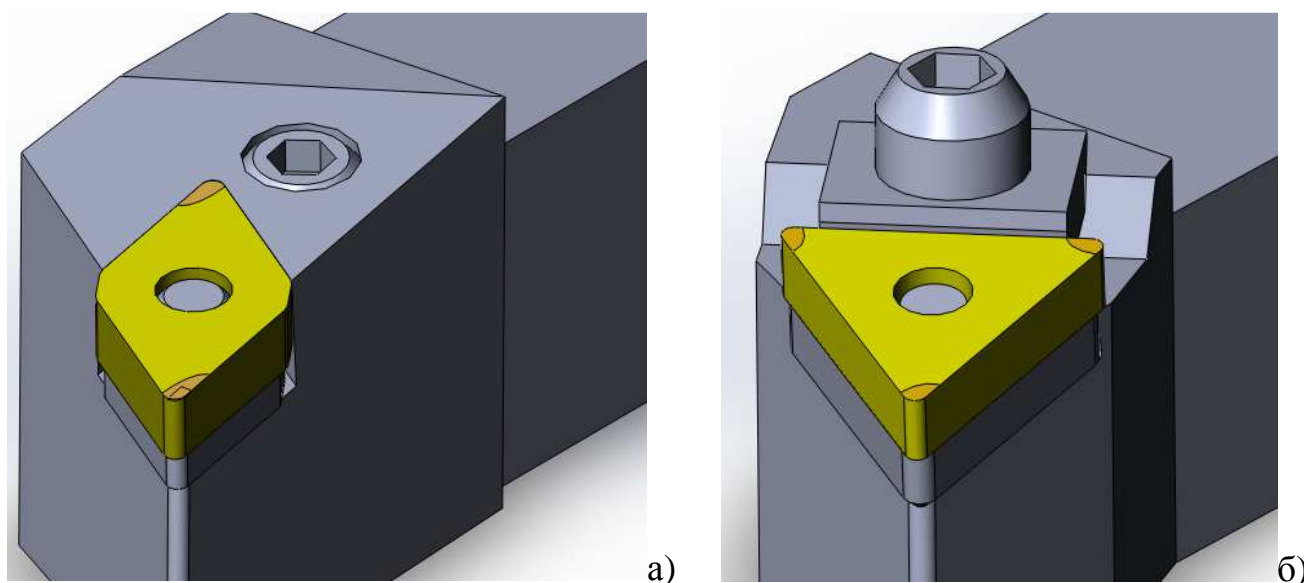


Рисунок 4.13. Модели резцов с функционально-ориентированными свойствами: а) – с режущей пластиной ромбической формы; б) – с режущей пластиной трехгранной формы

Так, на основании принципов функционально-ориентированного подхода: структурного, функционального, топологического, количественного, адекватного структурно-функционального соответствия рационально нанесение износостойких покрытий зонально, чтобы исключить возможность возникновения на-



грузений, превышающих допустимые.

Покрытие карбида и нитрида титана являются базовыми при производстве твердых сплавов с износостойкими покрытиями, поскольку они зачастую входят в состав многослойных покрытий, и, как правило, представляют собой слой, непосредственно примыкающей к твердосплавной основе, и играют важную роль в повышении стойкостных характеристик инструмента. В процессе осаждения покрытий карбида титана формируется переходный слой покрытия - основа, а также происходят основные изменения в структуре и свойствах поверхностной области твердых сплавов.

Одним из путей повышения общей толщины покрытия является его многослойность (последовательно расположенные слои TiC, TiCN переменного состава и TiN) при сохранении относительно мелкозернистой структуры, а за счет этого и достижения большего эффекта повышения стойкости инструмента. За счет осаждения карбонитридов, а затем нитрида титана, удается в значительной степени подавить формирование крупнозернистой структуры покрытия. Кроме того, TiCN и TiN обладает пониженной адгезионной способностью по отношению к обрабатываемым материалам.

Для инструмента с покрытием такой структуры выполнен расчет тепловых потоков и температур в зоне резания. Анализ теплового состояния режущей части инструмента с функционально-ориентированными свойствами показал снижение температуры на передней поверхности до 27% по сравнению с инструментом без покрытий (рисунок 4.14.). Дополнительное снижение температуры на передней поверхности по сравнению с монопочкрытиями обусловлено его многослойностью, следовательно и суммарным увеличением толщины (подраздел 3.2.2). Температура максимально нагруженной зоны в пределах 810 °С; это позволяет утверждать, что температура резания для заданных условий обработки не превышает допустимого значения.

Для инструментов с покрытиями карбида титана TiC и нитрида титана TiN выполнена оценка соответствия результатов расчетов, полученных на основе МКЭ с экспериментальным данным. С этой целью для моделей термомеханиче

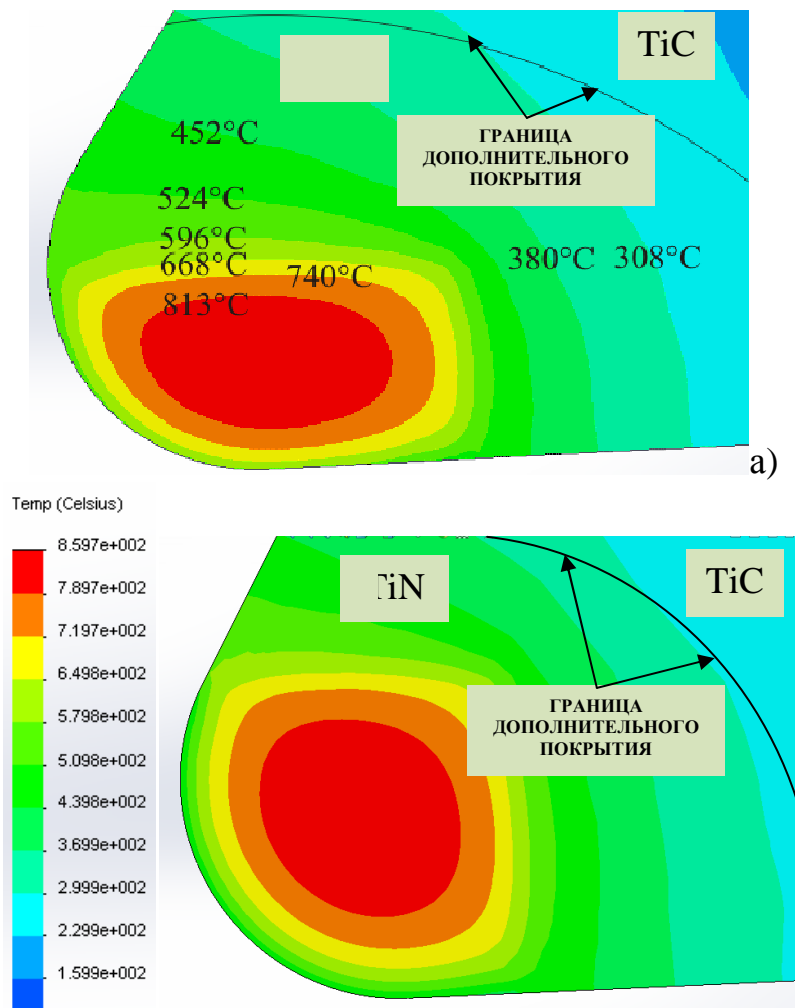


Рисунок 4.14. Распределение температур по передней поверхности инструмента с функционально-ориентированными свойствами:

- а) – с режущей пластиной ромбической формы;  
 б) – с режущей пластиной трехгранной формы

ских нагружений резцов, полученных по МКЭ определены значения температуры вблизи площадки контакта инструмента со стружкой (за ее пределами). Для заданных условий обработки расхождение значений температуры в пределах 7-12%, что позволяет считать результаты расчета температур для резца с функционально-ориентированными свойствами достоверными, а также использовать представленную методику с целью оценки и прогнозирования теплового состояния инструмента для различных видов и вариантов структуры износостойких покрытий.

#### 4.4. Выводы

1. Разработанная на основе функционально-ориентированного подхода методика расчета температур в зоне резания с использованием МКЭ позволяет оценить тепловое состояние твердосплавного инструмента с различными видами и вариантами структуры износостойких покрытий при обработке без проведения специальных экспериментов.

2. На основании представленной методики выполнен анализ теплового состояния твердосплавных инструментов с различными покрытиями. Установлено снижение температуры на передней поверхности твердосплавной пластины за счет применения инструментов с покрытиями: карбида титана TiC до 14%; нитрида титана TiN до 24%; с функционально-ориентированными свойствами до 27%.

3. Оценка соответствия результатов исследования на основе МКЭ экспериментальным данным для инструментов с покрытиями карбида титана TiC и нитрида титана TiN показала расхождение значений температуры на передней поверхности инструмента в пределах 7-12%, что дает основание применять представленную методику с целью оценки и прогнозирования теплового состояния инструмента для различных видов и вариантов структуры износостойких покрытий.

3. Выбор материала и структуры покрытий на базе функционально-ориентированного подхода позволяет управлять процессом обработки с учетом его переменности вдоль криволинейной образующей фасонной поверхности, обеспечив максимальную производительность за счет снятия температурных ограничений. При этом в зависимости от заданных условий обработки фасонной поверхности на различных участках режущей части твердосплавного инструмента могут быть нанесены либо многослойные покрытия, либо разнородные покрытия с определенными свойствами.



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. ОСНОВНЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ РАБОТЫ

### 5.1. Основные методические положения экспериментальных исследований

Общей методикой экспериментальных исследований предусматривалось комплексное проведение стойкостных экспериментов, при этом исследовалось влияние режимов резания - скорости, глубины и подачи по схеме классических экспериментов и взаимного влияния режимов резания – по схеме полного факторного эксперимента. В ходе стойкостных экспериментов осуществлялся контроль шероховатости, производившийся на 2-3 участках поверхности заготовки обработанной между двумя фиксациями износа пластины. Выборочно исследовалось влияние затупления твердосплавных пластин на изменение составляющих силы резания.

#### 5.1.1. Обрабатывающий инструмент и обрабатываемый материал

На основании аналитического обзора литературных источников и практики применения твердых сплавов с износостойкими покрытиями в качестве базовых

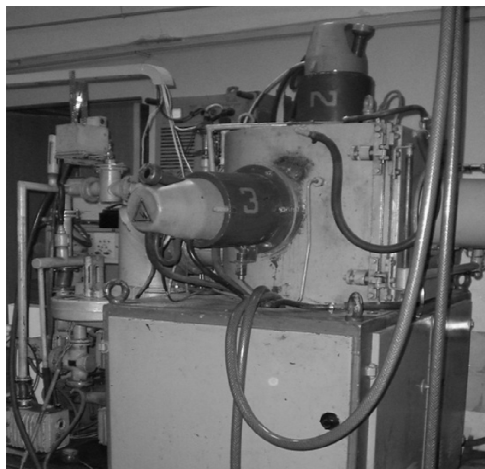


Рисунок 5.1. Общий вид установки для нанесения покрытий ННВ 6.6-И1

марок твердых сплавов для экспериментальных исследований выбран ряд традиционных твердых сплавов групп ТК. Карбидтитановые покрытия на твердые сплавы нанесены методом осаждения покрытий из газовой среды (КВТК – «карбидизация – вакуумтитанирование - вторичная карбидизация). Покрытия на основе нитрида титана на исследованные сплавы наносились методом КИБ (конденсация в условиях ионной бомбардировки). Нанесение покрытий произведено на установке ННВ 6.6-И1 (рисунок 5.1).

Основные свойства покрытий на основе карбида титана и нитрида титана, приведены в таблице 5.1.

В качестве основной формы пластин, применявшихся в ходе экспериментов использовались пластины режущие сменные многогранные, твердосплавные пластин ромбической и трехгранной формы по ГОСТ 24256-80 и ГОСТ 19046-80.

Таблица 5.1. Износостойкие покрытия

Свойства	TiC	TiN
Кристаллическая структура	Кубическая гране-центрированная	кубическая
Период решетки, Å	4,33	4,24
Плотность, $10^3$ кг/м <sup>3</sup>	4,3-4,9	5,2-5,4
Модуль упругости E, $10^5$ МПа (290К)	4,6	2,5
Микротвердость, $10^4$ МПа (290К)	3,2	1,9-2,4
Предел прочности, $10^2$ МПа, при - сжатии (290К) - изгибе(290К)	13,8 6,2	9,7 1,7
Теплопроводность, $10^2$ Вт/(м·К)	0,06 (1080К)	0,014 (911К)
Коэффициент линейного термического расширения, $10^{-6}$ К <sup>-1</sup>	7,7	9,4
Устойчивость к воздуху - оксидировка	699К	823К

Точение производилось резцами токарными сборными, проходными с механическим креплением многогранных твердосплавных пластин по ГОСТ 20872-80, а также резцами конструкции ВНИИ-инструмент, обеспечивавшими следующие геометрические параметры резца:

- главный угол в плане  $\varphi=91^\circ54'$ ;
- вспомогательный угол в плане  $\varphi_1 = 7^\circ43'$ ;
- главный задний угол  $\alpha= 5^\circ11'$ ;
- вспомогательный задний  $\alpha_1= 5^\circ11'$ ;

- главный и вспомогательный передние углы  $\gamma = \gamma_I = 14^\circ 52'$ ;
- главный и вспомогательный передние углы, образованные фаской  $\gamma_\phi = \gamma_{\phi I} = 5^\circ 14'$ ;
- главный и вспомогательный углы наклона режущей кромки  $\lambda = \lambda_I = 6^\circ 07'$ .

Выбор формы пластины, геометрических параметров и конструкция резца вызваны, в частности, их широким распространением в машиностроении.

Державки, использовавшиеся для проведения экспериментов повышенной точности, автоматного исполнения; со шлифованными опорными поверхностями державки и гнезда пластины. Наличие точных базовых поверхностей у державки позволило обеспечить постоянство геометрических параметров резца путем настройки на специальном оптико-механическом приборе и закреплении в гнезде револьверной головки станка, также имеющей точные шлифованные базовые поверхности.

В качестве обрабатываемого материала выбрана сталь 45 в состоянии поставки. Выбор обусловлен широким распространением этой марки как конструкционного материала и, соответственно, применением ее в качестве базовой для определения режущих свойств инструментальных материалов. Значения показателей механических свойств приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2. Показатели механических свойств стали 45

Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>
675	320	16	490

В качестве заготовок использован прокат диаметром 230 мм, длиной 800 - 1000 мм; заготовки зацентрованные, имеющие проточенный пояс под зажим в трехкулачковом самоцентрирующем патроне.

Перед проведением эксперимента наружный слой заготовки удалялся на глубину до 18 мм. С целью уменьшения влияния неоднородности механических свойств образца на результаты стойкостных испытаний точение прекращалось при достижении диаметра 100-105 мм.

### 5.1.2. Методика стойкостных исследований

Одним из основных факторов, определяющих стойкостную характеристику инструмента является износостойкость инструментального материала.

Изучение износа твердосплавных резцов с износостойкими покрытиями производилось для всех сочетаний твёрдый сплав – покрытие, предусмотренных общей методикой работы, на стадиях предварительных и основных экспериментов. При этом исследовалось влияние режимов резания - скорости, глубины и подачи по схеме классических экспериментов и взаимного влияния режимов резания – по схеме полного факторного эксперимента.

У всех пластин, применявшихся в экспериментах, без снятия резца со станка методами оптической микроскопии несколько (6-8) раз фиксировались путём прямого измерения или фотографирования размеры изношенных поверхностей во всех четырех зонах развертки задних поверхностей, размеры лунки (за исключением глубины). Глубина лунки определялась путем записи профиля передней поверхности пластин на модернизированном профилографе-профилометре мод. 201. Динамика развития глубины лунки изучалась выборочно при условии обязательного повторения экспериментов, так как сопряжена с необходимостью нескольких снятий пластины с резца. Часть стойкостных экспериментов сопровождалась измерением изменения координат вершины резца относительно его базовых поверхностей по мере изнашивания, для чего использовался специальный оптико-механический прибор, обеспечивающий высокую точность измерений.

Выборочно производились исследования контактных поверхностей пластин на электронном сканирующем микроскопе «Стереоскан S-180» с системой "Линк". Микроскоп позволил изучать неизношенные участки покрытий и изношенные поверхности пластин с увеличением до  $\times 1000$  без приготовления специальных микрошлифов.

Основная часть экспериментов, связанных с точением стальных образцов проведена на экспериментальной установке, схематично показанной на рисунке 5.2.

Установка создана на базе модернизированного токарно-револьверного станка с числовым программным управлением Heinemann DN-300. Станок 1, имеющий автоматическую коробку скоростей 2 с электромагнитными муфтами, гидропривода продольной и поперечной подачи 3, главный электродвигатель 4, блок числового программного управления 5, электрошкаф и блок агрегатов 6, обладает следующими основными характеристиками:

- штатный режим работы - полуавтоматический, от программы;
- частота вращения шпинделя -  $0,13-36,6 \text{ с}^{-1}$  (ступенчатая);
- регулирование продольных подач -  $0-0,02 \text{ м/с}$  (бесступенчатое);
- мощность главного электродвигателя - 22 кВт;
- диаметр заготовки при продольном точении (наибольший) - 0,35 м;
- максимальная длина заготовки при продольном точении - 1,25 м.

Станок отвечает предъявляемым требованиям по жесткости и точности.

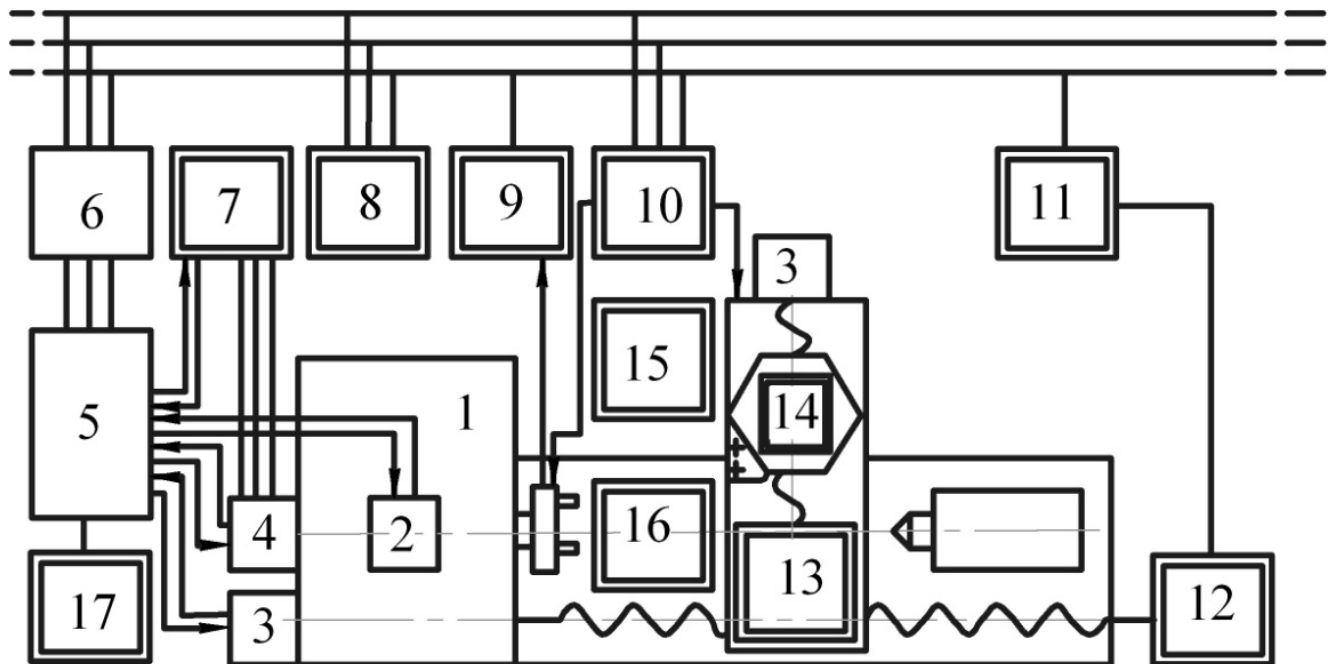


Рисунок 5.2. Принципиальная схема экспериментальной установки

Для обеспечения плавного бесступенчатого регулирования частоты вращения шпинделя установка укомплектована тиристорным преобразователем частоты 8 ЭКТ 63/380, обеспечивающим регулирование частоты тока в пределах 0-200 Гц.

Частота вращения шпинделя обеспечивалась комбинированным способом: за счет коробки скоростей и преобразователя частоты, чем исключалась непредусмотренная перегрузка коробки скоростей. Благодаря установке переключателя 7 сохранена возможность использования станка в штатном режиме. Управление станком в неавтоматическом режиме осуществлялось за счет специально изготовленного выносного пульта ручного управления 17. Индикация частоты вращения шпинделя осуществлялось показывающим прибором 9.

Пневмопривод зажима детали и балансировки суппорта обеспечивался пневмокомпрессором 10. Индикация минутной подачи суппорта осуществлялась за счет механо-электрического преобразователя и показывающего прибора 11 (ТЦ-5).

Индикация настройки глубины резания осуществлялась при помощи устройства 15, служившего также для предохранения станка от поломки при ошибке оператора при вертикальных перемещения суппорта. Модернизация станка обеспечила возможность установки ряда дополнительных приборов и устройств: универсального динамометра (УДМ-600) 13, микроскопа для изучения нескольких поверхностей резца без снятия со станка 14. Узлы, оснастка и устройства, дополнительно введенные при модернизации, на схеме обозначены двойными рамками.

Общей методикой экспериментальных исследований предусматривалось комплексное проведение стойкостных экспериментов и экспериментов по выявлению особенностей влияния износостойких покрытий на износ рабочих поверхностей твердосплавных пластин. Таким образом, были приняты условия проведения экспериментов: "износ - период резания - стойкость - скорость резания".

При проведении экспериментов реализована схема наружного продольного безударного несвободного течения. Предварительно подготовленная заготовка из стали 45 обтачивалась на экспериментальной установке (рисунок 5.2). Течение производилось резцами токарными сборными проходными с механическим креплением многогранных твердосплавных пластин (п. 5.1.1). Фиксация размеров изношенных поверхностей твердосплавных пластин осуществлялась не менее 6-8 раз за время работы одной вершины пластины. Течение каждой вершиной твер-

досплавной пластины, использовавшейся в стойкостных экспериментах прекращалось в случае: скола вершины; крупных выкрашиваний вспомогательной задней поверхностей пластины, сопровождающихся изменением макрорельефа обработанной поверхности; резкого ухудшения шероховатости обработанной поверхности, сопровождающегося интенсивным искрением в зоне стружкообразования и возрастанием мощности резания; совместного проявления вышеперечисленных признаков.

В ходе всех стойкостных экспериментов осуществлялся контроль шероховатости обработанной поверхности, производившийся на 2-3 участках обработанной между двумя фиксациями износа пластины поверхности заготовки.

Выбор сочетаний режимов резания для проведения стойкостных испытаний проводился с учетом необходимости уточнения предполагаемой математической модели зависимости стойкости от скорости ( $V$ ) подачи ( $S$ ) и глубины резания ( $t$ ) и последующей аппроксимации экспериментальных данных в соответствии с выбранной моделью [68, 69, 79, 136]. Все стойкостные испытания проведем без применения смазочно-охлаждающих технологических сред.

На предварительном этапе стойкостных испытаний для сплава T15K6+TiC проведены опыты по схеме однофакторного классического эксперимента. Сочетания режимов резания, при которых проведены опыты, соответствуют заполненным разделам таблиц 5.3. и 5.4.

Таблица 5.3. Сочетания режимов резания (глубины и подачи)

Глубина, мм	Подача, мм/об				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,5		+		+	
1	+	+	+	+	
2		+		+	+
3	+	+	+	+	
4		+		+	+

Скорость резания,  $V=3\text{м/с}$ .

Таблица 5.4. Сочетания режимов резания (скорость, подача, глубина)

Скорость, м/с					Подача x Глубина
2,00	2,45	3,00	3,54	4,20	
	+	+	+	+	0,2 x 1
+	+	+	+	+	0,4 x 3

Для всех сплавов проведены эксперименты по схеме полного факторного эксперимента  $2^3$  с варьируемыми параметрами: скорость, подача, глубина резания [3, 22, 26, 45, 59, 68]. Для статистической оценки полученных результатов в нейтральных точках планов проведены по четыре опыта с повторением. Дополнительно проведены опыты для уточнения области определения полученных стойкостных зависимостей.

### 5.1.3. Методика исследования влияния износостойких покрытий на силу резания и температуру в зоне стружкообразования

Методика предусматривает определение влияния сочетаний твердый сплав - покрытие на силу резания. Сила резания, являющаяся одним из основных показателей механики процесса резания, определяется сложными процессами на контактных поверхностях резца, оказывает наряду с другими факторами непосредственное влияние на износ этих поверхностей, тепловые процессы резания. Сила резания в проведенных экспериментах определялась, как векторная сумма трех составляющих:

$$\bar{P} = \bar{P}_x + \bar{P}_y + \bar{P}_z,$$

где  $\bar{P}_x$ ,  $\bar{P}_y$ ,  $\bar{P}_z$  - составляющие силы резания, действующие вдоль принятых в теории резания осей.

Для определения величин составляющих силы резания использовался универсальный динамометр УДМ-600 конструкции ВНИИ-инструмент, установленный на экспериментальной установке (рисунок 5.2). Тарирование осуществлялось



в соответствии с предусмотренной паспортом динамометра методикой, эксперименты производились при реализации схемы продольного течения заготовки из стали 45.

Основные опыты проведены таким образом, что фаска износа по задним поверхностям не превышала  $0,15 \times 10^{-3}$  м, лунка износа на передней поверхности не успевала образовываться. Значения составляющих силы резания определялись как усредненные для трех пластин соответственно одинакового материала.

Варьируемыми параметрами в сериях экспериментов с пластинами каждой марки твердого сплава и покрытия являлись глубина резания (0,5-4 мм) и подача (0,15-0,6 мм/об). Предварительно проведенные эксперименты показали, что влияние скорости резания при изменении ее в диапазоне 2-4,2 м/с несущественно и не превышает погрешности отдельных опытов. Эксперименты по определению влияния режимов на величину оставляющих силы резания проведены при скорости резания 2,5 м/с.

Для определения влияния глубины резания заготовка предварительно протачивалась таким образом, чтобы на ее поверхности образовывались участки с диаметрами, отличающимися на определенную величину. Затем производилось течение резцом, установленным в динамометре, причем резец перемещался относительно детали с постоянной подачей на протяжении протачивания всех заранее подготовленных участков.

Влияние подачи определялось путем протачивания бесступенчатого участка заготовки с фиксированной глубиной резания. Резание осуществлялось непрерывно, подача плавно увеличивалась до каждого заранее намеченного значения и фиксировалась на 8-10 с для обеспечения установившихся режимов резания. Синхронно производилась запись сигналов составляющих силы резания и подачи. При расшифровке осциллограмм измерялись отклонения соответствующих сигналов относительно настроенных  $O(P_x)$ ,  $O(P_y)$ ,  $O(S)$   $O(P_x)$  с установившимися силами резания.

Дополнительно проведены эксперименты по схеме  $2^2$  полного факторного эксперимента для выявления совместного влияния глубины резания и подачи при тчении незатупленными пластинами.

В соответствии с задачами исследования проведены эксперименты по определению влияния износостойких покрытий на температуру в зоне стружкообразования.

Произведено измерение температуры на передней поверхности резца в месте прекращения контакта стружки и твердосплавной пластины при точении стали с несколькими сочетаниями фиксированных режимов резания. При проведении экспериментов сохранена схема точения, конструкция и геометрические параметры резца, использовавшиеся при стойкостных экспериментах.



Рисунок 5.3. Общий вид инфракрасного термометра Fluke 570

Температура при точении определялась бесконтактным способом с помощью инфракрасного термометра (пирометра) Fluke 570 (рисунок. 5.3) с диапазоном измеряемых температур от  $-30$  до  $900^{\circ}\text{C}$  и системой лазерного целеуказания для точного наведения, при этом погрешность измерения составляет  $\pm 0,75\%$  от показания. Прибор, предназначенный для измерения температуры по инфракрасному (ИК) излучению в спектральном диапазоне 8-14 мкм, устанавливался на станке со стороны задней бабки и фокусировался на зоне резания.

## 5.2. Исследование влияния износостойких покрытий на стойкость инструмента

В соответствии с целью и задачами экспериментальных исследований влияние износостойких покрытий на стойкость режущего инструмента изучалось в комплексе и на основании результатов предусмотренных общей методикой работы. Для проведения основных стойкостных экспериментов выбрана схема полного факторного эксперимента. Исследовался сплав T15K6 с карбидо- и нитридотитановым покрытием, а также сплав T15K6 без покрытия. Для определения стойкостных зависимостей исследуемых твердых сплавов в соответствии с методикой

проведены эксперименты с использованием статистического метода планирования [2, 3, 26].

В качестве математической модели, описывающей зависимость стойкости от режимов обработки, была принята степенная зависимость:

$$T = \frac{C}{V^n t^x S^y} = \left( \frac{C^v}{V t^x S^y} \right)^{1/m} \quad (5.1)$$

где  $C = C_v^{1/m}$  - коэффициент постоянный для данного сплава с покрытием;  $V$ ,  $t$ ,  $S$  - скорость, м/с; глубина, мм; подача, мм/об, соответственно;  $1/m = n$ ,  $x/m = p$ ,  $y/m = q$  - показатели степеней при варьируемом параметре.

Уравнение регрессии имеет вид:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (5.2)$$

где  $y$  - логарифм значения стойкости;  $b_i$  - коэффициенты, определяющие показатели степени в зависимости (5.1);  $b_0$  - коэффициент, определяющий коэффициенты  $C$ ,  $C_v$  в уравнении (5.1);  $x_i$  - безразмерные варьируемые параметры, представляющие собой значения  $V$ ,  $S$ ,  $t$  в кодированном виде.

Для экспериментального получения уравнения регрессии использовался полный факторный эксперимент с планом  $2^k$ , где  $k$  - число варьируемых параметров (факторов). Для каждой переменной было выбрано три уровня: верхний, средний и нижний, закодированные таким образом, что верхнему уровню соответствовало значение  $+1$ , среднему  $0$ , нижнему  $-1$ . Число опытов в эксперименте  $2^k = 2^3$ . Для оценки точности эксперимента были поставлены 4 опыта в дополнительной центральной точке.

Коэффициенты уравнения регрессии (5.2) определялись в соответствии с алгоритмом Йетса [26]. Получены стойкостные зависимости, представленные в кодированном виде:

$$\text{T15K6:} \quad \tilde{y} = 1,86 - 0,75x_1 - 0,96x_2 - 0,45x_3; \quad (5.3)$$

$$\text{T15K6+TiC:} \quad \tilde{y} = 2,60 - 0,68x_1 - 0,83x_2 - 0,65x_3 - 0,4x_2x_3; \quad (5.4)$$

$$\text{T15K6+TiN:} \quad \tilde{y} = 3,31 - 0,16x_1 - 0,04x_2 - 0,29x_3 + 0,07x_1x_2; \quad (5.5)$$

Для расчета значений стойкости в зависимости от режимов резания, выраженных в реальных значениях, подсчитаны коэффициенты и показатели степени, приведенные в таблице 5.5.

Таблица 5.5. Исходные данные для расчета стойкости  $T$  (мин)

Обозначение сплава											
Т15К6				Т15К6+TiC				Т15К6+TiN			
Коэффициенты и показатели степеней											
С	п	q	р	С	п	q	р	С	п	q	р
98,6	4,58	2,77	0,819	1010	4,15	1,24+2,1Л*	3,83	15,2	-0,6-1,24М*	1,68	0,53
* Обозначено: Л= $\ln t$ ; М= $\ln S$											

Обработка результатов стойкостных экспериментов выполнена для сплава Т15К6+TiN. В таблице 5.6 представлена матрица планирования основных экспериментов, приведены значения фактической ( $T$ ) и расчетной ( $\tilde{T}$ ) стойкости. Опыты 9-12 проведены в центральной точке плана при нулевых уровнях варьируемых факторов  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$  [3, 26, 45].

Таблица 5.6. Матрица планирования экспериментов

Номер опыта	Матрица планирования				Стойкость $T$ (мин) при точении			
	Кодовые обозначения				Фактическое значение		Расчетное значение	
	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$T$	$y = \ln T$	$\tilde{T}$	$\tilde{y} = \ln \tilde{T}$
1	+1	-1	-1	-1	42,0	3,74	43,6	3,78
2	+1	+1	-1	-1	17,2	2,84	16,9	2,83
3	+1	-1	+1	-1	23,8	3,17	24,2	3,19
4	+1	+1	+1	-1	9,8	2,28	99,4	2,24
5	+1	-1	-1	+1	23,0	3,14	22,2	3,10
6	+1	+1	-1	+1	8,5	2,14	8,6	2,15
7	+1	-1	+1	+1	12,6	2,53	12,4	2,52
8	+1	+1	+1	+1	4,6	1,53	4,8	1,57
9	+1	0	0	0	15,1	2,71	14,4	2,67
10	+1	0	0	0	14,2	2,65	14,4	2,67
11	+1	0	0	0	14,8	2,69	14,4	2,67
12	+1	0	0	0	14,9	2,70	14,4	2,67

После определения в соответствии с алгоритмом Йетса коэффициентов, уравнение регрессии стойкостной зависимости в кодированном виде имеет вид:

$$\tilde{y} = 2,67 - 0,47x_1 - 0,29x_2 - 0,34x_3 - 0,026x_1x_3 - 0,01x_2x_3.$$

Дисперсия эксперимента с нулевой точкой:

$$S_{y_0}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}{n - 1} = 11 \cdot 10^{-4},$$

где:

$$\bar{y} = \frac{2,71 + 2,65 + 2,69 + 2,7}{4} = 2,69,$$

$\bar{y}$  - среднее значение по результатам  $n = 4$  экспериментов в нулевой точке.

Для проверки значимости коэффициентов уравнения регрессии с помощью  $t$ -критерия Стьюдента вычислена дисперсия коэффициента регрессии:

$$S_{b_j}^2 = \frac{S_{y_0}^2}{N} = 1,38 \cdot 10^{-4},$$

где  $N=8$  - число опытов, результаты которых использовались для определения коэффициентов регрессии.

Так как дисперсии всех коэффициентов равны, то одинаков и их доверительный интервал:

$$\Delta b_j = \pm t S_{b_j},$$

где  $t = 3,182$  - табличное значение критерия при уровне значимости 5% и числом степеней свободы равным 3, с которым определялась дисперсия

$$S_{b_j} = + \sqrt{S_{b_j}^2} = 1,17 \cdot 10^{-2},$$

$$\Delta b_j = \pm 0,032.$$

Таким образом, первые четыре коэффициента регрессии являются значимыми и уравнение регрессии должно иметь вид:

$$\tilde{y} = 2,67 - 0,47x_1 - 0,29x_2 - 0,34x_3.$$

Относительная погрешность определения стойкости (мин):

$$\delta T = \frac{\Delta T}{\bar{T}} 100\% = \pm 7\%.$$

Проверка адекватности уравнения регрессии осуществлялась по  $F$ -критерию Фишера:  $F_{\text{э}} = S_{\text{ад}}^2 / S_{y_0}^2$ ,

$S_{ад}^2$  - остаточная дисперсия (дисперсия адекватности),

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta y_i^2}{f},$$

где  $f = N - (k + 1) = 8 - (3 + 1)$  - число степеней свободы,  $k = 3$  - число варьируемых параметров.

$$S_{ад}^2 = 17,8 \cdot 10^{-4},$$

$$F_{э} = \frac{17,8 \cdot 10^{-4}}{11 \cdot 10^{-4}} = 1,61.$$

Табличное значение критерия при 5% уровне значимости и соответствующих степенях свободы

$$F_T = 6,60.$$

$F_{э} < F_T$ , таким образом, модель адекватна.

В результате статистического анализа экспериментальных данных по определению стойкости оценена точность полученных уравнений регрессии и адекватность постулируемой математической модели [150]. На основании полученных результатов можно заключить, что при доверительной вероятности 0,95 относительная погрешность расчета величины  $\tilde{T}$  не превышает 15%.

Экспериментальные значения  $y_i = \ln T$  перекрываются границами доверительного интервала расчетного параметра  $\tilde{y}$ . Проверка адекватности полученных математических моделей исследуемых зависимостей стойкости по  $F$  - критерию Фишера показала их адекватность. Все это позволяет считать, что зависимость стойкости от режимов течения при обработке исследуемыми твердыми сплавами с достаточной точностью может быть описана формулой 5.1 и данными табл.5.5.

Анализ полученных зависимостей 5.3 – 5.5 показывает, что на стойкость существенно влияет конкретное сочетание базового твердого сплава и покрытия. При этом, так же как и в случаях работы твердых сплавов без покрытия стойкость уменьшается с возрастанием значений режимов резания. Это прямо указывает на то, что износостойкие покрытия не изменяют характер влияния режимов рения на стойкость, но существенно влияют на эти закономерности. При сопоставлении зависимостей 5.3 – 5.5 соответствующих стойкости инструментов из сплавов Т15К6

без покрытия, с покрытием карбида титана и с покрытием нитрида титана заметно повышение стойкости при одновременном уменьшении влияния скорости и подачи, особенно значительно для сплава T15K6+TiN. Одновременное повышение скорости резания и подачи (толщины среза) приводят к возрастанию тепловыделения и температуры в зоне стружкообразования. Сопоставление теплопроводности базового сплава и покрытия показывает, что покрытие нитрида титана, обладающее меньшей теплопроводностью, обеспечивает меньший теплоотвод в режущий клин инструмента и благоприятные условия в зоне стружкообразования.

Стойкость инструмента из сплава T15K6 с покрытием нитридом титана менее чувствительна к влиянию глубины резания, чем из базового сплава, а для сплава T15K6 с покрытием карбидом титана влияние глубины резания (ширины среза) наиболее существенно, что связано в основном с повышенной хрупкостью.

Увеличение сечения среза (глубины резания и подачи) повышают площадь контакта стружки с передней поверхностью, придающие напряжения в режущем клине, что при повышенной хрупкости сплава T15K6 с покрытием карбидом титана снижает стойкость инструмента.

Влияние износостойкого покрытия на стойкость или сопоставление стойкостей инструментов из различных сплавов удобно осуществлять, пользуясь коэффициентом стойкости:

$$K_{ст} = \frac{T_2}{T_1} = C_K V^{(n_1-n_2)} t^{(p_1-p_2)} S^{(q_1-q_2)}, \quad (5.6)$$

где  $T_1$  – стойкость инструмента из базового сплава или сплава, по отношению к которому производится сравнение стойкостей;  $T_2$  – то же для сплава с покрытием или сплава, эффективность применения которого оценивается;  $C_K = C_2/C_1$  отношение коэффициентов стойкости инструментов из сопоставляемых сплавов.

Коэффициент стойкости может быть представлен произведением двух коэффициентов:

$$K_{ст} = K_{ст1} K_{ст2}, \quad (5.9)$$

где  $K_{ст1}$  – коэффициент стойкости, учитывающий влияние глубины резания и подачи при фиксированном значении скорости;  $K_{ст2}$  – коэффициент стойкости, учи-

тывающий влияние скорости резания при фиксированных значениях глубины резания и подачи.

Сопоставление допускаемых скоростей резания, обеспечивающих одинаковую стойкость инструмента из двух сравниваемых сплавов при соответственно одинаковых глубине резания и подаче, удобно осуществлять, пользуясь коэффициентом скорости:

$$K_{\text{СК}} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{C_{V2}}{C_{V1}} V^{(m_1 - m_2)} t^{(x_1 - x_2)} S^{(y_1 - q_2)}, \quad (5.10)$$

Таким образом, если коэффициент стойкости или коэффициент скорости оказывается больше единицы, то стойкость или допускаемая скорость течения оцениваемого (обозначенного индексом 2) сплава при соответственно одинаковых условиях обработки выше, чем у сплава, сравнение с которым осуществляется.

Анализ влияния износостойких покрытий на стойкость твердосплавных резцов наглядно иллюстрируют рис. 5.4, на которых показано влияние глубины резания и подачи, и рис. 5.5 – влияние скорости резания на коэффициент стойкости. Над рисунками указаны: наименование сопоставляемых сплавов, причем инструмент из сплава, стойкость которого принята за единицу указан в знаменателе.

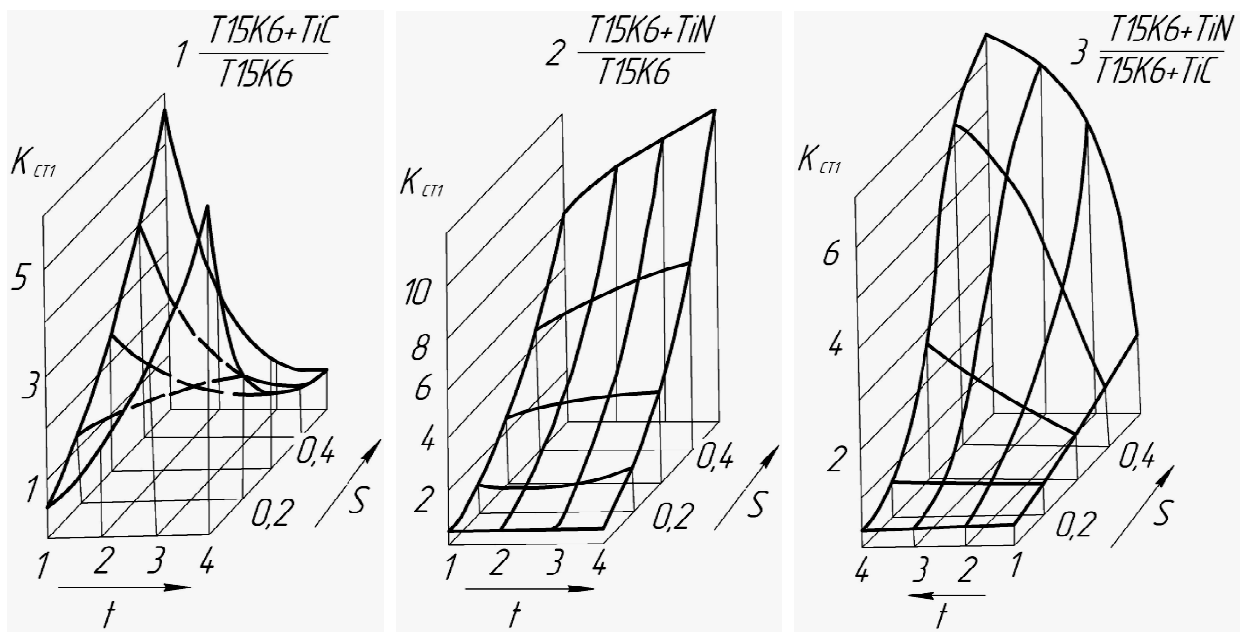


Рисунок 5.4. Сопоставление стойкости сплавов при точении стали 45 ( $V=3$  м/с)



При анализе зависимостей коэффициента стойкости от режимов резания обращает на себя внимание тот факт, что коэффициент стойкости не является постоянной величиной для любой из сравниваемых пар сплавов. Коэффициент стойкости существенно зависит от конкретных сочетаний режимов резания, при этом за-

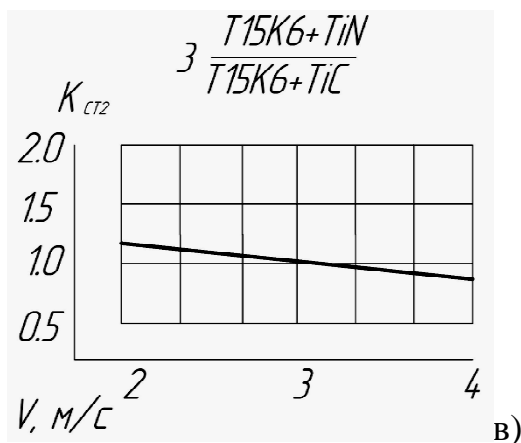
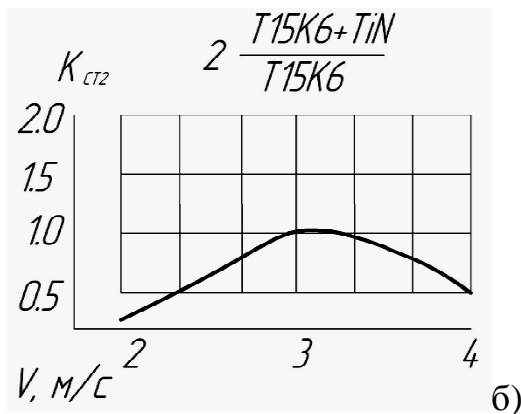
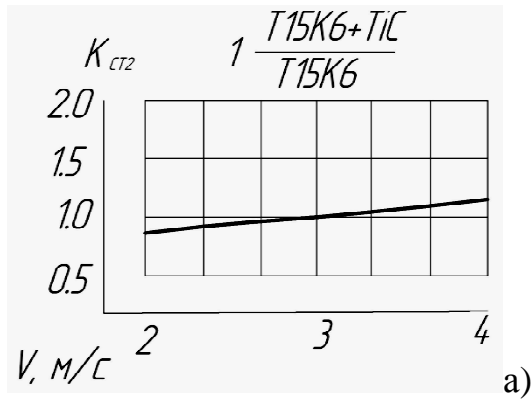


Рисунок 5.5. Влияние скорости резания на коэффициент стойкости  $K_{cm2}$ ,  $S=0,3$  мм/об,  $t=2$  мм

висимость может быть монотонной или экстремальной. Так, например, имеется зона сочетаний режимов резания, при которых стойкость инструмента из сплава T15K6+TiC (рис. 5.4, 1) минимально превосходит стойкость инструмента из базового сплава (до 2,5 раз) или даже оказывается меньше (при  $Sxt < 0,15 \times 2$ ). При других сочетаниях режимов резания преимущество сплава с покрытием оказывается значительно больше - до 6 раз, причем при глубине резания до 2мм увеличение подачи усиливает положительный эффект покрытия, а при глубине резания свыше 3мм увеличение подачи снижает коэффициент стойкости.

Нитридотитановое покрытие резко повышает стойкость инструмента из базового сплава T15K6 (рис. 5.4, 2) в зоне интенсивных режимов резания, но при подаче менее 0,2мм не дает преимущества, изменение глубины резания менее существенно сказывается на коэффициенте стойкости, чем подачи.

Совместное влияние марки базового сплава и покрытия на стойкость инструмента особенно заметно на примере сплава T15K6

(рис. 5.4, 3). Нитридотитановое покрытие на этом сплаве обеспечивает повыше-

ние стойкости практически во всем исследованном диапазоне режимов резания, однако, наиболее существенно сказывается при одновременном увеличении глубины резания и подачи.

Влияние скорости резания при сопоставлении стойкостей инструментов из различных сплавов может выражаться монотонными или экстремальными зависимостями (рисунок 5.5), проявляться в большей или меньшей степени. Карбидотитановое покрытие повышает износостойкость базового сплава Т15К6, увеличение скорости резания ведет к монотонному повышению коэффициента стойкости (рисунок 5.5, а). В зоне скоростей свыше 3 м/с несколько снижается преимущество, обеспечиваемое нитридотитановым покрытием по сравнению с карбидотитановым (рис. 5.9, в).

Таким образом, на соотношение стойкостей инструментов при различных сочетаниях твердых сплавов и покрытий в большей или меньшей степени влияет каждый из параметров, определяющих режимы резания: глубина резания, подача, скорость. Вопрос о допустимости замены или выбора оптимального сочетания сплав-покрытие, обеспечивающего повышение стойкости, необходимо решать с учетом конкретных сочетаний режимов резания. Характерные примеры, иллюстрирующие влияние сочетаний глубины резания и подачи на соотношение максимальных допускаемых скоростей точения различными сплавами при условии обеспечения одинаковой стойкости показан на рисунке 5.6.

Экстремальный характер зависимости коэффициента стойкости при сопоставлении сплавов Т15К6 и Т15К6+TiC сохраняется и для зависимости коэффициента скорости (рис. 5.6, 1 и рис. 5.6, 2). Областям сочетаний глубины резания и подачи, обеспечивающим увеличение  $K_{ск}$  соответствуют области возрастания коэффициента стойкости  $K_{ст1}$ . При сопоставлении сочетаний сплав-покрытие с одинаковой маркой базового сплава, нитридотитановое покрытие обеспечивает повышение производительности обработки (до 1,3 - 2 раз) по сравнению с карбидотитановым в области больших сечений среза и уступает в области меньших сечений (рис. 5.6, 3).

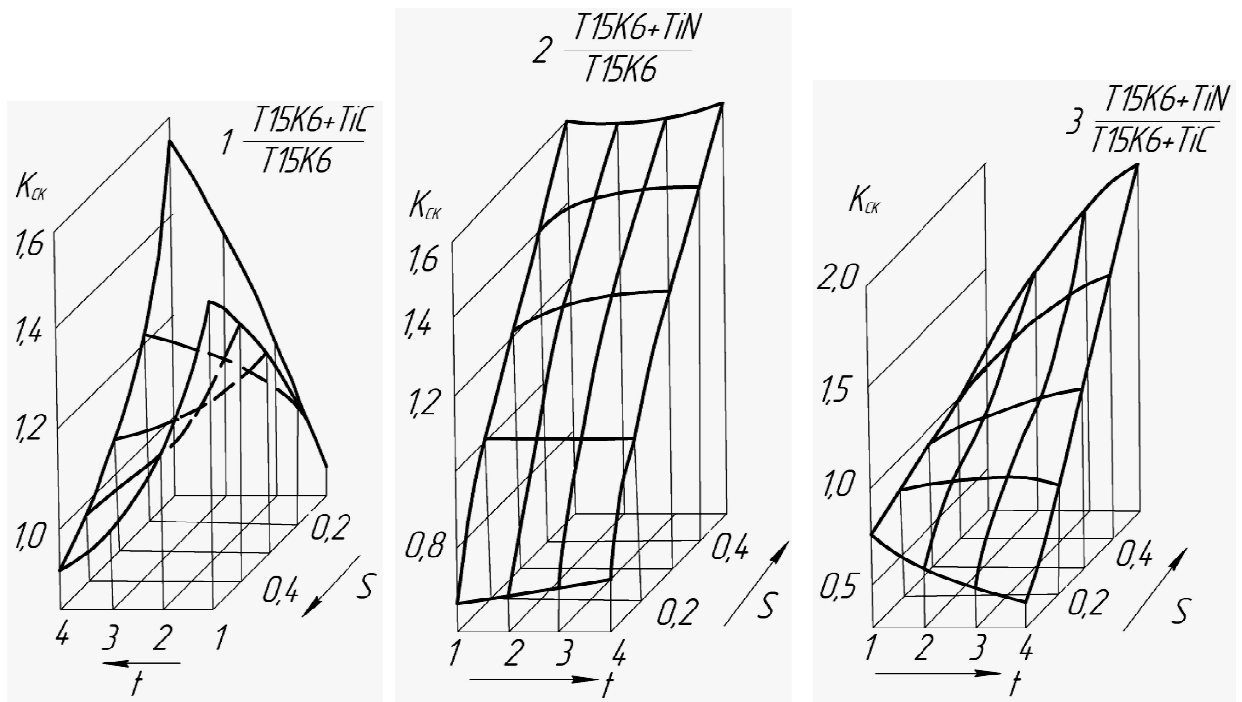


Рисунок 5.6. Сопоставление допускаемых скоростей резания ( $K_{ck}$ )

Использование инструмента с износостойким покрытием при обработке существенно оказывает влияние на стойкость инструмента, поэтому, полученные экспериментальным путем коэффициенты стойкости (табл. 5.7 – 5.9) рекомендуется использовать в оптимизационной модели для учета влияния износостойких покрытий при обработке фасонных поверхностей с целью повышения производительности и себестоимость обработки.

Таблица 5.7. Сопоставление стойкости инструментов из сплава Т15К6 и Т15К6+TiC

Подача мм/об	Глубина резания (мм)											
	1			2			3			4		
	$K_{cm1}$	$K_{ck}$	T	$K_{cm1}$	$K_{ck}$	T	$K_{cm1}$	$K_{ck}$	T	$K_{cm1}$	$K_{ck}$	T
0,1	0,48	0,85	180	1,7	1,15	180	3,6	1,37	180	6,2	1,55	180
0,2	1,4	1,07	78	1,8	1,14	57	2,1	1,18	48	2,4	1,21	42
0,3	2,6	1,23	47	1,9	1,14	19						
0,4	4,0	1,35	33	1,9	1,15	8,8						
0,5	5,7	1,46	25									
Скорость резания м/с				2,0	2,33	2,67	3,0	3,33	3,67	4,0		
Коэффициент влияния Скорости $K_{cm2}$				0,84	0,9	0,95	1,0	1,1	1,1	1,1		

Таблица 5.8. Сопоставление стойкости инструментов из сплава Т15К6 и Т15К6+ TiN

Пода- ча мм/об	Глубина резания (мм)											
	1			2			3			4		
	$K_{cm1}$	$K_{ск}$	T	$K_{cm1}$	$K_{ск}$	T	$K_{cm1}$	$K_{ск}$	T	$K_{cm1}$	$K_{ск}$	T
0,1	0,2	0,67	60	0,2	0,69	41	0,2	0,72	34	0,2	0,72	29
0,2	0,9	1,0	48	1,1	1,0	34	1,2	1,0	27	1,3	1,0	23
0,3	2,4	1,2	43	2,9	1,3	30	3,2	1,3	24	3,5	1,3	20
0,4	4,7	1,4	39	5,8	1,5	27	6,6	1,5	22	7,1	1,5	19
0,5	8,2	1,6	36	10	1,6	25	11	1,6	20	12	1,7	17
Скорость резания м/с				2,0	2,33	2,67	3,0	3,33	3,67	4,0		
Коэффициент влияния Скорости $K_{cm2}$				0,22	0,49	0,65	1,0	1,0	0,7	0,51		

Таблица 5.9. Сопоставление стойкости инструментов из сплава Т15К6+TiC и Т15К6+TiN

Пода- ча мм/об	Глубина резания (мм)											
	1			2			3			4		
	$K_{cm1}$	$K_{ск}$	T	$K_{cm1}$	$K_{ск}$	T	$K_{cm1}$	$K_{ск}$	T	$K_{cm1}$	$K_{ск}$	T
0,1	0,33	0,76	60	0,23	0,58	41	0,19	0,5	34	0,16	0,45	29
0,2	0,62	0,89	48	0,6	0,88	34	0,56	0,87	27	0,55	0,86	23
0,3	0,91	0,98	43	1,6	1,1	30	2,2	1,1	24	2,6	1,2	20
0,4	1,18	1,0	39	3,0	1,3	27	5,4	1,5	22	6,4	1,8	19
0,5	1,44	1,1	36	6,0	1,5	25	7	1,8	20	7,5	2,0	17
Скорость резания м/с				2,0	2,33	2,67	3,0	3,33	3,67	4,0		
Коэффициент влияния Скорости $K_{cm2}$				0,26	0,43	0,67	1,0	0,98	0,71	0,54		

### 5.3. Влияние износа твердосплавных пластин с покрытием на шероховатость обработанной поверхности

С целью определения влияния износостойких покрытий на шероховатость обработанной поверхности в ходе всех стойкостных экспериментов осуществлялся ее контроль, производившийся на 2-3 участках обработанной между двумя фиксациями износа пластины поверхности заготовки.

Далее представлены результаты исследования влияния износостойких покрытий на шероховатость обработанной поверхности на примере сплава Т15К6 без покрытия, с покрытием карбида титана и нитрида титана.

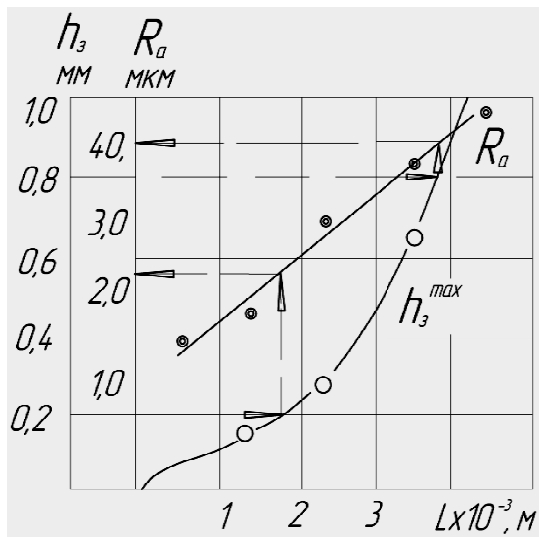


Рисунок 5.7. Износ пластины и шероховатость обработанной поверхности

На рисунке 5.7 в качестве примера показана последовательность определения зависимостей  $R_a = f(h_3^{max})$ , осуществлявшейся для исследованных сочетаний сплав-покрытие и режимов резания предусмотренных методикой стойкостных испытаний. Были построены совместные графики  $R_a = f_1(L)$  и  $h_3^{max} = f_2(L)$  зависимостей шероховатости и ширины фаски износа от суммарного пути резания. Схема определения соответствующих пар  $R_{ai}$  и  $h_{3i}^{max}$  показано пунктирными линиями со стрелками для  $h_3^{max} =$

0,2; 0,8мм. На основании таких построений для каждого сочетания режимов резания получена совокупность групп кривых  $R_a = f(h_3^{max})$  исследованных сплавов.

Шероховатость обработанной поверхности при обработке одним и тем же сплавом зависит и от сочетаний режимов резания. Это видно из примера, представленного на рис. 5.8, на котором изображено семейство кривых, полученных для сплава Т15К6 при реализации сочетаний режимов резания, приведенных в таблице 5.10.

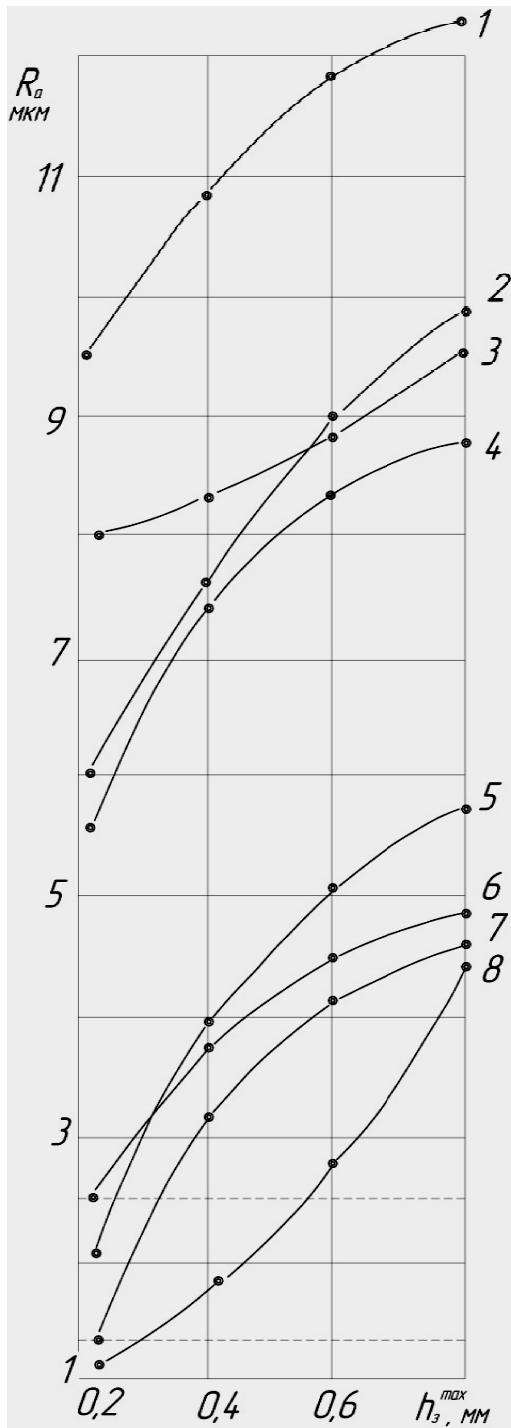


Рисунок 5.8. Влияние режимов резания на шероховатость обработанной поверхности

Выбор математической модели, описывающей зависимость шероховатости поверхности от режимов резания показал, что в интервале их варьирования удовлетворительные результаты дают уравнения регрессии:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3,$$

где  $y = R_a$ , мкм;  $b_0$  - постоянная для конкретного сплава величина;  $b_i$  - коэффициенты при кодированных значениях варьируемых факторов;  $x_i$  - безразмерные варьируемые параметры, представляющие собой  $V, S, t$ ,

$$x_1 = \frac{2(V - V_{max})}{V_{max} - V_{min}} + 1 = 1,7V - 6,1;$$

$$x_2 = 10S - 3;$$

$$x_3 = t - 2.$$

Для получения уравнений регрессии использованы результаты, полученные в ходе стойкостных исследований, проведенных по схеме полного факторного эксперимента (п. 5.2).

В табл. 5.11. приведены полученные коэффициенты уравнений регрессии, а на рис. 5.9 в качестве примера помещено графическое изображение полученных зависимостей для

$$h_3^{max} = 0,5 \text{ мм.}$$

Анализ полученных зависимостей показывает, что наиболее существенное влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывает подача, с ростом подачи увеличивается значение  $R_a$ . Влияние скорости резания проявляется в меньшей степени, чем подача.

Таблица 5.10. Сочетания режимов резания при определении  $R_a = f(h_3^{max})$  для сплава Т15К6

Режимы обработки	Номер сочетаний режимов резания (№ кривой на рис. 5.6)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Скорость, м/с	4,2	4,2	3	3	3	4,2	4,2	3
Подача, мм/об	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2
Глубина, мм	3	1	1	3	3	1	3	1

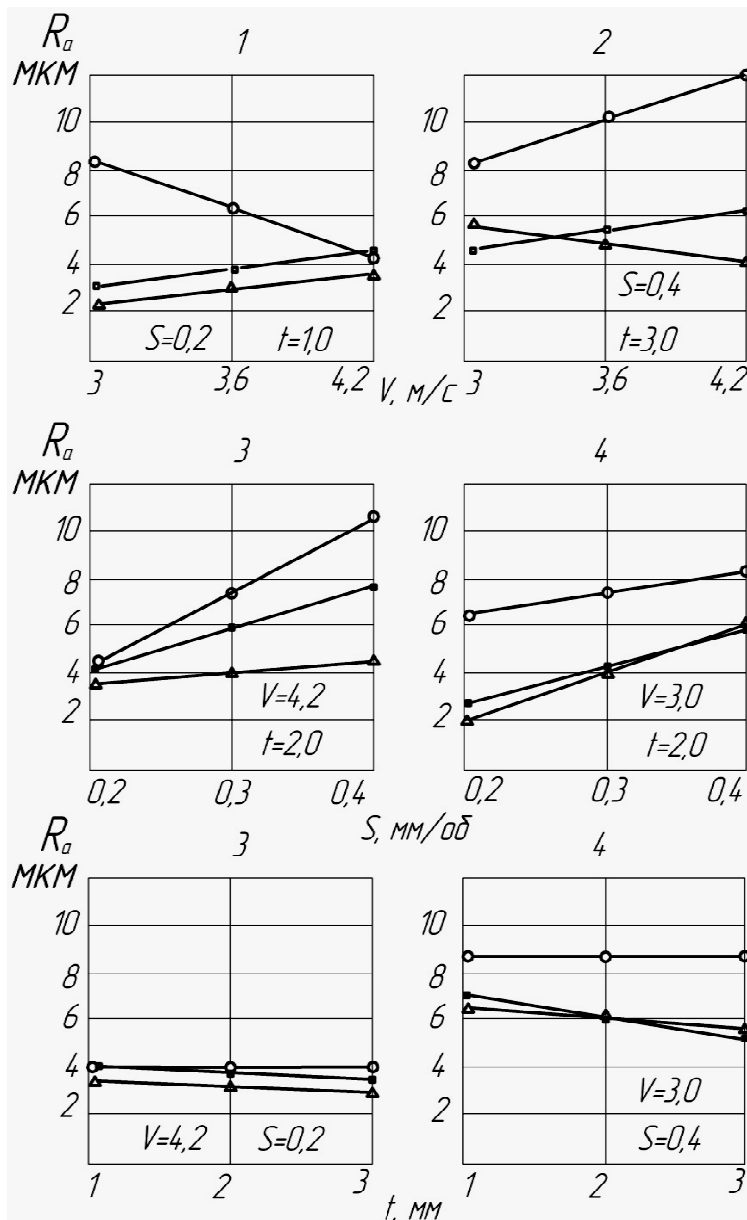


Рисунок 5.9. Влияние режимов резания на шероховатость обработанной поверхности ( $h_3^{max} = 0,5$  мм):

○-○ Т15К6, - Т15К6+TiC, Δ-Δ Т15К6+TiN

Отличия в значениях  $R_a$  при точении исследованными сплавами снижаются по мере износа пластин (рис. 5.10, табл. 5.11), что указывает на возрастание роли покрытия и снижение влияния свойств сочетания сплав покрытие. Положительное влияние износостойких покрытий на снижение шероховатости обрабатываемой поверхности объясняется их способностью к пассивации адгезионных процессов в зоне упругого контакта с обрабатываемым материалом, сдерживания износа задней вспомогательной поверхности.

Таблица 5.11. Коэффициенты уравнений регрессии

Марка сплава, покрытие	$h_3^{max}$	Коэффициенты							
		$b_0$	$b_1(V)$	$b_2(S)$	$b_{12}$	$b_3(t)$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{123}$
T15K6	0,5	7,2	0	1,9	1,1	0	0,9	0,9	0
	0,8	8,3	0,2	2,1	1,0	-0,2	1,2	0,8	-0,3
T15K6+ TiC	0,5	5,1	0,8	1,6	0	-0,7	0	-0,5	-0,2
	0,8	6,8	0,3	2,9	-0,5	-0,5	0,4	-0,3	0
T15K6+TiN	0,5	4,0	0	1,3	-0,8	-0,3	0	-0,2	-0,1
	0,8	5,2	-0,7	1,7	-0,8	0	-0,4	0	-0,4

Аналогично методике, представленной в п. 5.2 выполнена обработка результатов экспериментов по определению шероховатости

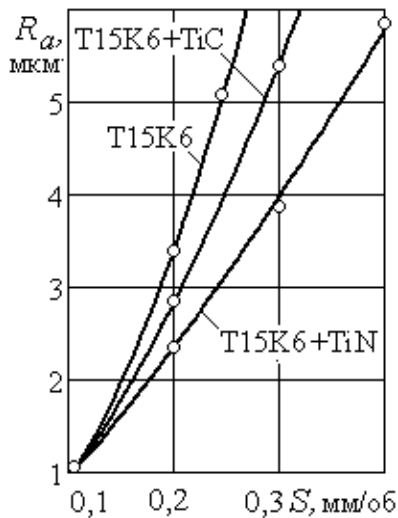


Рисунок 5.10. Графики зависимости шероховатости поверхности  $R_a$  от подачи для инструментов с различными покрытиями

исследуемыми твердыми сплавами с достаточной точностью может быть описана с помощью данных табл.5.11.

Таким образом, результаты показывают, что шероховатость обработанной поверхности может служить одним из параметров оптимизации при выборе марки сплава с покрытием для конкретных условий обработки.

татов экспериментов по определению шероховатости поверхности в зависимости от износа твердосплавных пластин с покрытиями. В результате статистического анализа экспериментальных данных оценена точность полученных уравнений регрессии и адекватность постулируемой математической модели [150]. На основании полученных результатов можно заключить, что при доверительной вероятности 0,95 относительная погрешность расчета величины  $R_a$  не превышает 15%. Проверка адекватности полученных математических моделей исследуемых зависимостей стойкости по  $F$  - критерию Фишера показала их адекватность. Все это позволяет считать, что зависимость шероховатости поверхности от износа твердосплавных пластин с покрытиями при обработке ис-



#### 5.4. Исследование силы и температуры резания при обработке инструментами с износостойкими покрытиями

Величина силы резания, направление ее действия являются одними из важнейших характеристик механики процесса резания. В результате проведения однофакторных экспериментов (классический метод), в ходе которых исследовалось влияние скорости, глубины резания и подачи на силу резания при точении незаостренными пластинами, установлено, что в диапазоне режимов резания, предусмотренных методикой, влияние скорости резания незначительно. Основные исследования проведены по схеме полного факторного эксперимента по схеме  $2^2$ .

В качестве математической модели, описывающей зависимость величины составляющих силы резания  $P_i(P_x, P_y, P_z)$  от режимов обработки принята известная зависимость [125]:

$$P_i = C_{Pi} t^{x_{Pi}} S^{y_{Pi}}, \quad (5.11)$$

где  $C_{Pi}$  - коэффициенты, постоянные для исследуемых сочетаний сплав-покрытие;  $x_{Pi}$ ,  $y_{Pi}$  - показатели степени при варьируемом параметре (глубине резания и подаче).

Скорость резания во всех проведенных опытах оставалась неизменной, 2,5 м/с.

Выражение варьируемых параметров в кодированном виде: глубина резания,  $t$ :

$$X_1 = \frac{2(\ln t - \ln t_B)}{\ln t_B - \ln t_H} + 1 = 1,03 \ln t - 0,29,$$

где  $t_B=3,5$  мм,  $t_H=0,5$  мм;

подача,  $S$ :

$$X_2 = \frac{2(\ln S - \ln S_B)}{\ln S_B - \ln S_H} + 1 = 1,66 \ln S + 2,15,$$

где  $S_B=0,5$  мм/об,  $S_H=0,15$  мм/об.

Вид уравнения регрессии:

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2, \quad (5.12)$$

где  $y = \ln P_i$ ;  $b_i$  - коэффициенты, определяющие значения показателя степени при варьируемых переменных и постоянный коэффициент в зависимостях (5.11).

Планирование эксперимента и обработка результатов проводилось аналогично примеру в п. 5.2. В таблице 5.14 приведены коэффициенты регрессии для уравнения (5.12), а в таблице 5.15 – исходные данные для расчета составляющих силы резания, полученные на основании экспериментальных данных.

Таблица 5.12. Составляющие силы резания, коэффициенты регрессии

Сплав, покрытие	Составляющая силы резания								
	$P_x$			$P_y$			$P_z$		
	Коэффициенты регрессии								
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_0$	$b_1$	$b_2$
T15K6	5,76	1,26	0,30	5,62	0,38	0,47	6,73	1,17	0,52
T15K6+ TiC	5,61	0,97	0,27	5,47	0,18	0,45	6,63	0,92	0,53
T15K6+TiN	5,29	1,17	0,26	5,47	0,22	0,45	6,42	0,94	0,52
T5K10	6,18	1,22	0,25	5,65	0,40	0,54	6,78	0,95	0,49
T5K10+ TiC	6,35	0,97	0,17	5,60	0,31	0,42	6,67	0,90	0,52
T5K10+TiN	5,86	1,07	0,16	5,33	0,37	0,37	6,60	0,93	0,52

Таблица 5.13. Составляющие силы резания, коэффициенты и показатели степени

Сплав, покрытие	Составляющая силы резания								
	$P_x$			$P_y$			$P_z$		
	Коэффициенты и показатели степени								
	$C_p$	$x$	$y$	$C_p$	$x$	$y$	$C_p$	$x$	$y$
T15K6	420	1,3	0,50	680	0,39	0,78	1840	1,20	0,87
T15K6+ TiC	370	1,0	0,45	590	0,18	0,74	1820	0,95	0,88
T15K6+TiN	250	1,2	0,44	590	0,23	0,75	1440	0,97	0,87
T5K10	580	1,25	0,41	820	0,41	0,90	1940	0,98	0,82
T5K10+ TiC	620	1,0	0,48	610	0,32	0,70	1900	0,93	0,88
T5K10+TiN	360	1,1	0,26	410	0,38	0,61	1720	0,96	0,86

При обработке экспериментальных данных установлено, в частности, что совместное влияние факторов незначительно ( $b_{12} < 0,1$ ), при доверительной вероятности 0,05 относительная погрешность расчета значения  $\tilde{P}_i$  не превышала 17%. Обработка и сопоставление результатов полных факторных экспериментов, про-

веденных по классической схеме, показали, что областью определения полученных уравнений является:  $t=0,5-4$  мм,  $S=0,15 - 0,6$  мм/об,  $V=1,67-4,2$  м/с.

Анализ результатов, приведенных в таблице 5.12 показывает, что конкретное сочетание сплав-покрытие оказывает существенное влияние на величину и соотношение составляющих силы резания. Преобладающей по величине является составляющая силы резания  $P_z$ , на которую оказывает более существенное влияние глубина резания ( $b_1=0,87 \div 1,17$ ), и несколько меньше подача ( $b_2=0,48 \div 0,7$ ). Влияние глубины резания является преобладающим на составляющую  $P_x$  ( $b_1=0,97 \div 1,26$ ), при этом влияние подачи снижается ( $b_2=0,16 \div 0,47$ ). Составляющая  $P_y$  является наименьшей по величине и более зависит от подачи ( $b_2=0,3 \div 0,71$ ) чем от глубины резания ( $b_1=0,18 \div 0,40$ ). Износостойкие покрытия существенно снижают влияние базового сплава на величину силы резания, в чем несложно убедиться, произведя расчеты с использованием данных таблиц 5.12, 5.13, причем нитридотитановое покрытие обеспечивает, как правило, большее снижение силы резания и ее главной составляющей  $P_z$ . Соотношение составляющих силы резания в большей мере зависит от базового сплава, сочетания параметров сечения среза и, в меньшей – от вида покрытия.

В соответствии с задачами исследования проведены эксперименты по определению влияния износостойких покрытий на температуру в зоне стружкообразования. Произведено измерение температуры на передней поверхности резца в месте прекращения контакта стружки и твердосплавной пластины при точении стали с несколькими сочетаниями фиксированных режимов резания. При проведении экспериментов сохранена схема течения, конструкция и геометрические параметры резца, использовавшиеся при стойкостных экспериментах.

В качестве измерительного прибора использовался инфракрасный термометр серии Fluke 570 с погрешностью измерения  $\pm 0,75^\circ\text{C}$ . Количество повторов измерений температуры определим в ходе предварительных измерений с использование выборки небольшого объема  $n=10$  при обработке со скоростью резания 185м/мин резцом без покрытия. Результаты предварительного измерения температуры на передней поверхности лезвия инструмента занесем в таблицу 5.14.

Таблица 5.14. Значения температуры на передней поверхности лезвия инструмента при предварительных измерениях, °С

№ измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значение температуры, °С	860,5	859,9	859,4	860,3	860,1	860,7	859,5	860,6	859,8	860,4
Результаты статистической обработки экспериментальных данных										
$\bar{x}$	S			A			E			
860,12	0,457			-0,28			-1,565			

Для результатов предварительного измерения температуры на передней поверхности лезвия инструмента проведем статистическую обработку данных [198 - 202]:

- определим среднее арифметическое значение:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (5.13)$$

- определим среднее квадратическое отклонение:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (5.14)$$

- выполним оценку принадлежности  $x_i$  к данной совокупности:

$$U_i = \frac{\bar{x} - x_i}{S} \leq h, \quad (5.15)$$

где  $h$  - параметр, значение которого зависит от объема выборки.

Для проверки гипотезы о том, что опытное распределение подчиняется нормальному закону распределения, определим [79, 83, 116]:

- асимметрию:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{nS^3}. \quad (5.16)$$

- эксцесс:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{nS^4} - 3. \quad (5.17)$$

- основную ошибку определения асимметрии:

$$\Delta_A = \pm \sqrt{\frac{6}{n}} = \pm \sqrt{\frac{6}{10}} = \pm 0.7746. \quad (5.18)$$

- основную ошибку определения эксцесса:

$$\Delta_E = \pm \sqrt{\frac{24}{n}} = \pm \sqrt{\frac{24}{10}} = \pm 1.5492. \quad (5.19)$$

Результаты расчетов по зависимостям (5.13) — (5.19) занесем в табл. 5.14. Как видно из данных табл. 5.14. показатель асимметрии и эксцесс для распределения значений температуры на передней поверхности лезвия инструмента по своей абсолютной величине существенно не превосходят своих средних ошибок, то есть  $A/\Delta_A < 3$  и  $E/\Delta_E < 3$ . А значит, нет оснований, сомневаться в применимости нормального закона распределения [79, 83, 116].

Согласно [116], минимальная величина выборки определяется по зависимости:

$$n = \frac{t_c^2 * S^2 + \varepsilon^2}{\varepsilon^2}, \quad (5.20)$$

где  $t_c$  — аргумент функции Стьюдента [135], для заданных условий  $t_c = 2,3$ ;

$\varepsilon$  — точность измерений.

Минимальное количество измерений, необходимое, для того чтобы обеспечить заданную точность измерения температуры - 3.

Выполним измерения температуры на передней поверхности лезвия инструмента, при изменении скорости резания для инструментов без покрытия и с покрытиями T15K6+TiC и T15K6+TiN. Результаты измерений занесем в таблицу 5.15.

По средним значениям температуры из табл. 5.15. строим экспериментальные кривые, представленные на графиках 5.11.

Таблица 5.15. Результаты измерения температуры на передней поверхности лезвия инструмента, при изменении скорости резания

V, м/мин	№ измерения	Температура на передней поверхности лезвия, °C		
		Инструмент без покрытия	Инструмент с покрытием T15K6+TiC	Инструмент с покрытием T15K6+TiN
150	1	762.4	644.6	604.8
	2	761.6	645.2	604.1
	3	762.2	645.5	604.9
	$\bar{x}$	762.067	645.1	604.6
	S	0.416	0.458	0.436
185	1	859.7	736.8	641.6
	2	860.1	737.3	642.3
	3	860.6	736.4	641.5
	$\bar{x}$	860.133	736.833	641.8
	S	0.451	0.451	0.436
240	1	942.5	819.3	721.9
	2	943.4	818.7	722.4
	3	942.8	819.5	722.8
	$\bar{x}$	942.9	819.167	722.367
	S	0.458	0.416	0.451

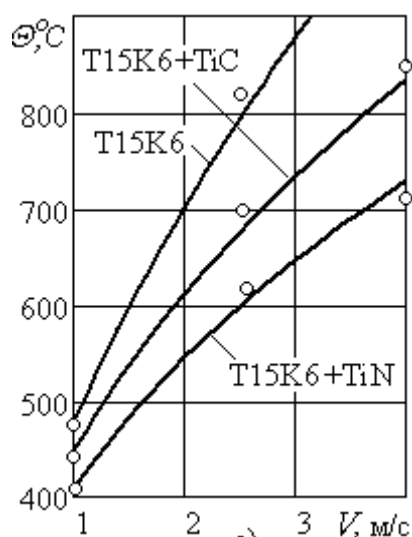


Рисунок 5.11. Графики зависимости температуры резания  $\Theta$  от скорости резания для инструментов с различными покрытиями

Установлено, что с увеличением скорости резания температура на передней поверхности возрастает. При наличии износостойкого покрытия температуры уменьшаются. Наименьшее значение они имеют для инструментов с покрытием нитридом титана TiN, которое обеспечивает наименьшие тепловые потоки в зоне резания. Коэффициенты снижения температуры в зоне резания составляют для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC – 0,86; с покрытиями из нитрида титана TiN – на 0,74, что соответствует ус-

тановленным закономерностям изменения сил резания и тепловых потоков. Результаты экспериментальных исследований, как по уровню температур, так и по соотношениям между температурами для инструментов с различными покрытиями, достаточно хорошо подтверждают теоретические расчеты. Следовательно, представленная методика теоретического расчета тепловых потоков и температур в зоне резания может быть использована и для инструментов с износостойкими покрытиями.

### 5.5. Основные рекомендации работы

Возможности повышения эффективности (повышения производительности, снижения себестоимости при заданном уровне качества обработки) чистового то-

чения твердосплавными инструментами с износостойкими покрытиями исследуются на основе многокритериальной оптимизации режимов резания.

При решении задач многокритериальной оптимизации в качестве основных критериев оптимизации принимаются переменные части производительности  $P$ , себестоимости  $C$  и мультипликативная свертка этих критериев, определяемая их отношением  $C_M = C/P$ , зависящие от режимов резания. Целевые функции выражают зависимость критериев оптимизации от скорости резания  $V$  и подачи  $S$ . Основные ограничения при чистовой обработке - ограничения по температуре резания  $\Theta$  и шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  (раздел 3):

$$C_{\Theta} V^{n_t} S^{y_t} t^{x_t} \leq \Theta_o; C_R S^{y_r} \leq R_a.$$

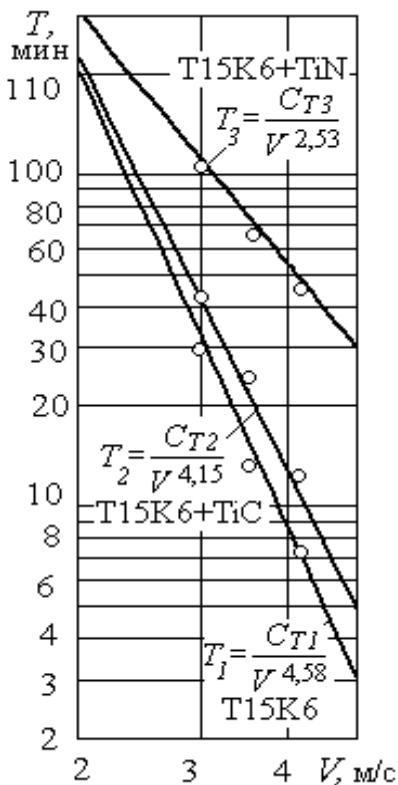


Рисунок 5.12. Графики зависимости стойкости инструмента с различными покрытиями от скорости резания

Закономерности изменения температуры резания, шероховатости поверхности и стойкости инструмента (рисунок 5.12) в зависимости от режимов резания при точении инструментами с износостойкими покрытиями установлены экспериментально.

На основании экспериментальных исследований в результате статистической обработки с погрешностью, не превышающей 5%, установлены следующие зависимости температуры резания  $\Theta$ , шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  от скорости резания  $V$  от условий обработки при использовании инструментов с различными покрытиями (таблица 5.16)

Таблица 5.16. Результаты экспериментальных исследований

Инструментальный материал	Температура резания, °C	Шероховатость поверхности, мкм	Скорость резания, м/с
T15K6	$\Theta_1 = 795V^{0,55}S^{0,4}t^{0,2}$	$R_{a1} = 72S^{1,9}$	$V_1 = 2,73/T^{0,22}S^{0,61}t^{0,18}$
T15K6+TiC	$\Theta_2 = 745V^{0,45}S^{0,4}t^{0,2}$	$R_{a2} = 37S^{1,6}$	$V_2 = 3,35/T^{0,24}S^{0,65}t^{0,22}$
T15K6+TiN	$\Theta_3 = 680V^{0,4}S^{0,4}t^{0,2}$	$R_{a3} = 19S^{1,3}$	$V_3 = 7,34/T^{0,40}S^{0,66}t^{0,21}$

В результате исследований установлено, что при использовании инструментов с покрытиями изменяются не только постоянные коэффициенты  $C_\Theta$ ,  $C_V$ ,  $C_R$ , но и показатели степени, характеризующие степень влияния условий обработки на температуру резания  $\Theta$ , шероховатость обработанной поверхности  $R_a$  и скорость резания  $V$ . Характерно снижение степени влияния скорости на температуру резания и стойкость режущего инструмента, а также подачи на шероховатость обработанной поверхности при использовании инструментов с покрытиями, причем для покрытия из нитрида титана TiN снижение более существенно, чем для покрытия из карбида титана TiC.

Установленные зависимости (таблица 5.16) температуры резания, шероховатости обработанной поверхности и стойкости инструмента от режимов резания



при чистовом точении используются в качестве ограничений при решении задачи оптимизации.

Результаты расчетов оптимальных режимов резания на основании полученных аналитических зависимостей (таблица 5.16), а также результаты расчетов коэффициентов повышения эффективности - повышения производительности  $K_P$ , снижения себестоимости  $K_C$  и отношения себестоимости и производительности  $K_M$  приведены в табл. 5.17 (Приложение 3).

Таблица 5.17. Результаты оптимизации режимов точения резцами с покрытиями

Инструментальный материал	Оптимальные режимы резания				Коэффициенты повышения эффективности		
	Подача, мм/об	Скорости резания по различным критериям, м/с					
		$S_o$	$V_{oP}$	$V_{oC}$	$V_{oM}$	$K_P$	$K_C$
T15K6	0,17	3,7	3,3	3,7	1	1	1
T15K6+TiC	0,19	7,2	4,0	6,1	1,5	0,8	0,8
T15K6+TiN	0,21	6,9	5,9	6,8	2,3	0,6	0,77

При точении фасонных поверхностей параметры процесса резания закономерно изменяются. Пример приведен для вогнутой поверхности с постоянным радиусом кривизны  $\rho$ . Обработка выполняется инструментом с ромбической пластиной, для которой статические углы в плане: главный  $\varphi_C = 90^\circ$  и вспомогательный  $\varphi_{IC} = 55^\circ$ . Вследствие переменности указанных параметров процесса резания основные ограничения при чистовой обработке фасонных поверхностей - по шероховатости поверхности  $R_a$  и температуре резания  $\Theta$  так же становятся переменными вдоль криволинейной образующей В связи с переменностью ограничений переменными вдоль криволинейной образующей становятся и оптимальные режимы резания.

Закономерности изменения температур резания вдоль безразмерной координаты  $\xi$  для указанных ранее условий обработки, рассчитанных для оптималь-

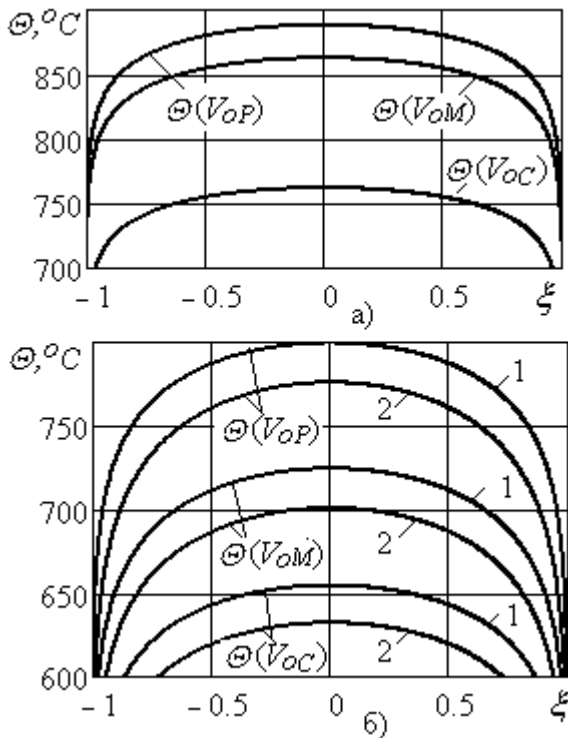


Рисунок 5.13. Распределение температур вдоль криволинейной образующей при точении инструментами без покрытия – а) и с покрытиями: 1- TiC, 2 - TiN – б)

для инструментов без покрытий. Следовательно, оптимальные скорости резания могут определяться без учета температурных ограничений.

Закономерности изменения оптимальных подач  $S_o$  и оптимальных по производительности скоростей резания  $V_{OP}$  вдоль безразмерной координаты  $\xi$  представлены на рис. 5.14. Установлено, что в разных точках криволинейной поверхности оптимальные режимы могут изменяться до 1,5 раз. Это необходимо учитывать при выборе оптимальных режимов резания.

Оптимальная подача для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC до 10%, а из нитрида титана TiN до 23% выше, чем для инструментов без покрытий. Учет температурных ограничений для инструментов без покрытий значительно снижает оптимальную скорость резания. Снятие температурных ограничений за счет использования инструментов с покрытиями позволяет существенно

ных по различным критериям значениям подач и скоростей резания, приведены на рисунке 5.13.

При обработке инструментами без покрытий (рис. 5.13а) температуры резания для режимов, рассчитанных по критериям производительности и мультипликативной свертки, превышают допустимый уровень  $\Theta_o = 800^\circ\text{C}$ . В этом случае скорость резания  $V_{o\Theta}$  определяется с учетом температурного ограничения.

При нанесении износостойких покрытий (рис. 5.13б) во всем диапазоне изменения температуры резания не превышают допустимого уровня  $\Theta_o = 800^\circ\text{C}$ . Температуры резания для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC до 15%, а из нитрида титана TiN до 25% ниже, чем

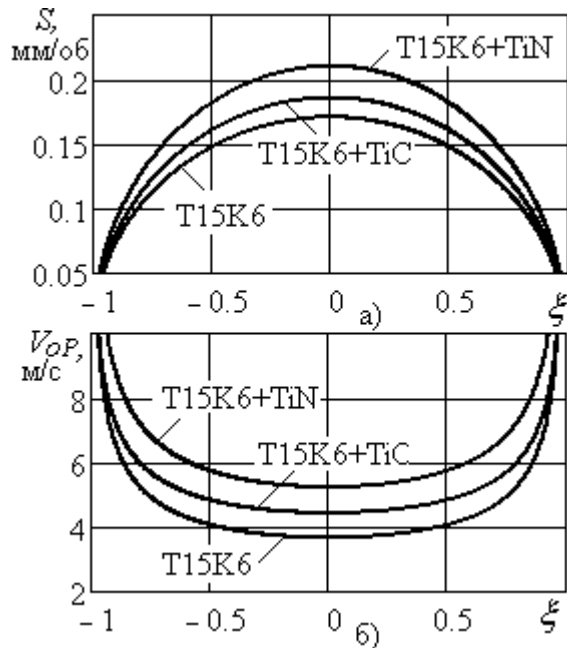


Рисунок 5.14. Распределение подач – а) и скоростей резания – б) вдоль криволинейной образующей при точении инструментами без покрытия и с покрытиями

рументов с покрытиями в зависимости от шероховатости поверхности  $R_a$  приведены на рисунке 5.15.

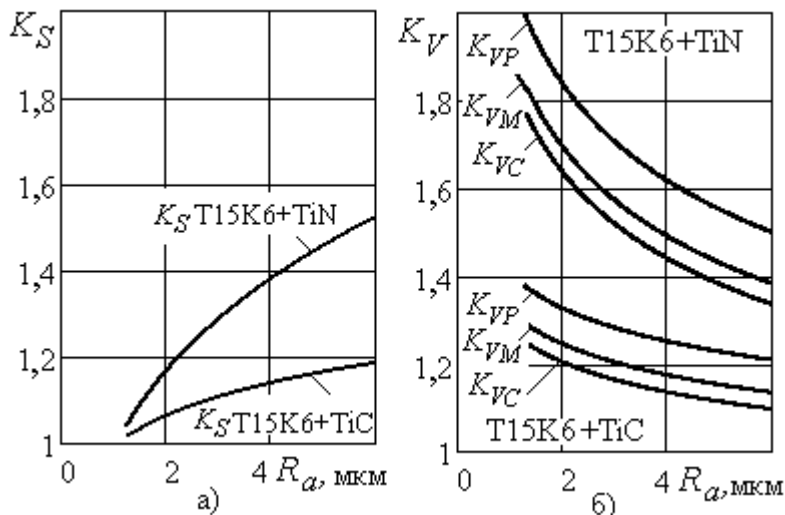


Рис. 5.15. Зависимость коэффициентов изменения подач – а), скоростей резания – б) от шероховатости поверхности  $R_a$  для инструментов с покрытиями

повысить скорость резания. Оптимальные по производительности скорости резания для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC до 20%, а из нитрида титана TiN до 43% выше, чем для инструментов без покрытий.

Оценку рассчитанных оптимальных режимов резания для различных вариантов инструментов с покрытиями целесообразно выполнить путем сравнения с инструментом без покрытия на основании следующих коэффициентов (Приложение 3):

$$K_S = S_{oT15K6+TiC, TiN} / S_{oT15K6};$$

$$K_V = V_{oT15K6+TiC, TiN} / V_{oT15K6}.$$

Результаты сравнительного анализа оптимальных режимов резания для инст-

Исследованные резцы с покрытиями обеспечивают более высокий уровень оптимальных подач (рис. 5.15а) и скоростей резания (рис. 5.15б) во всем диапазоне изменения шероховатости обработанной поверхности, причем резцы с покрытием карбидом титана TiC существенно уступают резцам с покрытием нитридом титана TiN. Для оптимальных

скоростей резания, рассчитанных на основании критерия максимальной производительности, характерен более высокий уровень (коэффициент снижения скорости  $K_{VP}$ ), чем для скоростей, рассчитанных по критерию минимальной себестоимости (коэффициент снижения скорости  $K_{VC}$ ).

Расчет коэффициентов повышения эффективности (повышения производительности  $K_P$ , снижения себестоимости  $K_C$  и критерия свертки производительности и себестоимости  $K_M$ ) осуществляется на основании следующих аналитических зависимостей (Приложение 3):

$$K_P = K_{\Theta}^{-1/n_t}; K_C = \frac{1 + MV_o^{k_V} S_o^{k_S}}{1 + MK_{\Theta}^{-1/mn_t} V_o^{k_V} S_o^{k_S}}; K_M = \frac{1 + MV_o^{k_V-1} S_o^{k_S-1}}{1 + MK_{\Theta}^{-1/mn_t} V_o^{k_V-1} S_o^{k_S-1}}. (5.21)$$

В результате повышения оптимальных подач и скоростей резания за счет использования инструментов с покрытиями производительность обработки для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC повышается в 1,5 раза, из нитрида титана TiN - в 2,3 раза. Себестоимость снижается в 1,2 раза для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC и в 1,7 раза для инструментов с покрытиями нитрида титана TiN.

## 5.6. Внедрение результатов работы в производство

Детали машин с фасонными поверхностями широко применяются в современных машинах и агрегатах. Использование деталей со сложной геометрией образующих обусловлено как усложнением самих механизмов, так и совершенствованием станочного парка и режущего инструмента, позволяющих обеспечивать заданное качество деталей при соответствующей программе их выпуска. При этом известные подходы к обработке фасонных поверхностей не всегда позволяют в полной мере учесть переменную кинематику процесса резания, возникающую при движении резца по криволинейной траектории. В результате изменение кинематических параметров обработки возникают колебания сил резания и температуры в зоне резания, что влечет за собой ухудшение качества обрабатываемых

мых поверхностей, интенсивный износ режущего инструмента и как следствие приводит к необходимости занижать режимные параметры обработки фасонных поверхностей, т.е. к падению производительности их обработки. Поэтому для повышения качества и производительности токарной обработки фасонных поверхностей, в стремлении максимально использовать потенциал современного высокотехнологичного оборудования и режущего инструмента, необходимо иметь на этапе технологической подготовки производства надежный теоретический аппарат, позволяющий учитывать силовые и температурные ограничения.

В ходе выполнения диссертационной работы разработаны принципы и методика повышения эффективности токарной обработки фасонных поверхностей в условиях переменности параметров процесса резания, установлены закономерности формирования и связи шероховатости поверхности, силовых и температурных характеристик процесса резания с учетом изменяющихся геометрических параметров и параметров среза в процессе обработки, разработана методика многокритериальной оптимизации режимов токарной обработки фасонных поверхностей с учетом переменности параметров процесса резания и технических ограничений.

Данные методики внедрены на следующих предприятиях: ООО «Научно-производственное объединение «Донвентилятор» с ожидаемым экономическим эффектом в размере 17500 рос.руб, Луганском ЧП «Депла» - 14500 рос.руб, а также в учебном процессе кафедры «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета (Приложение 4).

## 5.7. Выводы

1. Разработана методика комплексных экспериментальных исследований, обеспечивающая решение актуальной научной задачи повышения стойкости резцов, оснащенных многогранными пластинами из твердых сплавов с износостойкими покрытиями при продольном точении конструкционной стали, которая может быть использована для любых видов инструментов с износостойкими покрытиями.

2. Исследовано влияние износа твердосплавной пластины с износостойкими покрытиями на шероховатость обработанной поверхности, при этом установлено, что при полусточном, черновом точении высота микронеровностей может снижаться до 80% от полученной точением сплавом без покрытия и зависит от сочетания режимов резания.

4. Определены закономерности изменения силы и температуры резания при обработке инструментами с износостойкими покрытиями. Установлено снижение температуры резания для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC – на 14%, из нитрида титана TiN – на 25% по сравнению с инструментом без покрытия.

3. Предложены обобщенные формулы для расчета стойкости, скорости резания, шероховатости поверхности при точении стали в диапазоне режимов: скорость резания 2 - 4 м/с, величина подачи 0,15 - 0,5 мм/об, глубина 0,5 - 4,0 мм. Полученные формулы могут быть использованы для определения ограничений при решении задачи оптимизации режимов обработки.

4. На основании полученных экспериментальных данных рассчитаны и даны рекомендации по назначению оптимальных режимов резания при обработке фасонных поверхностей. Оптимальная подача для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC до 10%, а из нитрида титана TiN до 23% выше, чем для инструментов без покрытий. Оптимальные по производительности скорости резания для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC до 20%, а из нитрида титана TiN до 43% выше, чем для инструментов без покрытий.

5. Приведенные результаты расчетов коэффициентов повышения эффективности - повышения производительности  $K_p$ , снижения себестоимости  $K_c$  при чистовом точении фасонных поверхностей позволяют количественно оценить преимущества инструментов с износостойкими покрытиями в сравнении с инструментами без покрытий. В результате повышения оптимальных режимов резания за счет использования инструментов с покрытиями производительность обработки для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC повышается в 1,5 раза, из нитрида титана TiN - в 2,3 раза, себестоимость снижается в 1,2 раза и в 1,7 раза соответственно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлено решение актуальной научно-практической задачи повышения эффективности токарной обработки фасонных поверхностей деталей машин на основе комплексного обеспечения оптимальных режимов обработки и применения твердосплавного инструмента с износостойкими покрытиями с функционально-ориентированными свойствами.

1. Выполнен анализ основных особенностей и способов технологического обеспечения обработки фасонных поверхностей. Установлена актуальность решения комплексной задачи повышения производительности и снижения себестоимости за счет определения оптимальных режимов резания в условиях переменности параметров процесса токарной обработки и применения твердосплавного инструмента с покрытиями с функционально-ориентированными свойствами.

2. Разработана методика повышения эффективности обработки фасонных поверхностей за счет обоснованного сочетания оптимальных режимов обработки и специального инструмента, обеспечивающего требуемые эксплуатационные функции в условиях переменности параметров процесса резания. Установлены коэффициенты, характеризующие изменения геометрических параметров лезвия инструмента – углов в плане (до 4-х раз), параметров срезаемого слоя (до 4-х раз) и скорости резания (до 2-х раз) вдоль криволинейной образующей фасонной поверхности.

3. Разработана методика многокритериальной оптимизации режимов резания в условиях переменности действующих технических ограничений при токарной обработке фасонных поверхностей. Обоснована целесообразность использования мультипликативной свертки критериев производительности и себестоимости, обеспечивающей их наилучшее сочетание (потери производительности и себестоимости снижаются до 10%). По критериям производительности, себестоимости и их свертке определены аналитические зависимости оптимальных подач и скоростей резания от параметров обработки, учитывающие переменность технических ограничений.

4. Установлены зависимости температур резания и параметров шероховатости обработанной поверхности от режимов обработки с учетом переменности параметров процесса резания при точении фасонных поверхностей. Установлено, что в различных точках криволинейной образующей фасонной поверхности температура резания может изменяться до 2 раз и существенно превышать допустимый уровень, что требует учета температурных ограничений при определении оптимальных режимов резания.

5. На основе функционально-ориентированного подхода при анализе теплового состояния режущей части инструмента обоснован выбор рациональной структуры и вида специального покрытия с требуемыми функциональными свойствами зон твердосплавной пластины. На основе метода конечных элементов разработана методика расчета температур в зоне резания, позволяющая оценить возможность снижения температур в зоне обработки за счет применения инструментов с покрытиями с функционально-ориентированными свойствами. Установлено, что применение инструмента с функционально-ориентированными свойствами на основе карбида титана TiC и нитрида титана TiN обеспечивает снижение температуры в функциональных зонах пластины до 27%.

6. В результате экспериментальных исследований установлено влияние износа твердосплавной пластины и режимов обработки на шероховатость обработанной поверхности (при чистовом точении инструментом с покрытием высота микронеровностей может снижаться до 80% в сравнении с точением инструментом без покрытия). Выполнен сравнительный анализ температур в зоне резания при точении инструментами с износостойкими покрытиями. Теоретически рассчитано и экспериментально подтверждено снижение температуры резания для инструментов с различными покрытиями: из карбида титана TiC – на 14%, из нитрида титана TiN – на 25%.

7. На основании полученных экспериментальных данных рассчитаны и даны рекомендации по назначению оптимальных режимов резания, а также выполнена оценка повышения эффективности - повышения производительности  $K_P$ , снижения себестоимости  $K_C$  при чистовом точении фасонных поверхностей инструмен-



тами с износостойкими покрытиями. В результате повышения оптимальных подач и скоростей резания за счет использования инструментов с покрытиями производительность обработки для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC повышается в 1,5 раза, из нитрида титана TiN - в 2,3 раза. Себестоимость снижается в 1,2 раза для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC и в 1,7 раза для инструментов с покрытиями нитрида титана TiN.

8. Результаты работы внедрены в производство на предприятии ООО «Научно-производственное объединение «Донвентильатор» с ожидаемым экономическим эффектом в размере 17500 рос.руб, Луганском ЧП «Депла» - 14500 рос.руб, а также в учебном процессе кафедры «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация производственных процессов в машиностроении / Под. Ред. Н.М. Капустина – М.: Высшая школа, 2004. – 415 с.
2. Агеев, А.Д. Определение стойкостных зависимостей сил резания при точении инструментом, оснащенным многогранными неперетачиваемыми пластинами / А.Д. Агеев, Т.Н. Герасимова // Прогрессивный режущий инструмент. Высокопроизводительное резание. – М., 1978, - С. 121-129.
3. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. / Ю.П. Адлер, Е.В. Марков, Ю.В. Грановский – М.: Наука, 1971. – 283 с.
4. Антипов, Д. В. Обеспечение качества фасонных поверхностей деталей путем управления процессами проектирования и изготовления формообразующего инструмента. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. - Тольятти, 2006. - 20 с.
5. Базров, Б.М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
6. Безъязычный, В. Ф. Влияние качества поверхностного слоя после механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин. // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. Инженерия поверхности. – М.: Машиностроение, 2001. - № 4. - С. 9-17.
7. Безъязычный, В.Ф. Назначение режимов резания по заданным параметрам качества поверхностного слоя. - Ярославль: ЯПИ, 1978. – 86 с.
8. Безъязычный, В.Ф. Технологическое и технико-экономическое обеспечение заданных эксплуатационных свойств деталей. / В.Ф. Безъязычный, С.А. Волков // Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения, 2002 - Орел: ОрелГТУ, - 2002. - С. 34 - 38.
9. Бобров, В.В. Улучшение эксплуатационных свойств деталей прокатного оборудования. / В.В. Бобров, В.Д. Коваленко, А.С. Михайлусь - Киев: Техніка, 1988. — 158 с.
10. Бутенко, В.И. Структурная самоорганизация материала поверхностного слоя обрабатываемой детали. – Таганрог: ТРТУ, 2000. - 168 с.

11. Великанов, К.М. Определение экономической эффективности вариантов механической обработки. - М: «Машиностроение», 1971. – 240 с.
12. Верещака, А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойким покрытием. – М.; Машиностроение, 1993. - С.368.
13. Верещака, А. С. Основные аспекты применения и совершенствования режущего инструмента с износостойкими покрытиями // СТИН. - 2000. - №9. – С. 33-40.
14. Верещака, А.С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. / А.С. Верещака, И.П.Третьяков – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с.
15. Верещака, А.С. Физические основы процесса резания и изнашивания режущего инструмента с износостойкими покрытиями: Уч. пособие / А.С. Верещака, В. П. Табаков. - Ульяновск: УлГТУ, 1998. - 144 с.
16. Вильсон, А.Л. К вопросу об оптимизации режимов резания с учетом стохастического характера стойкостных зависимостей / А.Л. Вильсон, А.О. Этин // Вестник машиностроения, 1984. - С. 42-45.
17. Внуков, Ю.Н. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент. – Киев: Тэхника, 1992. – 143 с.
18. Воронцов, Н.М., Эксплуатация валков обжимных и сортовых станов. / Н.М. Воронцов, В.Т. Жадан, Б.Я. Шнееров и др. - М.: Metallurgy, 1973. - 288 с.
19. Герасимов, А. А. Основное и вспомогательное оборудование листопрокатных станов: Учебное пособие. — Липецк: НМК, 2009. — 114 с.
20. Гжиров, Р. И. Программирование обработки на станках с ЧПУ. / Р. И. Гжиров, П. П. Серебrenицкий. – Л.: Машиностроение, 1990. – 489 с.
21. Гнесин, Г.Г. Износостойкие покрытия на инструментальных материалах. / Г.Г. Гнесин, С.Н. Фоменко // Порошковая металлургия. – 1996. - № 9-10. - С. 17-26.
22. Грановский, Г.И. Обработка результатов экспериментальных исследований резания металлов. – М.: Машиностроение, 1982. – 112 с.

23. Грановский, Э.Г. Точность обработки сложноконтурных поверхностей деталей. / Э.Г. Грановский, М.С. Камсюк // Основные направления развития технологии машиностроения: Труды МВТУ. – 1981. – № 348. – С.110 – 127.

24. Гурьянихин, В. Ф. Проектирование технологических процессов обработки заготовок на станках с ЧПУ : учебное пособие / В. Ф. Гурьянихин, М. А. Белов, А. Д. Евстигнеев. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 120 с.

25. Дальский, А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. М., «Машиностроение», 1975. - 223 с.

26. Дениел, К. Применение статистики в промышленном эксперименте. – М.: Мир, 1979. – 299 с.

27. Дерябин, А. Л. Программирование технологических процессов для станков с ЧПУ. – М.: Машиностроение, 1984. – 51 с.

28. Дружинский, И.А. Сложные поверхности: Математическое описание и технологическое обеспечение: Справочник. – Л.: Машиностроение, Ленингр. Отделение, 1985. – 263 с.

29. Емельянов, В.А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий / В.А. Емельянов, Ж.А. Мрочек, И.А. Иванов - Минск: Интеграл,- 1998. – 286 с.

30. Ермаков, Ю.М. Комплексные способы эффективной обработки резанием: Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.

31 Закураев, В.В. Многокритериальная оптимизация и управление механической обработкой на токарных станках с ЧПУ / В.В. Закураев, А.А.Шивырев // Вестник машиностроения, 2001. - №4. - С. 44 49.

32. Ивченко, Т.Г. Использование метода геометрического программирования для расчета оптимальных режимов резания при точении. // Научный вестник ДГМА. – Краматорск: ДГМА, 2011. – №1 (5 Е). – С. 47–52.

33. Ивченко, Т.Г. Исследование общих закономерностей изменения температуры резания в различных условиях обработки. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Вип. 6. – Донецьк: ДонНТУ, 2009.- С.49 -55.

34. Ивченко, Т.Г. Оптимизация режимов резания при чистовом и тонком точении методом геометрического программирования. / Т.Г. Ивченко, Е.Е. Шальская // Прогрессивные технологии и системы машиностроения.– Донецк: ДонНТУ, - 2010. – С. 284 – 290.

35. Ивченко, Т.Г. Расчет тепловых потоков и температур резания при точении с использованием смазочно-охлаждающих жидкостей. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА. – 2010. - вип.26. – С. 90-96.

36. Ивченко, Т.Г. Учет температурных ограничений при оптимизации режимов резания методом геометрического программирования. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения.– Донецк: ДонНТУ, 2014. - Вып. 1(47). – С.144-148.

37. Иконников, А.М. Совершенствование технологии магнитно-абразивной обработки фасонных поверхностей: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.08 / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2004 – 20 с.

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

39. Инструментальная оснастка станков с ЧПУ: Справочник. / С.Н. Григорьев, М.В. Кохомский, А.Р. Маслов; Под общ. ред. А.Р. Маслова. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.

40. Ивченко Т.Г. Петряева, Король К.О. Визначення теплових потоків та температури різання під час точіння фасонних поверхонь / Т.Г. Івченко, І.О. Петряєва, К.О. Король // Машиностроение и техносфера ХХ1 века. Сб. трудов ХХ международной конференции в г. Севастополе 17-21 сентября 2013г. В 4-х томах. - Донецк: ДонНТУ, 2013. Т.1. - С. 253-257.

41. Ивченко, Т.Г. Визначення температури різання з урахуванням змінності параметрів стружкоутворення в залежності від умов обробки. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. - ДонНТУ. Донецьк 2013. - Вип. 1(10). - С.21-27.

42. Івченко, Т.Г. Оптимізація параметрів процесу різання з обліком температурних обмежень. Научный вестник ДГМА. – Краматорск: ДГМА, 2012. – №1 (9 Е). – С. 72-77.
43. Кабалдин, Ю. Г. Повышение прочности и износостойкости режущего инструмента термопластическим упрочнением. -Хабаровск : Изд-во ДГУ, 1986. - 53 с.
44. Каталог и расчет режимов резания фирмы Sandvic Koromant, 2008 г.
45. Кацев, П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1974. – 239 с.
46. Качество машин: Справочник. В 2-х т. Т.1 / А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. - М.: Машиностроение, 1995. - 256 с.; Т.2 / А.Г. Суслов, Ю.В. Гуляев, А.М. Дальский и др. - М.: Машиностроение, 1995. – 430 с.
47. Качество поверхности и трение в машинах / Костецкий Б.И., Колесниченко Н.Ф. - «Техніка», 1969. – 216 с.
48. Каштальян, И.А. Обработка на станках с числовым программным управлением: Справ. Пособие / И.А. Каштальян, В.И. Клевзович. – Минск.: Выш. Шк., 1989. – 271 с.
49. Клушин, М.И. Резание металлов. - М.: Машгиз, 1959. - 454с.
50. Костржицкий, А.И. Многокомпонентные вакуумные покрытия / А.И. Костржицкий, О.В. Лебединский – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
51. Крагельский, И.В. Трение и износ. - М.: Машиностроение, 1968.-480с.
52. Кроль, О.С. Оптимизация процесса резания методом геометрического программирования первой степени. / О.С. Кроль, Г Л. Хмеловский, В В. Пейчева // Технология и автоматизация машиностроения. - Киев.: Тэхніка, 1991. - Вып. 47. - С. 48-52.
53. Кузьмин, В.В. Метод многокритериальной оптимизации при проектировании технологических процессов изготовления деталей. / В.В.Кузьмин, Г. А. Борисенко, В.П. Кокушков // СТИН, 1989. - №11. - С. 14-16.
54. Кудинов, В. В. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. / В. В. Кудинов, В. М.Иванов - М.: Машиностроение, 1981. - 192 с.

55. Левин, С.Ф. Математическая теория измерительных задач. Часть 8. Метод косвенного измерения // Контрольно-измерительные приборы и системы. - 2003. - №5. - С. 29 - 35.
56. Левин, С.Ф. Математическая теория измерительных задач. Часть 9. Метод совокупных измерений. // Контрольно-измерительные приборы и системы. - 2004. - №5. - С. 29 - 32.
57. Лещенко, А.И. Анализ точности обработки фасонных поверхностей в зависимости от погрешности настройки инструментов на программную операцию. // Вісник Приазовського державного технічного університету. - 2008 р. - Вип. 18. - С 129-133.
58. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. - М.: Машиностроение, 1982. - 278 с.
59. Львовский, Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. – М.: Высшая школа, 1982. – 224 с.
60. Малыгин, Б.М. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. – М: Машиностроение, 1989. - 112 с.
61. Марецкая, В. В. Исследование и разработка технологических процессов изготовления деталей с учетом взаимного влияния формируемых показателей качества. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. - Москва, 2008. - 16 с.
62. Марков, Н.Н. Нормирование точности в машиностроении. - М.: Издательство «Станкин», 1993. – 320 с.
63. Маталин, А. А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин. - М.: 1966. - 252 с.
64. Маталин, А.А. Технология машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов. - Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
65. Мацевитый, В. М. Покрытия для режущего инструмента. - Харьков : Вища школа. Изд-во при Харьк. гос. ун-те, 1987. -127 с.
66. Машиностроение. Энциклопедия. / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и

др. // Технология, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т. III – 8. / Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин и др. – М.: Машиностроение, 2000. – 744 с.

67. Методика исследования характеристик поверхностного слоя деталей приборов. / В.А. Валетов, С.Д. Васильков, А.Н. Сисюков, О.С. Юльметова // Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010.- 92 с.

68. Методики (основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. – М.: Экономика, 1977. – 50 с.

69. Методики экспериментальных исследований по определению исходных данных для разработки общемашиностроительных нормативов режимов резания по основным видам обработки. / Под ред. Г.И. Грановского. – М.: НИИМАШ, 1982. – 159 с.

70. Михайлов, А.Н. Методика и основные принципы синтеза функционально-ориентированных вакуумных ионно-плазменных покрытий изделий машиностроения / А.Н. Михайлов, В.А. Михайлов, Е.А. Михайлова // Упрочняющие технологии и покрытия. – М.: Машиностроение, 2005. №7. - С. 3 – 9.

71. Михайлов, А.Н. Общий подход к созданию композиционных технологий машиностроения / Научно-технические технологии в машиностроении, 2012.- №6. - С. 24-29.

72. Михайлов, А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

73. Михайлов, А.Н. Функционально-ориентированные вакуумные ионно-плазменные покрытия изделий машиностроения. / А.Н.Михайлов, В.А. Михайлов, Е.А. Михайлова // Обеспечение и повышение качества машин на этапах их жизненного цикла: Материалы 5-й междунар. Науч.-техн. конф., г. Брянск, 19-21 окт. 2005 г. – Брянск: БГТУ, 2005. - С. 17-19.

74. Михайлов, А.Н. Исследование особенностей функционально-ориентированных детонационно-газовых покрытий / А.Н. Михайлов, А.М.



Петров, В.В. Головятинская, М.Г.Петров // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2013. Вип. 1, 2 (45). С. 181 - 186.

75. Молчанов, Г.Н. Повышение эффективности обработки на станках с ЧПУ. - М.: Машиностроение, 1979. - 204 с.

76. Морозов, В.В. Программирование обработки деталей на современных многофункциональных станках с ЧПУ: Учеб. пособие / В.В. Морозов, В.Г. Гусев. - Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 236 с.

77. Мотин, В. Н. Оптимизация режимов безлюдных технологических процессов механической обработки деталей. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону, 1995. - 20 с.

78. Надежность и долговечность валков холодной прокатки. / Полухин В.П., Николаев В.А., Тылкин М.А. и др.: - «Металлургия», 1976. – 448 с.

79. Назаров, Н.Г. Метрология. Основные понятия и математические модели: Учебное пособие для вузов. — М.: Высш. шк., 2002. — 348с.

80. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др. – М.: Машиностроение, 2012. – 528 с.

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

82. Некрасов, Р.Ю. Формообразование фасонных поверхностей при точении жаропрочных сталей и сплавов на станках с ЧПУ с использованием оперативных коррекций. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. - Тюмень, 2008. - 16 с.

83. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. — Л.: Энергоатомиздат, 1991. — 304с.

84. Нормирование отклонений формы, расположения и шероховатости поверхностей деталей машин: Учебное пособие. / Ю.М. Правиков, Г.Р. Муслина. - Ульяновск: УлГТУ, 2002. - 100с.

85. Нормирование точности и технические измерения: учеб. Пособие / В.Л. Соломахо, Б.В. Цитович, С.С. Соколовский. – Минск: Изд-во Гревцова, 2011. – 360 с.

86. Обеспечение качества поверхностного слоя деталей при эксплуатации. / А.Г. Суслов, С.О. Сухарев, Д.И. Петрешин // Справочник. Инженерный журнал. - 1999. - №5. - С. 19 - 23.
87. Обработка фасонных поверхностей тел вращения. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/241/2412785.html>
88. Ольхов, В. Е. Моделирование температурных полей режущего инструмента при высокоскоростном резании. / Известия вузов. Машиностроение, 1990. - №3. – С 140 - 142.
89. Оптимизация и управление процессом резания. / О.С. Кроль, Г.Л. Хмеловский. – К.: УМК ВО, 1991. – 140с.
90. Оптимизация режимов обработки на металлорежущих станках. / А.М. Гильман и др. – М.: Машиностроение, 1972. – 188 с.
91. Оптимизация режимов чистового точения на основании мультипликативной свертки критериев производительности и себестоимости / И. А. Петряева, Т. Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2016. Вып. 1 (52). – С.146-150.
92. Оптимизация технологических процессов механической обработки. / Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.
93. Основы технологии машиностроения / Под ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 426 с.
94. Остафьев В. А. Термопрочность режущего инструмента / В. А. Остафьев, А. Н. Нощенко // Вестник машиностроения, 1990.- №10. - С . 61 - 63.
95. Остафьев, В. А. Термопрочность режущего инструмента / В. А. Остафьев, А. Н. Нощенко // Вестник машиностроения. - 1990. - №10. - С . 61-63.
96. Оценка эффективности использования инструментов с покрытиями при чистовом точении фасонных поверхностей / И. А. Петряева, Т. Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, - 2016. - Вып. 4 (55). - С.62-69.

97. Панин, В.В. Выбор положения дополнительной системы координат при обработке сложнопрофильных деталей / В.В. Панин, Г.В. Шадский, Д.Д. Шаталов // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 4. Ч.1. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. – С. 262 – 267.

98. Панфилов, Ю.В. Тонкопленочные покрытия на инструменте: анализ современного состояния и тенденции развития. Электронные, ионные и плазменные технологии. Справочник. / Ю.В. Панфилов, А.И. Беликов, И.В. Иванчиков // Инженерный журнал № 1, 2000. – С. 12-16.

99. Пат. 1731325 СССР, Кл. В21В 39/16. Обводная направляющая проводка прокатной клетки полосового прокатного стана / Л.М. Самохвалов, В.Ф. Саенко, Л.М. Агеев, Н.А. Корнилова; заявл. 27.04.89; опубл. 07.05.92, Бюл. №17. – 4 с.

100. Петраков, Ю.В. Розвиток САМ систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПУ: Монографія. – К.: Січка, 2011. - 220 с.

101. Петраков, Ю.В. Теория автоматического управления технологическими системами. / Ю.В. Петраков, О.И Драчев. - М.: Машиностроение, 2008. – 336 с.

102. Петраков, Ю.В. Управление процессом обработки сложных поверхностей на станках с ЧПУ // Вестник НТУУ «КПИ». 2000. - № 39 – С. 37 – 44.

103. Петрешин, Д.И. Технологическое повышение шероховатости обрабатываемых поверхностей деталей машин на основе адаптивного управления. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 - Брянск, 2001. - 20 с.

104. Петряева, І.О. Дослідження параметрів шорсткості під час обробки фасонної поверхні // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, - 2014. - Вып. 2 (48). - С.50-56.

105. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. - М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

106. Подураев, В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов. - М.: Высшая школа, 1974. - 210 с.

107. Полетика, М.Ф. Влияние свойств обрабатываемого материала на процесс стружкообразования. // Вестник машиностроения, 2001. - №7. - С. 45-48.

108. Поляков, Б.Н. Повышение качества технологий и долговечности оборудования прокатных станов. - Екатеринбург: Изд-во Свердл. инж.-пед. ин-та, 1993. - 208 с.

109. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: Справочник. / В.И. Баранчиков, А.В. Жаринов, Н.Д. Юдина и др.; Под общ. ред. В.И. Баранчикова. - М.: Машиностроение, 1990. - 400 с.

110. Пухальский, В.А. Выбор формы режущей части инструмента. / Вестник машиностроения, 2007. - № 8. - С. 58 - 59.

111. Радзевич, С.П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории: Монография. - К.: Растан, 2001. - 592 с.

112. Радзевич, С.П. Основные направления оптимизации процессов обработки металлов резанием на этапе технологической подготовки производства. / С.П.Радзевич, В.А.Палагута - М.,1991.-72 с.

113. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением: Справочник / В.И. Гузеев, В.А. Батуев, И.В. Сурков; Под ред. В.И. Гузеева. - М.: Машиностроение, 2005 - 368 с.

114. Резников, А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. - М.: Машиностроение, 1981 г. - 220 с.

115. Родин, П.Р. Обработка фасонных поверхностей на станках с ЧПУ. / П.Р.Родин, Г.А. Линкин, В.Н. Татаренко - К.: Техника, 1976. - 298 с.

116. Румшинский, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. - М.: Наука, 1971. - 192 с.

117. Рыжов, Э.В. Комплексный параметр для оценки свойств поверхностей трения деталей машин. / Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов, А.П. Улашкин // Трение и износ, 1980. - т.1. - С.436-439.

118. Рыжов, Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. - Киев: Наукова думка, 1984. - 272 с.

119. Свирщёв, В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки: учеб. пособие / В.И. Свирщёв. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 116 с.

120. Сивак, Б.А. Технологические основы проектирования машин и оборудования прокатного производства: Сортовые и листовые литейно-прокатные агрегаты для металлургических минизаводов: Курс лекций. - Москва. МИСиС, 2001. — 65 с.

121. Сидорова, Е. В. Обоснование выбора СОТС для обеспечения минимального износа инструмента // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Донецьк: ДонНТУ, 2012 – Вип. 9 (205): Машинобудування і машинознавство. – С. 64-71.

122. Соболев, И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах с многими критериями. / И.М. Соболев, Р.Б. Статников -М.: Наука, 1981. - 107 с.

123. Способ обработки фасонных поверхностей точением. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/241/2412785.html>

124. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г.Л. Амитан, И.А. Байсупов, Ю.М. Барон и др.; Под общ.ред. В.А. Волосатова. – Л.: Машиностроение. Ленингр.отд-ние, 1988. – 719 с.

125. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Сулова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 2001. – 944 с.

126. Справочное пособие для работников метрологических служб: В 2 кн / Б.Г. Артемьев, С.М. Голубев. — М.: Изд—во стандартов, 1990, — Кн. 1 — 528с.

127. Сулов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. - М.: Машиностроение, 2000. - 320 с.

128. Сулов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г.Сулов.- М.: Машиностроение, 1987.-193 с.

129. Табаков, В. П. Влияние состава износостойкого покрытия на контактные и тепловые процессы и на изнашивание режущего инструмента // СТИН. 1997. - № 10. - С. 20 - 24.

130. 121. Табаков, В. П. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями на основе сложных нитридов и карбонитридов титана. - Ульяновск : УлГТУ, 1998. - 122 с.

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

132. Технологические методы обеспечения эксплуатационных свойств и повышения долговечности деталей. / В.Ф. Безъязычный, Т.Д. Кожина, Чарковский Ю.К. – Ярославль: ЯПИ, 1987. – 86 с.

133. Технологические свойства новых СОЖ для обработки резанием. / Под ред. М. И. Клушина. – М.: Машиностроение, 1979. – 192 с.

134. Технология машиностроения: В 2 т. Т. 2. Производство машин: Учебник для вузов / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, О.М. Деев и др.; Под. ред. Г.Н. Мельникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001 – 640 с.

135. Тимошенко, В. А. Избирательное нанесение покрытий на режущий инструмент / В. А. Тимошенко, Е. В. Голдыш, А. В. Тимошенко // СТИН. 1995.- №11.-С. 20-23.

136. Тимошенко, Г.М. Теория инженерного эксперимента / Г.М. Тимошенко, П.Ф. Зима. — К.: 1991. — 124с.

137. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов / И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский; Под ред. Д.Г. Громаковского. - Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2000. - 268 с.

138. Тулисов, А. Н. Повышение работоспособности режущего инструмента путем нанесения двухслойных покрытий со слоями сложного состава // Тезисы докладов 41-Ой научно-технической конференции. - УлГТУ: Вузовская наука в современных условиях», 2006. - С. 31.

139. Управление качеством продукции машиностроения: учебное пособие / М.М. Кане, А.Г. Суслов, О.А. Горленко, Б.В. Иванов, В.Н. Корешков, А.И. Медведев, В.В. Мирошников; под общ. ред. д\_ра техн. наук М.М. Кане. - М.: Машиностроение, 2010. - 416 с.

140. Учет переменности параметров процесса точения фасонных поверхностей при определении оптимальных режимов резания / И.А. Петряева, А.Н. Михайлов, Т.Г. Ивченко // Научно-технический и производственный журнал. – М.: Машиностроение. - 2014. - №. 9 – С.11-17.

141. Ушаков, И.А. Курс теории надежности систем: учеб. пособие для вузов. – М.: Дрофа, 2008. – 239 с.

142. Фираго, В.П. Основы проектирования технологических процессов и приспособлений. Методы обработки поверхностей. - М.: Машиностроение, 1973. - 468 с.

143. Формирование температурных полей в области, содержащей тонкостенное покрытие / А. В. Аттетков, Л. Н. Власова, И. К. Волков, Е. А. Загоруйко // Вестник МГТУ, Машиностроение, 1999. - №2. - С. 3 - 10.

144. Фрузин, Ю.Л. Высокопроизводительный режущий инструмент. - М.: Машиностроение, 1977. - 183 с.

145. Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.

146. Худобин Л.В., Бердичесевский Е.Г. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке. Справочное пособие. М.: Машиностроение, 1977. 189 с.

147. Чихранов, А. В. Новые износостойкие покрытия для режущего инструмента // Вестник УлГТУ, Сер. Машиностроение, строительство. - Ульяновск: УлГТУ, 2004. - №3. - С. 35 - 38.

148. Шарин, Ю.С. Технологическое обеспечение станков с ЧПУ. – М.: Машиностроение, 1986. – 176 с.

149. Шаталов, Д. Д. Обеспечение постоянства шероховатости фасонных поверхностей деталей при точении. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. - Тула, 2010. - 18 с.

150. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента. – М.: Мир, 1972. – 381 с.

151. Шишмарев, В.Ю. Надежность технических систем: учебник для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 304 с.
152. Шкурат, С.І. Дослідження впливу іонно–плазмової обробки поверхні жароміцних і жаростійких сплавів на адгезійну міцність покриттів. / С.І. Шкурат П.М. Полянський // Науково-теоретичний фаховий журнал "Вісник аграрної науки Причорномор'я" Миколаївського державного аграрного університету. - Миколаїв, 2007. Вип. 2 (41) - 2007. - 300 с.
153. Шнейдер, Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. - Л: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. - 243 с.
154. Шнейдер, Ю.Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. - Л.: Машиностроение, 1972.-240с.
155. Юркевич, В.В. Шероховатость поверхности детали после токарной обработки // СТИН. 2006. - №6. - С. 12-15.
156. Якухин, В.Г. Высокотехнологичные методы металлообработки: Учебник / Под ред. д.т.н. проф. О.В. Таратынова. – М.: МГИУ, 2011. – 362 с.
157. Ящерицын, П.И. Основы технологии механической обработки и сборки в машиностроении. - Минск: Высшая школа, 1974. - 608 с.
158. Dearnaley, G. Ion Implantation in Nonelectronic Materials // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - North-Holland: Amsterdam, 1987. - P. 506 -511.
159. Maan, A. T. «Effect of Multi-Coats of Cutting Tools on Surface Roughness in Machining AISI 1045 Steel. - Eng.&Tech. – 2008. - Vol.26. - P. 12.
161. Mikhaylov A., Mikhaylov V., Mikhaylova E. Special functionally - oriented vacuum covers of workpieces of mechanical engineering. / A .Mikhaylov, V. Mikhaylov, E Mikhaylova. // International Conference Advanced Manufacturing Technologies. – Bucharest: Politehnica – University of Bucharest, 2005. P. 166-170.
162. Multicriterion optimization of the cutting regimes in the conditions of changeability of the operating limitations / I. Petryaeva, T Ivchenko, A. Mikhailov // International Journal of Modern Manufacturing Technologies. – 2016. No. 1 Vol. VIII. – P. 75-79.



163. Research of Changeability of Cutting Process Parameters at turning of the Shaped Surfaces / T. Ivchenko, I. Petryaeva, R. Grubka // *Advanced Materials Research*. – 2014. Vol.1036. - P. 361-364.

164. Roger, H. P. Water based metalworking lubrication. // *Lubrication Engineering*. - 1999. - V.40. - №9. - P. 549 - 553.

165. Yusuf, S. Surface Roughness Prediction Model in Machining of Carbon Steel by PCD Coated Cutting Tools / Yusuf Sahin, A. Riza Motorcu // *American Journal of Applied Sciences*. – 2004. - Vol. 1(1). - P. 12-17.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1  
ПРОГРАММА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ТОЧЕНИИ  
ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ТОЧЕНИИ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

### Исходные данные

Обрабатываемый материал сталь 45     $\sigma := 750$      $\sigma_T := 350$      $\alpha_1 := 1.2 \cdot 10^{-5}$      $E := 2.1 \cdot 10^5$   
 Параметры инструмента     $\rho := 0.03$      $r := 1$      $\gamma := -7 \cdot \text{deg}$      $\alpha := 7 \cdot \text{deg}$      $\phi_1 := 30 \text{deg}$      $\phi := 90 \text{deg}$   
 Режимы резания     $t := 3$      $S_m := 0.2$      $v := 200$      $j := 20000$      $B := 20$      $H_m := 25$      $R_H := 6 \cdot 10^{-4}$

### Исследование влияния углов в плане на параметры шероховатости

Расчет температуры в зоне резания T1

$$p := 4.5 \quad m_1 := 0.75 \quad l_w := 0.50$$

$$T_1 := \frac{p}{10^3 \cdot \alpha_1 \cdot B \cdot H} \cdot \frac{\sigma}{10} \cdot (t \cdot S)^{m_1} \cdot v^l + 20$$

$$T_1 = 562.314$$

Расчет напряжений сдвига  $\tau$

$$a := 0.52 \quad b := -6.59 \quad c_m := 1.15$$

$$\tau := \frac{5000}{9.81 \cdot \left[ e^{a \cdot \frac{(T_1 + 273)}{100 + b}} + c \right]} \quad \tau = 4.82$$

$$b_2 := 0.5 \cdot \rho \cdot \left( 1 - 2 \cdot \frac{\tau}{\sigma_T} \right) \quad b_2 = 0.015$$

Расчет величины пластического отнесения

### Расчетные параметры шероховатости

$$Ra_1(\phi, \phi_1) := 200 \cdot \left[ \frac{b_2 \cdot (2 \cdot S + b_2)}{32 \cdot r} + R_H + \left( \frac{r}{\cos(\gamma)} - \frac{\sqrt{4 \cdot r^2 - S^2}}{2 \cdot \cos(\gamma)} \right) \right]$$

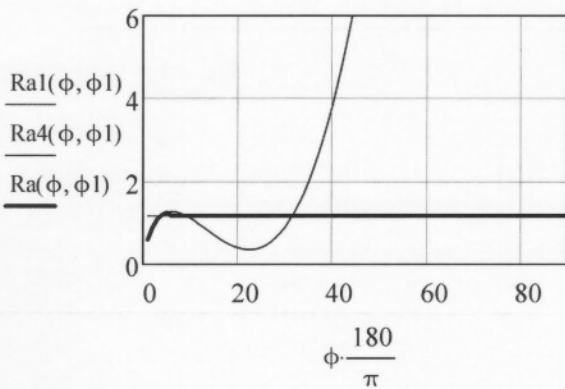
$$Ra_2(\phi, \phi_1) := 200 \cdot \left[ \frac{b_2}{\frac{1}{\tan(\phi_1)} + \frac{2r}{S}} + R_H + \frac{r}{\cos(\gamma)} \cdot (1 - \cos(\phi_1)) \dots \right. \\ \left. + \frac{\sin(\phi_1) \cdot [S \cdot \cos(\phi_1) - \sqrt{S \cdot \sin(\phi_1) \cdot (2r - S \cdot \sin(\phi_1))}]}{\cos(\gamma)} \right]$$

$$Ra_3(\phi, \phi_1) := 200 \cdot \left[ \frac{b_2}{\frac{1}{\tan(\phi)} + \frac{1}{\tan(\phi_1)}} + R_H + \frac{r}{\cos(\gamma)} \cdot (1 - \cos(\phi_1)) \dots \right. \\ \left. + \frac{\tan(\phi) \cdot \tan(\phi_1) \cdot [S - r \cdot (\sin(\phi) + \sin(\phi_1)) - r \cdot \tan(\phi) \cdot (\cos(\phi_1) - \cos(\phi))]}{\cos(\gamma) \cdot (\tan(\phi) + \tan(\phi_1))} \right]$$

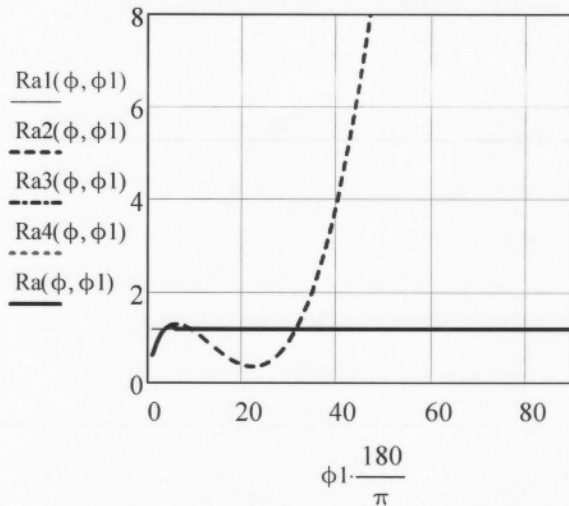
$$Ra_4(\phi, \phi_1) := 200 \cdot \left[ \frac{b_2}{\frac{1}{\tan(\phi)} + \frac{2r}{S}} + R_H + \frac{r}{\cos(\gamma)} \cdot (1 - \cos(\phi)) \dots \right. \\ \left. + \frac{\sin(\phi) \cdot [S \cdot \cos(\phi) - \sqrt{S \cdot \sin(\phi) \cdot (2r - S \cdot \sin(\phi))}]}{\cos(\gamma)} \right]$$

$$Ra(\phi, \phi_1) := \begin{cases} Ra1(\phi, \phi_1) & \text{if } \sin(\phi_1) \geq \frac{S}{2r} \leq \sin(\phi) \\ Ra2(\phi, \phi_1) & \text{if } \sin(\phi_1) < \frac{S}{2r} \leq \sin(\phi) \\ Ra3(\phi, \phi_1) & \text{if } \sin(\phi_1) \leq \frac{S}{2r} \geq \sin(\phi) \\ Ra4(\phi, \phi_1) & \text{if } \sin(\phi_1) \geq \frac{S}{2r} \geq \sin(\phi) \end{cases}$$

$\phi := 1 \text{ deg}, 2 \text{ deg} \dots 90 \text{ deg}$      $\phi_1 := 30 \text{ deg}$



$\phi_1 := 1 \text{ deg}, 2 \text{ deg} \dots 90 \text{ deg}$      $\phi := 90 \text{ deg}$



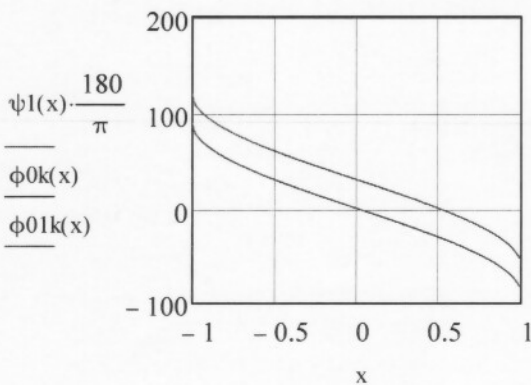
**Изменение кинематических углов в плане**

**Вогнутая поверхность**

$$\psi_1(x) := \text{asin}(-x)$$

$$\phi_{0k}(x) := (\phi - \psi_1(x)) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$\phi_{01k}(x) := (\phi_1 + \psi_1(x)) \cdot \frac{180}{\pi} \quad x := -1, -0.99 \dots 1$$



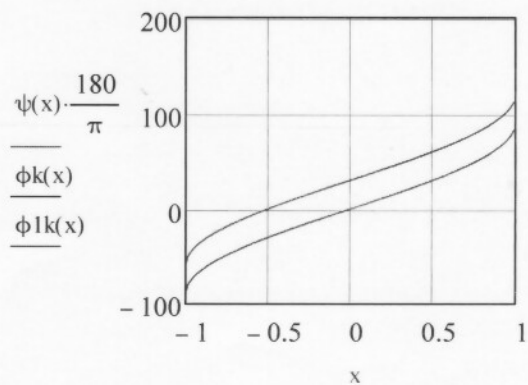
$\phi_1 := 30 \text{ deg}$

**Выпуклая поверхность**

$$\psi(x) := \text{asin}(x)$$

$$\phi_k(x) := (\phi - \psi(x)) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$\phi_{1k}(x) := (\phi_1 + \psi(x)) \cdot \frac{180}{\pi}$$



**Расчет параметров шероховатости с учетом переменности углов в плане**

## Выпуклая поверхность

$$\phi_k(x) := (\phi - \psi(x)) \quad \phi_{1k}(x) := (\phi + \psi(x)) \quad S := 0.4$$

$$\phi := 90\text{deg}$$

$$Ra1(x) := 200 \cdot \left[ \frac{b2 \cdot (2 \cdot S + b2)}{32 \cdot r} + R_{И} + \left( \frac{r}{\cos(\gamma)} - \frac{\sqrt{4 \cdot r^2 - S^2}}{2 \cdot \cos(\gamma)} \right) \right]$$

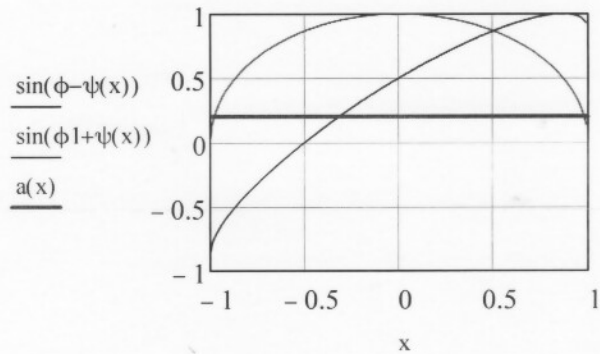
$$Ra2(x) := 0.92 \cdot 200 \cdot \left[ \frac{b2}{\frac{1}{\tan(\phi_1)} + \frac{2r}{S}} + R_{И} + \frac{r}{\cos(\gamma)} \cdot (1 - \cos(\phi_{1k}(x))) \dots \right. \\ \left. + \frac{\sin(\phi_{1k}(x)) \cdot [S \cdot \cos(\phi_{1k}(x)) - \sqrt{S \cdot \sin(\phi_{1k}(x)) \cdot (2r - S \cdot \sin(\phi_{1k}(x)))}]}{\cos(\gamma)} \right]$$

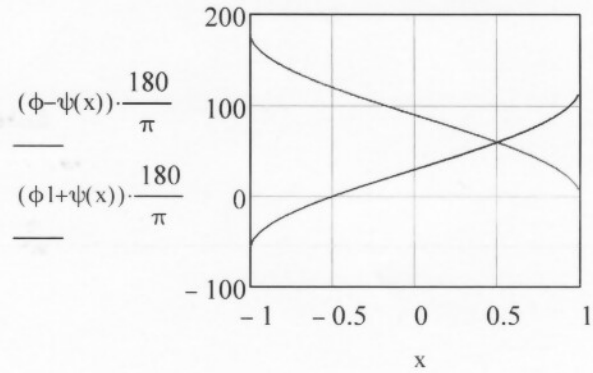
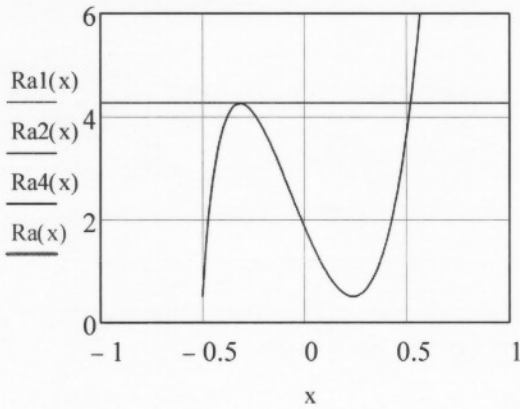
$$Ra3(x) := 200 \cdot \left[ \frac{b2}{\frac{1}{\tan(\phi_k(x))} + \frac{1}{\tan(\phi_{1k}(x))}} + R_{И} + \frac{r}{\cos(\gamma)} \cdot (1 - \cos(\phi_{1k}(x))) \dots \right. \\ \left. + \frac{\tan(\phi_k(x)) \cdot \tan(\phi_{1k}(x)) \cdot [S - r \cdot (\sin(\phi_k(x)) + \sin(\phi_{1k}(x))) - r \cdot \tan(\phi_k(x)) \cdot (\cos(\phi_{1k}(x)) - \cos(\phi_k(x)))]}{\cos(\gamma) \cdot (\tan(\phi_k(x)) + \tan(\phi_{1k}(x)))} \right]$$

$$Ra4(x) := 200 \cdot \left[ \frac{b2}{\frac{1}{\tan(\phi_k(x))} + \frac{2r}{S}} + R_{И} + \frac{r}{\cos(\gamma)} \cdot (1 - \cos(\phi_k(x))) \dots \right. \\ \left. + \frac{\sin(\phi_k(x)) \cdot [S \cdot \cos(\phi_k(x)) - \sqrt{S \cdot \sin(\phi_k(x)) \cdot (2r - S \cdot \sin(\phi_k(x)))}]}{\cos(\gamma)} \right]$$

$$a(x) := \frac{0.4}{2r}$$

$$Ra(x) := \begin{cases} Ra1(x) & \text{if } \sin(\phi_{1k}(x)) \geq \frac{S}{2r} \leq \sin(\phi_k(x)) \\ Ra2(x) & \text{if } \sin(\phi_{1k}(x)) \leq \frac{S}{2r} \leq \sin(\phi_k(x)) \\ Ra3(x) & \text{if } \sin(\phi_{1k}(x)) \leq \frac{S}{2r} \geq \sin(\phi_k(x)) \\ Ra4(x) & \text{if } \sin(\phi_{1k}(x)) \geq \frac{S}{2r} \geq \sin(\phi_k(x)) \end{cases}$$





Вогнутая поверхность  $\phi_{0k}(x) := (\phi - \psi_1(x))$   $\phi_{01k}(x) := (\phi_1 + \psi_1(x))$   $S := 0.4$

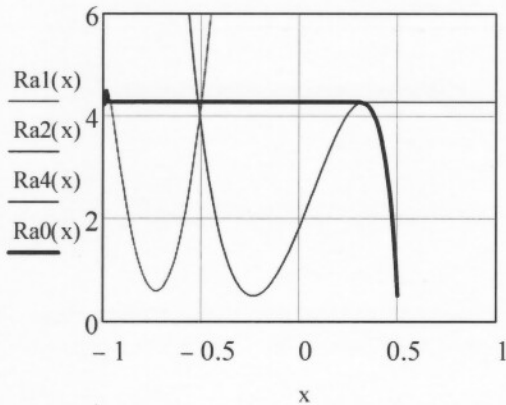
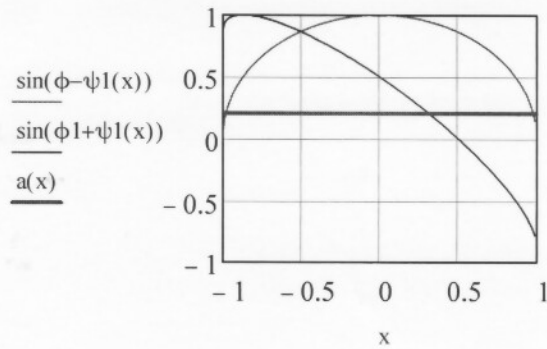
$$\underline{Ra1}(x) := 200 \cdot \left[ \frac{b2 \cdot (2 \cdot S + b2)}{32 \cdot r} + R_{И} + \left( \frac{r}{\cos(\gamma)} - \frac{\sqrt{4 \cdot r^2 - S^2}}{2 \cdot \cos(\gamma)} \right) \right]$$

$$\underline{Ra2}(x) := 0.92 \cdot 200 \cdot \left[ \frac{b2}{\frac{1}{\tan(\phi_1)} + \frac{2r}{S}} + R_{И} + \frac{r}{\cos(\gamma)} \cdot (1 - \cos(\phi_{01k}(x))) \dots \right. \\ \left. + \frac{\sin(\phi_{01k}(x)) \cdot [S \cdot \cos(\phi_{01k}(x)) - \sqrt{S \cdot \sin(\phi_{01k}(x)) \cdot (2r - S \cdot \sin(\phi_{01k}(x)))}]}{\cos(\gamma)} \right]$$

$$\underline{Ra3}(x) := 200 \cdot \left[ \frac{b2}{\frac{1}{\tan(\phi_{0k}(x))} + \frac{1}{\tan(\phi_{01k}(x))}} + R_{И} + \frac{r}{\cos(\gamma)} \cdot (1 - \cos(\phi_{01k}(x))) \dots \right. \\ \left. + \frac{\tan(\phi_{0k}(x)) \cdot \tan(\phi_{01k}(x)) \cdot [S - r \cdot (\sin(\phi_{0k}(x)) + \sin(\phi_{01k}(x))) - r \cdot \tan(\phi_{0k}(x)) \cdot (\cos(\phi_{01k}(x)) - \cos(\phi_{0k}(x)))]}{\cos(\gamma) \cdot (\tan(\phi_{0k}(x)) + \tan(\phi_{01k}(x)))} \right]$$

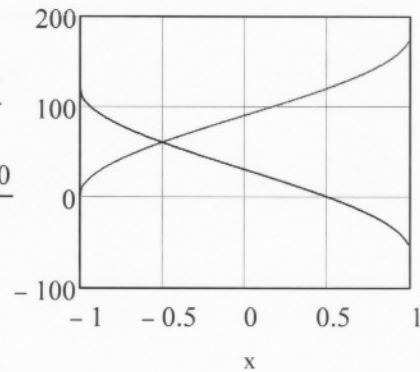
$$\underline{Ra4}(x) := 200 \cdot \left[ \frac{b2}{\frac{1}{\tan(\phi_{0k}(x))} + \frac{2r}{S}} + R_{И} + \frac{r}{\cos(\gamma)} \cdot (1 - \cos(\phi_{0k}(x))) \dots \right. \\ \left. + \frac{\sin(\phi_{0k}(x)) \cdot [S \cdot \cos(\phi_{0k}(x)) - \sqrt{S \cdot \sin(\phi_{0k}(x)) \cdot (2r - S \cdot \sin(\phi_{0k}(x)))}]}{\cos(\gamma)} \right]$$

$$Ra_0(x) := \begin{cases} Ra_1(x) & \text{if } \sin(\phi_{01k}(x)) \geq \frac{S}{2r} \leq \sin(\phi_{0k}(x)) \\ Ra_2(x) & \text{if } \sin(\phi_{01k}(x)) \leq \frac{S}{2r} \leq \sin(\phi_{0k}(x)) \\ Ra_3(x) & \text{if } \sin(\phi_{01k}(x)) \leq \frac{S}{2r} \geq \sin(\phi_{0k}(x)) \\ Ra_4(x) & \text{if } \sin(\phi_{01k}(x)) \geq \frac{S}{2r} \geq \sin(\phi_{0k}(x)) \end{cases}$$



$$\frac{(\phi - \psi_1(x)) \cdot 180}{\pi}$$

$$\frac{(\phi_1 + \psi_1(x)) \cdot 180}{\pi}$$



Выпуклая поверхность

$$\phi_k(x) := (\phi - \psi(x))$$

$$\phi_{1k}(x) := (\phi_1 + \psi(x))$$

$$S(x) := \frac{S}{\sin(\phi - a \sin(x))}$$

$$Ra_1(x) := 200 \cdot \left[ \frac{b_2 \cdot (2 \cdot S(x) + b_2)}{32 \cdot r} + R_H + \left( \frac{r}{\cos(\gamma)} - \frac{\sqrt{4 \cdot r^2 - S(x)^2}}{2 \cdot \cos(\gamma)} \right) \right]$$

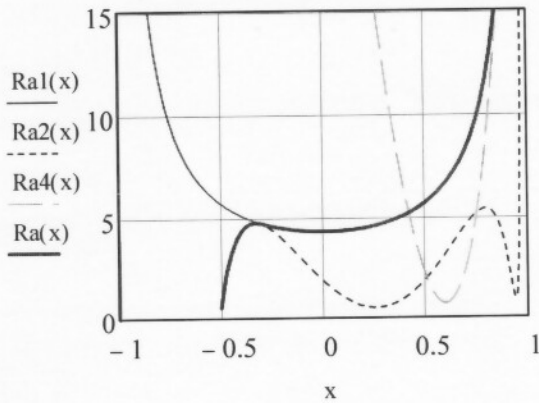
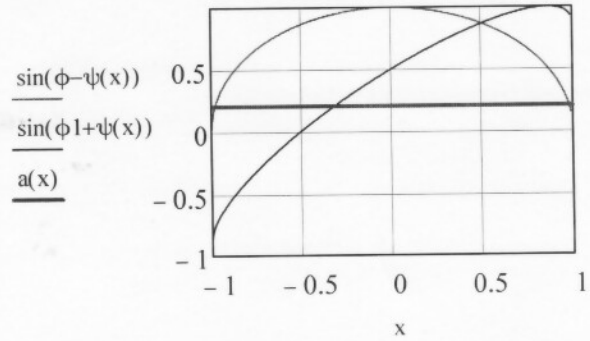
$$Ra_2(x) := 0.92 \cdot 200 \cdot \left[ \frac{b_2}{\frac{1}{\tan(\phi_1)} + \frac{2r}{S(x)}} + R_H + \frac{r}{\cos(\gamma)} \cdot (1 - \cos(\phi_{1k}(x))) \dots \right. \\ \left. + \frac{\sin(\phi_{1k}(x)) \cdot [S(x) \cdot \cos(\phi_{1k}(x)) - \sqrt{S(x) \cdot \sin(\phi_{1k}(x)) \cdot (2r - S(x) \cdot \sin(\phi_{1k}(x)))}]}{\cos(\gamma)} \right]$$

$$Ra_3(x) := 200 \cdot \left[ \frac{b_2}{\frac{1}{\tan(\phi_k(x))} + \frac{1}{\tan(\phi_{1k}(x))}} + R_H + \frac{r}{\cos(\gamma)} \cdot (1 - \cos(\phi_{1k}(x))) \dots \right. \\ \left. + \frac{\tan(\phi_k(x)) \cdot \tan(\phi_{1k}(x)) \cdot [S(x) - r \cdot (\sin(\phi_k(x)) + \sin(\phi_{1k}(x))) - r \cdot \tan(\phi_k(x)) \cdot (\cos(\phi_{1k}(x)) - \cos(\phi_k(x)))]}{\cos(\gamma) \cdot (\tan(\phi_k(x)) + \tan(\phi_{1k}(x)))} \right]$$

$$Ra_4(x) := 200 \cdot \left[ \frac{b_2}{\frac{1}{\tan(\phi_k(x))} + \frac{2r}{S(x)}} + R_H + \frac{r}{\cos(\gamma)} \cdot (1 - \cos(\phi_k(x))) \dots \right. \\ \left. + \frac{\sin(\phi_k(x)) \cdot [S(x) \cdot \cos(\phi_k(x)) - \sqrt{S(x) \cdot \sin(\phi_k(x)) \cdot (2r - S(x) \cdot \sin(\phi_k(x)))}]}{\cos(\gamma)} \right]$$



$$\begin{aligned} \text{Ra}(x) := & \begin{cases} \text{Ra1}(x) & \text{if } \sin(\phi_{1k}(x)) \geq \frac{S(x)}{2r} \leq \sin(\phi_k(x)) \\ \text{Ra2}(x) & \text{if } \sin(\phi_{1k}(x)) \leq \frac{S(x)}{2r} \leq \sin(\phi_k(x)) \\ \text{Ra3}(x) & \text{if } \sin(\phi_{1k}(x)) \leq \frac{S(x)}{2r} \geq \sin(\phi_k(x)) \\ \text{Ra4}(x) & \text{if } \sin(\phi_{1k}(x)) \geq \frac{S(x)}{2r} \geq \sin(\phi_k(x)) \end{cases} \end{aligned}$$



Вогнутая поверхность

$$\phi_{k(x)} := (\phi - \psi(-x))$$

$$\phi_{1k(x)} := (\phi_1 + \psi(-x))$$

$$\text{Ra1}(x) := 200 \cdot \left[ \frac{b_2 \cdot (2 \cdot S(x) + b_2)}{32 \cdot r} + R_{\text{И}} + \left( \frac{r}{\cos(\gamma)} - \frac{\sqrt{4 \cdot r^2 - S(x)^2}}{2 \cdot \cos(\gamma)} \right) \right]$$

$$\text{Ra2}(x) := 0.92 \cdot 200 \cdot \left[ \frac{b_2}{\frac{1}{\tan(\phi_1)} + \frac{2r}{S(x)}} + R_{\text{И}} + \frac{r}{\cos(\gamma)} \cdot (1 - \cos(\phi_{1k}(x))) \dots \right. \\ \left. + \frac{\sin(\phi_{1k}(x)) \cdot [S(x) \cdot \cos(\phi_{1k}(x)) - \sqrt{S(x) \cdot \sin(\phi_{1k}(x)) \cdot (2r - S(x) \cdot \sin(\phi_{1k}(x)))}]}{\cos(\gamma)} \right]$$

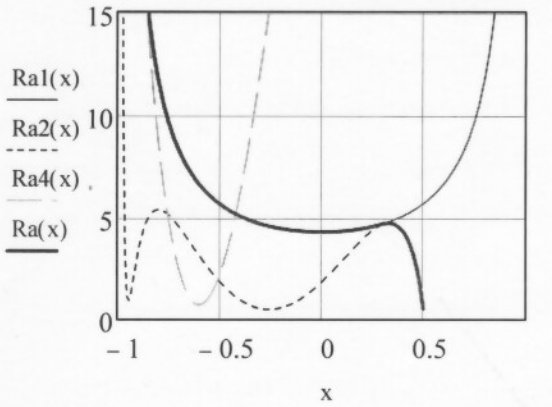
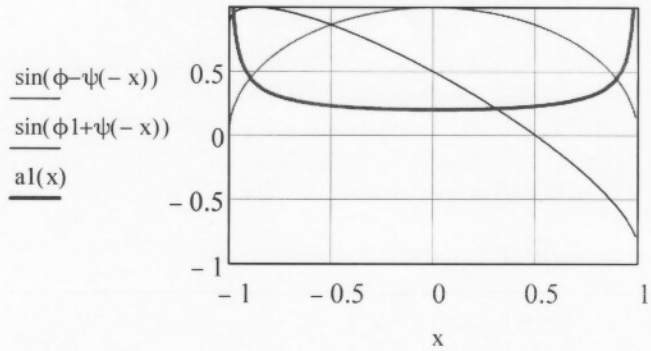
$$\text{Ra3}(x) := 200 \cdot \left[ \frac{b_2}{\frac{1}{\tan(\phi_k(x))} + \frac{1}{\tan(\phi_{1k}(x))}} + R_{\text{И}} + \frac{r}{\cos(\gamma)} \cdot (1 - \cos(\phi_{1k}(x))) \dots \right. \\ \left. + \frac{\tan(\phi_k(x)) \cdot \tan(\phi_{1k}(x)) \cdot [S(x) - r \cdot (\sin(\phi_k(x)) + \sin(\phi_{1k}(x))) - r \cdot \tan(\phi_k(x)) \cdot (\cos(\phi_{1k}(x)) - \cos(\phi_k(x)))]}{\cos(\gamma) \cdot (\tan(\phi_k(x)) + \tan(\phi_{1k}(x)))} \right]$$



$$Ra4(x) := 200 \cdot \left[ \frac{b2}{\tan(\phi k(x)) + \frac{S(x)}{2r}} + R_{II} + \frac{r}{\cos(\gamma)} \cdot (1 - \cos(\phi k(x))) \dots \right. \\ \left. + \frac{\sin(\phi k(x)) \cdot [S(x) \cdot \cos(\phi k(x)) - \sqrt{S(x) \cdot \sin(\phi k(x)) \cdot (2r - S(x) \cdot \sin(\phi k(x)))}]}{\cos(\gamma)} \right]$$

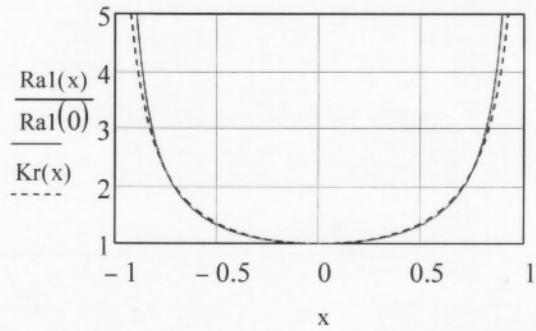
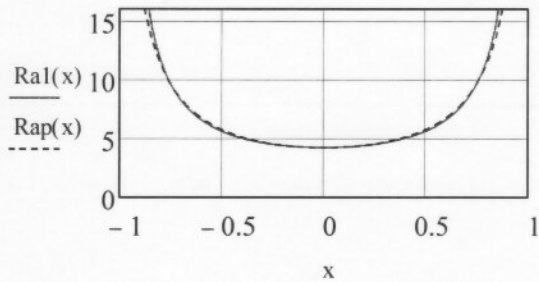
$$a1(x) := \frac{0.4}{2r} \frac{\sin(\phi - \text{asin}(-x))}{\sin(\phi + \text{asin}(-x))}$$

$$Ra(x) := \begin{cases} Ra1(x) & \text{if } \sin(\phi k(x)) \geq \frac{S(x)}{2r} \leq \sin(\phi k(x)) \\ Ra2(x) & \text{if } \sin(\phi k(x)) \leq \frac{S(x)}{2r} \leq \sin(\phi k(x)) \\ Ra3(x) & \text{if } \sin(\phi k(x)) \leq \frac{S(x)}{2r} \geq \sin(\phi k(x)) \\ Ra4(x) & \text{if } \sin(\phi k(x)) \geq \frac{S(x)}{2r} \geq \sin(\phi k(x)) \end{cases}$$



$$x_0 := 0.75 \quad b_{\text{max}} := \left( \frac{1}{x_0} \right) \cdot \text{acos} \left( \frac{Ra1(0)}{Ra1(x_0)} \right)$$

$$Kr(x) := (\cos(b \cdot x))^{-1} \quad Rap(x) := \frac{Ra1(0)}{\cos(b \cdot x)}$$



## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ПРОГРАММА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ  
РЕЗАНИЯ ПРИ ЧИСТОВОМ ТОЧЕНИИ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В  
УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОСТИ ДЕЙСТВУЮЩИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

# МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ЧИСТОВОМ ТОЧЕНИИ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОСТИ ДЕЙСТВУЮЩИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

## Исходные данные:

Обрабатываемый материал сталь 45  $\sigma := 750$   $d := 100$   $\sigma_T := 350$   $\alpha_1 := 1.2 \cdot 10^{-5}$   $E := 2.1 \cdot 10^5$   
 Параметры инструмента  $\rho := 0.03$   $r := 1$   $\gamma := -7 \cdot \text{deg}$   $\alpha := 7 \cdot \text{deg}$   $\phi_1 := 35 \text{deg}$   $\phi := 90 \text{deg}$   
 $\lambda_u := 27.2$   $\lambda_d := 40.2$   $\omega_u := 0.100 \cdot 10^{-4}$   $\omega_d := 0.080 \cdot 10^{-4}$   $B := 20$   $H_{\text{вн}} := 25$   $R_{\text{н}} := 6 \cdot 10^{-4}$   
 Параметры обработки  $h := 0.15$   $\mu := 1$   $j := 20000$

## 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

### 1.1 Расчет параметров шероховатости по теоретическим зависимостям

$p := 4.5$   $m_1 := 0.75$   $\lambda := 0.50$   $v := 100$   $t_1 := 1$   $a_T := 0.52$   $b := -6.59$   $\xi := 1.15$

$$T(S,r) := \frac{p}{10^3 \cdot \alpha_1 \cdot B \cdot H} \cdot \frac{\sigma}{10} \cdot (t_1 \cdot S)^{m_1} \cdot v^1 + 20$$

$$\tau(S,r) := \frac{500}{9.81 \cdot \left[ e^{\frac{a_T \cdot (2T(S,r)+273)}{100+b}} + c \right]}$$

$$b(S,r) := 0.5 \cdot \rho \cdot \left( 1 - 2 \cdot \frac{\tau(S,r)}{\sigma_T} \right)$$

$$Ra(S,r) := 200 \cdot \left[ \frac{b(S,r) \cdot (2 \cdot S + b(S,r))}{32 \cdot r} + R_{\text{н}} + \left( \frac{r}{\cos(\gamma)} - \frac{\sqrt{4 \cdot r^2 - S^2}}{2 \cdot \cos(\gamma)} \right) \right]$$

### Установление множественной регрессионной зависимости

$Z1_0 := Ra(0.1, 3)$   $Z1_4 := Ra(0.1, 1)$   $Z1_8 := Ra(0.1, 2)$   $Z1_{12} := Ra(0.1, 0.5)$   
 $Z1_1 := Ra(0.2, 3)$   $Z1_5 := Ra(0.2, 1)$   $Z1_9 := Ra(0.2, 2)$   $Z1_{13} := Ra(0.4, 0.5)$   
 $Z1_2 := Ra(0.3, 3)$   $Z1_6 := Ra(0.3, 1)$   $Z1_{10} := Ra(0.3, 2)$   
 $Z1_3 := Ra(0.4, 3)$   $Z1_7 := Ra(0.4, 1)$   $Z1_{11} := Ra(0.4, 2)$   $i := 0..13$

$X1_i := Y1_i := Z1_i =$   $X_i := \ln(X1_i)$   $Y_i := \ln(Y1_i)$   $Z_i := \ln(Z1_i)$

0.1	3	0.211
0.2	3	0.469
0.3	3	0.895
0.4	3	1.49
0.1	1	0.392
0.2	1	1.169
0.3	1	2.457
0.4	1	4.267
0.1	2	0.256
0.2	2	0.643
0.3	2	1.284
0.4	2	2.178
0.1	0.5	0.665
0.4	0.5	8.684

$X_i =$	$Y_i =$	$Z_i =$
-2.303	1.099	-1.558
-1.609	1.099	-0.758
-1.204	1.099	-0.111
-0.916	1.099	0.399
-2.303	0	-0.937
-1.609	0	0.156
-1.204	0	0.899
-0.916	0	1.451
-2.303	0.693	-1.363
-1.609	0.693	-0.441
-1.204	0.693	0.25
-0.916	0.693	0.778
-2.303	-0.693	-0.408
-0.916	-0.693	2.161

**Регрессионный анализ**  
 $M := \text{augment}(X, Y)$   $n := 1$   
 $R := \text{regress}(M, Z, n)$

$$R = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 1 \\ 1.618 \\ -0.856 \\ 2.854 \end{pmatrix}$$

$CR := e^{R_5}$   $CR = 17.352$   
 $\lambda_{\text{вн}} := R_3$   $yr = 1.618$

## 1.2 Расчет температуры резания по теоретическим зависимостям

Толщина и ширина среза, мм

$$a(v, s, t) := s \cdot \sin((\phi - \text{asin}(t))) \quad b(v, s, t) := \frac{t \cdot l}{\sin((\phi - \text{asin}(t)))} \quad t := 0$$

- безразмерная координата

Коэффициент усадки стружки

$$k(v, s, t) := 14.3 \cdot v^{-0.36} \cdot \left( \frac{s}{\sin(\phi - \text{asin}(t))} \right)^{-0.134}$$

Длина контакта стружки с передней поверхностью

$$l(v, s, t) := 2 \cdot s \cdot [k(v, s, t) \cdot (1 - \tan(\gamma)) + \sec(\gamma)]$$

Тангенциальная, радиальная и осевая составляющие силы резания, Н

$$P_z(v, s, t) := 1.1 \cdot \left( \frac{\sigma}{750} \right)^{0.75} \cdot 3000 \cdot t \cdot l \cdot s^{0.75} \cdot v^{-0.15}$$

Силы трения на передней и задней поверхностях резца, Н

$$P_y(v, s, t) := P_z(v, s, t) \cdot 0.5 \quad P_x(v, s, t) := P_z(v, s, t) \cdot 0.25 \quad N(v, s, t) := 0.252 \cdot \sigma \cdot b(v, s, t) \cdot h$$

$$P_n(v, s, t) := \sqrt{P_y(v, s, t)^2 + P_x(v, s, t)^2} \quad F(v, s, t) := 0.252 \cdot \sigma \cdot b(v, s, t) \cdot h \cdot \mu$$

Интенсивность теплового потока от сил трения на надрезочной стороне стружки, Вт/м<sup>2</sup>

$$q_{1T}(v, s, t) := 2 \cdot 1.5 \cdot v \cdot \frac{[(P_z(v, s, t) - F(v, s, t)) \cdot \sin(\gamma) + (P_n(v, s, t) - N(v, s, t)) \cdot \cos(\gamma)] \cdot 10^6}{60 \cdot b(v, s, t) \cdot l(v, s, t) \cdot k(v, s, t)}$$

Интенсивность теплового потока от сил трения на задней поверхности резца, Вт/м<sup>2</sup>

$$q_{2T}(v, s, t) := \frac{2\sqrt{3} \cdot F(v, s, t) \cdot v \cdot 10^6}{\sqrt{\pi} \cdot b(v, s, t) \cdot l(v, s, t) \cdot 60} \quad \Psi(v, s, t) := \text{asin} \left( \frac{\cos(\gamma)}{\sqrt{k(v, s, t)^2 - 2 \cdot k(v, s, t) \cdot \sin(\gamma) + 1}} \right)$$

Угол сдвига

Интенсивность теплового потока по плоскости скалывания

$$q_d(v, s, t) := \frac{1.66 \cdot 10^4 \cdot v \cdot \sin(\Psi(v, s, t))}{a(v, s, t) \cdot b(v, s, t) \cdot k(v, s, t)} \cdot [(P_z(v, s, t) - F(v, s, t)) \cdot (k(v, s, t) - \sin(\gamma)) - [(P_n(v, s, t) - F(v, s, t)) \cos(\gamma)]]$$

Критерий Пекле

$$Pe_0(v, s, t) := \frac{v \cdot a(v, s, t) \cdot 10^{-3}}{60 \cdot \sin(\Psi(v, s, t)) \cdot \omega d}$$

Доля теплоты деформации в стружке

$$bl(v, s, t) := \frac{1}{1 + \frac{1.5 \cdot k(v, s, t)}{\sqrt{Pe_0(v, s, t)}}}$$

Температура деформации, °С

$$\Theta_d(v, s, t) := \frac{60 \cdot \omega d \cdot k(v, s, t) \cdot bl(v, s, t) \cdot q_d(v, s, t)}{\lambda d \cdot v}$$

Коэффициент, учитывающий подогрев поверхностных слоев материала, из которых образуется стружка

$$\phi_0(v, s, t) := 1.33 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{v \cdot a(v, s, t)^2}{\omega d \cdot d}$$

Критерий Пекле

$$g(v, s, t) := \begin{cases} 0.23 \cdot e^{-40 \cdot (0.15 - \phi_0(v, s, t))} & \text{if } 0.001 < \phi_0(v, s, t) \leq 0.15 \\ 0.23 \cdot e^{-3.5 \cdot (\phi_0(v, s, t) - 0.15)} & \text{if } 0.15 < \phi_0(v, s, t) \leq 2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Pe(v, s, t) := \frac{v \cdot l(v, s, t) \cdot 10^{-3}}{60 \cdot \omega d}$$

Безразмерный критерий

$$\chi(v, s, t) := \left( \frac{k(v, s, t) \cdot a(v, s, t)}{l(v, s, t)} \right)^2 \cdot Pe(v, s, t)$$

Функция, отображающая закон распределения температур, вызванных теплотой деформации

$$\zeta(v, s, t) := \frac{h}{2 \cdot a(v, s, t)} \cdot \tan(\Psi(v, s, t))$$

Коэффициент формы источника

$$Tu(v, s, t) := \sqrt{1 + \zeta(v, s, t)} - \sqrt{\zeta(v, s, t)}$$

$$Lc(v, s, t) := \begin{cases} \frac{1.066}{\chi(v, s, t)^{0.35}} & \text{if } 0.1 < \chi(v, s, t) \leq 1.2 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Безразмерные величины, характеризующие форму контактных площадок на передней и задней поверхностях лезвия

$$\eta_1(v, s, t) := \frac{b(v, s, t)}{l(v, s, t)} \quad \eta_2(v, s, t) := \frac{b(v, s, t)}{h} \quad \text{Угол клина, град.}$$

$$\beta := 90$$

Безразмерные функции

$$M1(v, s, t) := \begin{cases} \left(4.88 + 2.64 \cdot \eta_1(v, s, t)^{0.5} \cdot \log(\eta_1(v, s, t))\right) \cdot \beta^{-0.85} & \text{if } \eta_1(v, s, t) \geq 1 \\ \left(4.88 + 3.92 \cdot \eta_1(v, s, t)^{0.27} \cdot \log(\eta_1(v, s, t))\right) \cdot \beta^{-0.85} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M2(v, s, t) := \begin{cases} \left(4.88 + 2.64 \cdot \eta_2(v, s, t)^{0.5} \cdot \log(\eta_2(v, s, t))\right) \cdot \beta^{-0.85} & \text{if } \eta_2(v, s, t) \geq 1 \\ \left(4.88 + 3.92 \cdot \eta_2(v, s, t)^{0.27} \cdot \log(\eta_2(v, s, t))\right) \cdot \beta^{-0.85} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$G1(v, s, t) := \begin{cases} 0.04 + 0.02 \cdot \eta_1(v, s, t)^{0.6} \cdot \log(\eta_1(v, s, t)) & \text{if } \eta_1(v, s, t) \geq 1 \\ 0.04 + 0.028 \cdot \eta_1(v, s, t)^{0.22} \cdot \log(\eta_1(v, s, t)) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$G2(v, s, t) := \begin{cases} 0.04 + 0.02 \cdot \eta_2(v, s, t)^{0.6} \cdot \log(\eta_2(v, s, t)) & \text{if } \eta_2(v, s, t) \geq 1 \\ 0.04 + 0.028 \cdot \eta_2(v, s, t)^{0.22} \cdot \log(\eta_2(v, s, t)) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$B1(v, s, t) := 2.85 - 0.89 \left(\frac{h}{l(v, s, t)}\right) \quad B2(v, s, t) := 2.05 \left(\frac{h}{l(v, s, t)}\right)^{0.54}$$

$$N1(v, s, t) := G1(v, s, t) \cdot B1(v, s, t) \quad N2(v, s, t) := G2(v, s, t) \cdot B2(v, s, t)$$

$$k_c := \frac{4 \cdot 0.77}{3 \cdot \sqrt{\pi}} \quad k_d := \frac{4 \cdot 0.55}{3 \cdot \sqrt{\pi}}$$

Тепловые потоки на передней и задней поверхностях

$$J(v, s, t) := (1 + c(v, s, t)) \cdot \frac{60 \cdot \omega d \cdot k(v, s, t) \cdot b l(v, s, t) \cdot q d(v, s, t)}{\lambda d \cdot v} + \frac{k_c \sqrt{\omega d}}{\lambda d} \cdot \sqrt{k(v, s, t) \cdot \frac{l(v, s, t) \cdot 60 \cdot 10^{-3}}{v}} \cdot q_1 \tau(v, s, t)$$

$$I(v, s, t) := 1.3 \cdot \frac{k_c \sqrt{\omega d}}{\lambda d} \cdot \sqrt{k(v, s, t) \cdot \frac{l(v, s, t) \cdot 60 \cdot 10^{-3}}{v}} + \frac{M1(v, s, t) \cdot l(v, s, t) \cdot 10^{-3}}{\lambda u}$$

$$x(v, s, t) := \frac{\left[ \begin{aligned} & (1 + c(v, s, t)) \cdot \frac{60 \cdot \omega d \cdot k(v, s, t) \cdot b l(v, s, t) \cdot q d(v, s, t)}{\lambda d \cdot v} \cdot T_u(v, s, t) + \frac{k_d \sqrt{\omega d \cdot h \cdot 60 \cdot 10^{-3}}}{\lambda d \cdot \sqrt{v}} \cdot q_2 \tau(v, s, t) \dots \\ & + (-1.82) \cdot \frac{k_d \sqrt{\omega d \cdot h \cdot 60 \cdot 10^{-3}}}{\lambda d \cdot \sqrt{v}} \cdot \frac{J(v, s, t) \cdot \lambda u}{N2(v, s, t) \cdot h \cdot 10^{-3}} - M2(v, s, t) \cdot \frac{J(v, s, t)}{N2(v, s, t)} \end{aligned} \right]}{\left( 1.82 \cdot \frac{k_d \sqrt{\omega d \cdot h \cdot 60 \cdot 10^{-3}}}{\lambda d \cdot \sqrt{v}} \cdot \frac{I(v, s, t) \cdot \lambda u}{N2(v, s, t) \cdot h \cdot 10^{-3}} + M2(v, s, t) \cdot \frac{I(v, s, t)}{N2(v, s, t)} - \frac{N1(v, s, t) \cdot l(v, s, t) \cdot 10^{-3}}{\lambda u} \right)}$$

$$y(v, s, t) := \frac{(J(v, s, t) - I(v, s, t) \cdot x(v, s, t)) \cdot \lambda u}{N2(v, s, t) \cdot h \cdot 10^{-3}} \quad \text{Температуры на передней и задней поверхностях}$$

$$\Theta 1(v, s, t) := M1(v, s, t) \cdot x(v, s, t) \cdot l(v, s, t) \cdot \frac{10^{-3}}{\lambda u} + N2(v, s, t) \cdot y(v, s, t) \cdot h \cdot \frac{10^{-3}}{\lambda u}$$

$$\Theta 2(v, s, t) := \left( M2(v, s, t) \cdot y(v, s, t) \cdot h \cdot \frac{10^{-3}}{\lambda u} + N1(v, s, t) \cdot x(v, s, t) \cdot l(v, s, t) \cdot \frac{10^{-3}}{\lambda u} \right)$$



Температура резания  $\Theta(v,s,t) := \frac{\Theta_1(v,s,t) \cdot l(v,s,t) + \Theta_2(v,s,t) \cdot h}{l(v,s,t) + h}$

**Установление множественной регрессионной зависимости температуры резания от скорости резания и подачи**

$Z1_0 := \Theta(100, 0.1, t)$      $Z1_4 := \Theta(100, 0.3, t)$      $Z1_8 := \Theta(100, 0.2, t)$      $Z1_{12} := \Theta(60, 0.5, t)$   
 $Z1_1 := \Theta(150, 0.1, t)$      $Z1_5 := \Theta(150, 0.3, t)$      $Z1_9 := \Theta(150, 0.2, t)$      $Z1_{13} := \Theta(300, 0.5, t)$   
 $Z1_2 := \Theta(200, 0.1, t)$      $Z1_6 := \Theta(200, 0.3, t)$      $Z1_{10} := \Theta(200, 0.2, t)$   
 $Z1_3 := \Theta(250, 0.1, t)$      $Z1_7 := \Theta(250, 0.3, t)$      $Z1_{11} := \Theta(250, 0.2, t)$      $i := 0..13$

$X1_i := Y1_i := Z1_i =$

100	0.1	305.894
150	0.1	372.394
200	0.1	426.201
250	0.1	472.828
100	0.3	449.77
150	0.3	564.736
200	0.3	664.538
250	0.3	754.835
100	0.2	390.544
150	0.2	485.532
200	0.2	566.407
250	0.2	638.669
60	0.5	400.325
300	0.5	1.05 · 10 <sup>3</sup>

$X_i := \ln(X1_i)$      $Y_i := \ln(Y1_i)$      $Z_i := \ln(Z1_i)$

$X_i =$	$Y_i =$	$Z_i =$
4.605	-2.303	5.723
5.011	-2.303	5.92
5.298	-2.303	6.055
5.521	-2.303	6.159
4.605	-1.204	6.109
5.011	-1.204	6.336
5.298	-1.204	6.499
5.521	-1.204	6.626
4.605	-1.609	5.968
5.011	-1.609	6.185
5.298	-1.609	6.339
5.521	-1.609	6.459
4.094	-0.693	5.992
5.704	-0.693	6.957

$n := 1$   
Регрессионный анализ

$M := \text{augment}(X, Y)$

$R_{ww} := \text{regress}(M, Z, n)$

$R = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 1 \\ 0.561 \\ 0.39 \\ 3.997 \end{pmatrix}$

$a_0 := e^{R_5} \quad a_0 = 54.451$

**Определение ошибки**

$Z11_0 := \Theta(100, 0.1, t)$      $Z11_4 := \Theta(100, 0.3, t)$      $Z11_8 := \Theta(100, 0.2, t)$      $Z11_{12} := \Theta(60, 0.5, t)$   
 $Z11_1 := \Theta(150, 0.1, t)$      $Z11_5 := \Theta(150, 0.3, t)$      $Z11_9 := \Theta(150, 0.2, t)$      $Z11_{13} := \Theta(300, 0.5, t)$   
 $Z11_2 := \Theta(200, 0.1, t)$      $Z11_6 := \Theta(200, 0.3, t)$      $Z11_{10} := \Theta(200, 0.2, t)$   
 $Z11_3 := \Theta(250, 0.1, t)$      $Z11_7 := \Theta(250, 0.3, t)$      $Z11_{11} := \Theta(250, 0.2, t)$      $P := Z1 - Z11$

$P1_i := P_i \cdot \frac{1}{Z1_i}$

$\max(P1_0, P1_1, P1_2, P1_3, P1_4, P1_5, P1_6, P1_7, P1_8, P1_9, P1_{10}, P1_{11}, P1_{12}, P1_{13}) = -7.812 \times 10^{-3}$

**2. РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ**

$Ra := 2.5$      $\Theta := 800$      $a := 5$      $tc := 5$      $au := 100$

$so := \left( \frac{CR}{Ra} \right)^{\frac{-1}{yr}}$

$so = 0.302$

**2.1 Расчет оптимальной подачи**

## 2.2 Расчет оптимальных скоростей резания по различным критериям

сталь 45  $K_v := 1$   $C_v := 420$   $m := 0.2$   $y_v := 0.2$   $x_v := 0.15$

$$k_v := \frac{1}{m} - 1 \quad k_s := \frac{y_v}{m} - 1 \quad C_t := 54 \quad x_t := 0.2 \quad y_t := 0.42 \quad n_t := 0.55$$

### 2.2.1 Расчет оптимальной по производительности скорости резания

$$K_{\Theta p} := \left[ \frac{\Theta}{C_t \cdot \left( \frac{C_v \cdot K_v}{20^m \cdot t_l^{x_v}} \right)^{n_t} \cdot \left( \frac{CR}{Ra} \right)^{y_r} \cdot t_l^{x_t}} \right] \quad K_{\Theta p} = 1.077$$

$$v_p := \frac{C_v \cdot K_v}{20^m \cdot t_l^{x_v} \cdot s_o^{y_v}} \quad v_p = 293.131$$

### 2.2.2 Расчет оптимальной по себестоимости скорости резания

$$K_{\Theta c} := \left[ \frac{\Theta}{C_t \cdot \left[ \frac{m}{(1-m) \cdot M} \right]^{m \cdot n_t} \cdot \left( \frac{CR}{Ra} \right)^{y_r} \cdot t_l^{x_t}} \right] \quad K_{\Theta c} = 1.286$$

$$M := \left( \frac{t_l^{x_v}}{C_v \cdot K_v} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \left( t_c + \frac{a_u}{a} \right)$$

$$v_c := \left[ \frac{m}{(1-m) \cdot M} \right]^m \cdot s_o^{-y_v} \quad v_c = 212.455$$

### 2.2.3 Расчет оптимальной по свертке критериев производительности и себестоимости скорости резания

$$K_{\Theta m} := \left[ \frac{\Theta}{C_t \cdot \left[ \frac{2m}{(1-2m) \cdot M} \right]^{m \cdot n_t} \cdot \left( \frac{CR}{Ra} \right)^{y_r} \cdot t_l^{x_t}} \right] \quad K_{\Theta m} = 1.154$$

$$v_m := \left[ \frac{2m}{(1-2m) \cdot M} \right]^m \cdot s_o^{-y_v} \quad v_m = 258.501$$

сталь 95X18  $C_{v1} := 165$   $m_1 := 0.15$   $y_{v1} := 0.15$   $x_{v1} := 0.25$

$$k_{v1} := \frac{1}{m_1} - 1 \quad k_{s1} := \frac{y_{v1}}{m_1} - 1 \quad C_{t1} := 85 \quad y_{t1} := 0.5 \quad n_{t1} := 0.7 \quad x_{t1} := 0.3$$

## 2.3 Расчет оптимальной скорости резания с учетом температурного ограничения

$$K_{\Theta 1} := \left[ \frac{800}{C_{t1} \cdot \left[ \frac{m_1}{(1-m_1) \cdot M_1} \right]^{m_1 \cdot n_{t1}} \cdot \left( \frac{CR}{Ra} \right)^{y_r} \cdot t_l^{x_t}} \right] \quad K_{\Theta 1} = 0.902$$

$$M_1 := \left[ \frac{(t_l)^{x_v}}{C_{v1} \cdot K_v} \right]^{\frac{1}{m_1}} \cdot \left( t_c + \frac{a_u}{a} \right)$$

$$v_{t1} := \left( \frac{800}{C_{t1} \cdot s_o^{y_{t1}} \cdot t_l^{x_{t1}}} \right)^{\frac{1}{n_{t1}}} \quad v_{t1} = 57.87$$

### 2.3 Расчет оптимальной скорости резания по различным критериям

$$v_{p1} := \frac{C_{v1} \cdot K_v}{20^{m_1} \cdot t_l^{x_v} \cdot s_o^{y_{v1}}} \quad v_{p1} = 93.377$$

$$v_{c1} := \left[ \frac{m_1}{(1-m_1) \cdot M_1} \right]^{m_1} \cdot s_o^{-y_{v1}} \quad v_{c1} = 67.102$$

$$v_{m1} := \left[ \frac{2m_1}{(1-2m_1) \cdot M_1} \right]^{m_1} \cdot s_o^{-y_{v1}} \quad v_{m1} = 88.311$$

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЦЕЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ

$$C(v) := (v^{-1} \cdot so^{-1} + v^{kv} \cdot so^{ks} \cdot M)$$

$$Cm(v) := (v^{-2} \cdot so^{-2} + v^{kv-1} \cdot so^{ks-1} \cdot M)$$

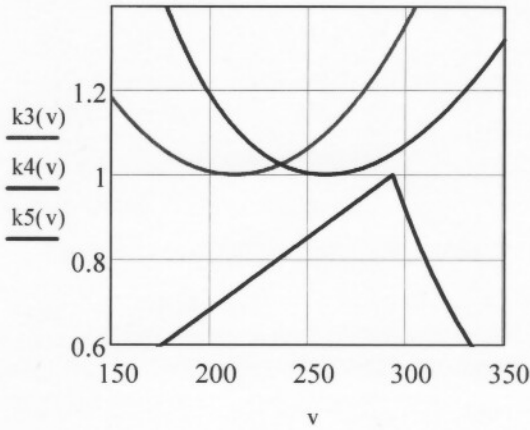
$$x := 150, 151..350$$

$$k3(v) := \frac{C(v)}{C(vc)}$$

$$k5(v) := \frac{Cm(v)}{Cm(vm)}$$

$$k4(v) := \begin{cases} \frac{v}{vp} & \text{if } 0 \leq v \leq vp \end{cases}$$

$$\begin{cases} \left(1 - \frac{1}{yv}\right) \\ \left(\frac{v}{vp}\right) \end{cases} \text{ otherwise}$$



$$k3(vp) = 1.305$$

$$k4(vc) = 0.725$$

$$k4(vc)^{-1} = 1.38$$

$$k3(vm) = 1.096$$

$$k4(vm) = 0.882$$

$$k4(vm)^{-1} = 1.134$$

### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ И ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ВДОЛЬ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ОБРАЗУЮЩЕЙ

#### 4.1 Ограничение по шероховатости обработанной поверхности

$$kr(x) := \left(\frac{1}{\sin(\arccos(x))}\right)^{yr}$$

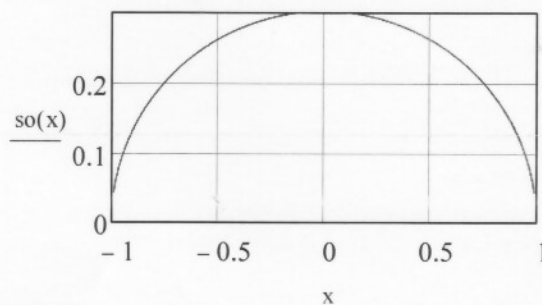
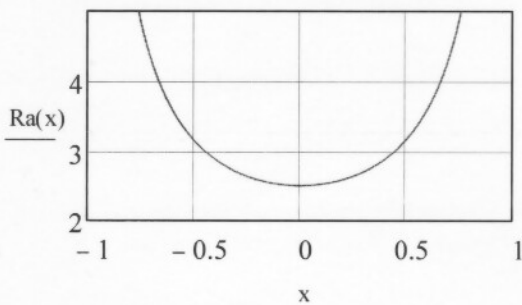
$$Ra(x) := CR \cdot kr(x) \cdot so^{yr}$$

$$x := -0.99, -0.985..0.99$$

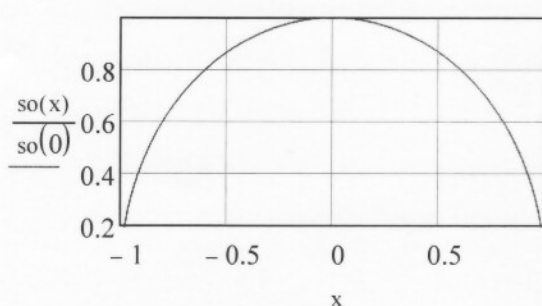
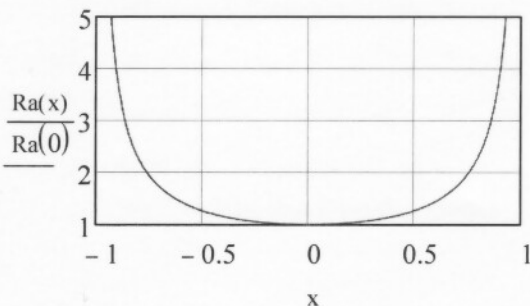
#### 4.2 Оптимальная подача

$$ks(x) := \sin(\arccos(x))$$

$$so(x) := ks(x) \cdot so$$



#### Коэффициенты изменения шероховатости и оптимальной подачи





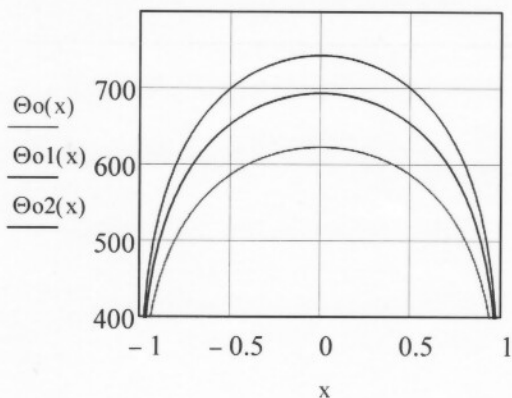
### 4.3 Ограничение по температуре резания

сталь 45

$$\Theta_0(x) := Ct \cdot vc^{nt} \cdot so(x)^{yt} \cdot t1^{xt}$$

$$\Theta_{01}(x) := Ct \cdot vp^{nt} \cdot so(x)^{yt} \cdot t1^{xt}$$

$$\Theta_{02}(x) := Ct \cdot vm^{nt} \cdot so(x)^{yt} \cdot (t1)^{xt}$$



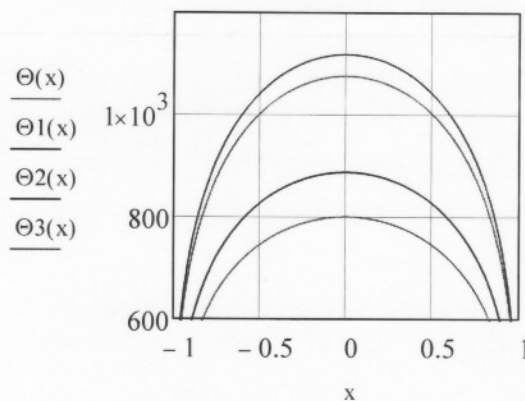
сталь 95X18

$$\Theta(x) := Ct1 \cdot vt1^{nt1} \cdot so(x)^{yt1} \cdot t1^{xt1}$$

$$\Theta_{11}(x) := Ct1 \cdot vp1^{nt1} \cdot so(x)^{yt1} \cdot t1^{xt1}$$

$$\Theta_{22}(x) := Ct1 \cdot vc1^{nt1} \cdot so(x)^{yt1} \cdot t1^{xt1}$$

$$\Theta_3(x) := Ct1 \cdot vm1^{nt1} \cdot so(x)^{yt1} \cdot t1^{xt1}$$



### 4.4 Оптимальные скорости резания

сталь 45

$$vp11(x) := \frac{Cv}{20^m \cdot t1^{xv} \cdot so(x)^{yv}}$$

$$vt12(x) := \left( \frac{800}{Ct1 \cdot so(x)^{yt1} \cdot t1^{yt1}} \right)^{\frac{1}{nt1}}$$

сталь 95X18

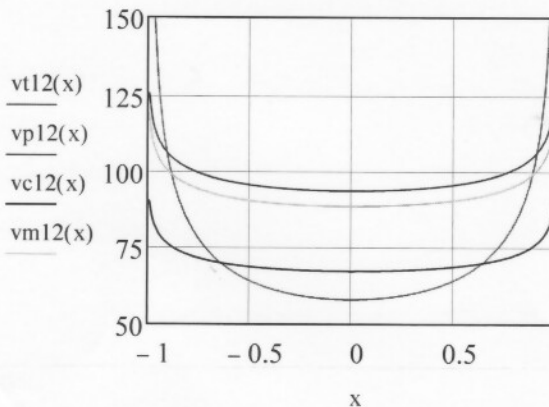
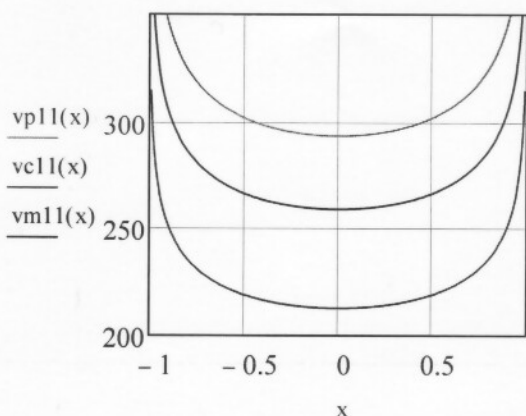
$$vp12(x) := \frac{Cv1}{20^{m1} \cdot t1^{xv1} \cdot so(x)^{yv1}}$$

$$vc11(x) := \left[ \frac{m}{(1-m) \cdot M} \right]^m \cdot so(x)^{-yv}$$

$$vc12(x) := \left[ \frac{m1}{(1-m1) \cdot M1} \right]^{m1} \cdot so(x)^{-yv1}$$

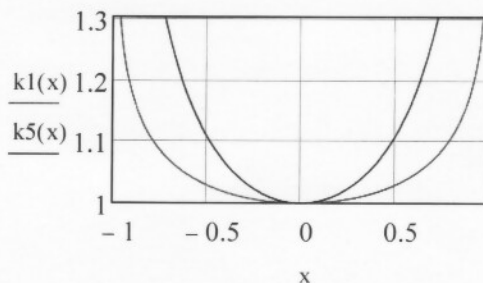
$$vm11(x) := \left[ \frac{2m}{(1-2m) \cdot M} \right]^m \cdot so(x)^{-yv}$$

$$vm12(x) := \left[ \frac{2m1}{(1-2m1) \cdot M1} \right]^{m1} \cdot so(x)^{-yv1}$$



$$k1(x) := \frac{vp11(x)}{vp11(0)} \quad k5(x) := \frac{vt12(x)}{vt12(0)}$$

Коэффициенты изменения скорости резания



ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ПРОГРАММА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ЧИСТОВОМ ТОЧЕНИИ

ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

## МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ЧИСТОВОМ ТОЧЕНИИ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИНСТРУМЕНТАМИ С ПОКРЫТИЯМИ

### Исходные данные:

Обрабатываемый материал **сталь 45**  $\sigma := 750$

Параметры обработки  $Ra := 2.5$   $\Theta := 800$   $a := 5$   $tc := 5$   $au := 50$

Исследуемые варианты инструмента:  $Ct := 490$   $xt := 0.09$   $yt := 0.12$   $nt := 0.2$

1. Инструментальный материал **T15K6**  $CR1 := 72$   $Cv1 := 2.73$   $m1 := 0.22$   $yv1 := 0.61$   $xv1 := 0.18$

$$yr1 := 1.9 \quad kv1 := \frac{1}{m1} - 1 \quad ks1 := \frac{yv1}{m1} - 1$$

2. Инструментальный материал **T15K6+TiC**  $CR2 := 37$   $Cv2 := 3.35$   $m2 := 0.24$   $yv2 := 0.65$   $xv2 := 0.22$

$$yr2 := 1.6 \quad kv2 := \frac{1}{m2} - 1 \quad ks2 := \frac{yv2}{m2} - 1$$

3. Инструментальный материал **T15K6+TiN**  $CR3 := 19$   $Cv3 := 7.34$   $m3 := 0.40$   $yv3 := 0.66$   $xv3 := 0.21$

$$yr3 := 1.3 \quad kv3 := \frac{1}{m3} - 1 \quad ks3 := \frac{yv3}{m3} - 1$$

### 1. РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

#### 1.1 Расчет оптимальной подачи

$$so1 := \left( \frac{CR1}{Ra} \right)^{\frac{-1}{yr1}} \quad so1 = 0.171 \quad so2 := \left( \frac{CR2}{Ra} \right)^{\frac{-1}{yr2}} \quad so2 = 0.186 \quad so3 := \left( \frac{CR3}{Ra} \right)^{\frac{-1}{yr3}} \quad so3 = 0.21$$

#### 1.2 Расчет оптимальных скоростей резания по различным критериям

##### 1.2.1 Расчет оптимальной по производительности скорости резания

$$K_{\Theta p} := \left[ \frac{\Theta}{Ct \cdot \left( \frac{Cv1}{15^{m1} t^{xv1}} \right)^{nt} \cdot \left( \frac{CR1}{Ra} \right)^{\frac{yr1}{nt}} \cdot t^{xt}} \right] \quad K_{\Theta p} = 1.499$$

$$vp1 := \frac{Cv1}{\left( 15^{m1} t^{xv1} so1^{yv1} \right)} \quad vp1 = 4.426 \quad vp2 := \frac{Cv2}{\left( 15^{m2} t^{xv2} so2^{yv2} \right)} \quad vp2 = 5.226 \quad vp3 := \frac{Cv3}{\left( 15^{m3} t^{xv3} so3^{yv3} \right)} \quad vp3 = 6.957$$

##### 1.2.2 Расчет оптимальной по себестоимости скорости резания

$$M1 := \left( \frac{t^{xv1}}{Cv1} \right)^{\frac{1}{m1}} \cdot \left( tc + \frac{au}{a} \right) \quad M2 := \left( \frac{t^{xv2}}{Cv2} \right)^{\frac{1}{m2}} \cdot \left( tc + \frac{au}{a} \right) \quad M3 := \left( \frac{t^{xv3}}{Cv3} \right)^{\frac{1}{m3}} \cdot \left( tc + \frac{au}{a} \right)$$

$$vo1 := \left[ \frac{m1}{(1-m1) \cdot M1} \right]^{m1} \cdot so1^{-yv1} \quad vo2 := \left[ \frac{m2}{(1-m2) \cdot M2} \right]^{m2} \cdot so2^{-yv2} \quad vo3 := \left[ \frac{m3}{(1-m3) \cdot M3} \right]^{m3} \cdot so3^{-yv3}$$

$$vo1 = 3.35 \quad vo2 = 3.963 \quad vo3 = 5.916$$

### 1.2.3 Расчет оптимальной по свертке критериев производительности и себестоимости скорости резания

$$vm1 := \left[ \frac{2m1}{(1-2m1) \cdot M1} \right]^{m1} \cdot so1^{-yv1} \quad vm2 := \left[ \frac{2m2}{(1-2m2) \cdot M2} \right]^{m2} \cdot so2^{-yv2} \quad vm3 := \left[ \frac{2m3}{(1-2m3) \cdot M2} \right]^{m2} \cdot so3^{-yv3}$$

$$vm1 = 4.197 \quad vm2 = 5.127 \quad vm3 = 6.831$$

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РЕЗАНИЯ

$$so1(Ra) := \left( \frac{CR1}{Ra} \right)^{\frac{-1}{yr1}} \quad so2(Ra) := \left( \frac{CR2}{Ra} \right)^{\frac{-1}{yr2}} \quad so3(Ra) := \left( \frac{CR3}{Ra} \right)^{\frac{-1}{yr3}}$$

$$vp1(Ra) := \frac{Cv1}{\left( 15^{m1} t^{xv1} so1(Ra)^{yv1} \right)} \quad vp2(Ra) := \frac{Cv2}{\left( 15^{m2} t^{xv2} so2(Ra)^{yv2} \right)} \quad vp3(Ra) := \frac{Cv3}{\left( 15^{m3} t^{xv3} so3(Ra)^{yv3} \right)}$$

$$vo1(Ra) := \left[ \frac{m1}{(1-m1) \cdot M1} \right]^{m1} \cdot so1(Ra)^{-yv1} \quad vm1(Ra) := \left[ \frac{2m1}{(1-2m1) \cdot M1} \right]^{m1} \cdot so1(Ra)^{-yv1}$$

$$vo2(Ra) := \left[ \frac{m2}{(1-m2) \cdot M2} \right]^{m2} \cdot so2(Ra)^{-yv2} \quad vm2(Ra) := \left[ \frac{2m2}{(1-2m2) \cdot M2} \right]^{m2} \cdot so2(Ra)^{-yv2}$$

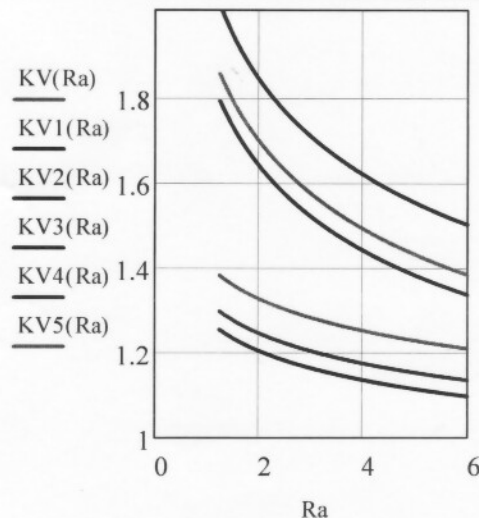
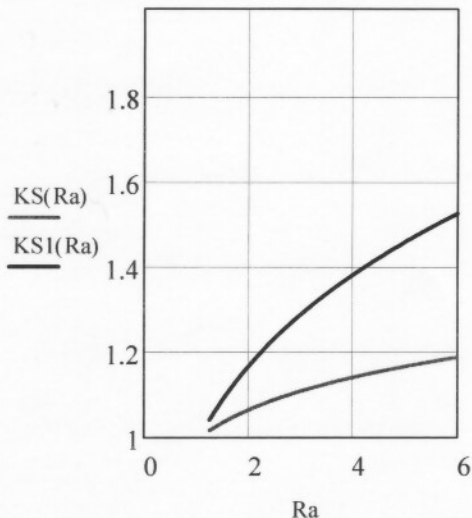
$$vo3(Ra) := \left[ \frac{m3}{(1-m3) \cdot M3} \right]^{m3} \cdot so3(Ra)^{-yv3} \quad vm3(Ra) := \left[ \frac{2m3}{(1-2m3) \cdot M2} \right]^{m2} \cdot so3(Ra)^{-yv3}$$

### Коэффициенты изменения оптимальной подачи и скорости резания

$$KS(Ra) := \frac{so2(Ra)}{so1(Ra)} \quad KV(Ra) := \frac{vo2(Ra) \cdot 1.1}{vo1(Ra)} \quad KV1(Ra) := \frac{vo3(Ra)}{vo1(Ra)} \quad KV2(Ra) := \frac{vp2(Ra)}{vp1(Ra)}$$

$$KS1(Ra) := \frac{so3(Ra)}{so1(Ra)} \quad KV3(Ra) := \frac{vp3(Ra)}{vp1(Ra)} \quad KV4(Ra) := \frac{vm2(Ra)}{vm1(Ra)} \quad KV5(Ra) := \frac{vm3(Ra)}{vm1(Ra)}$$

$$Ra := 1.25, 1.26..6$$



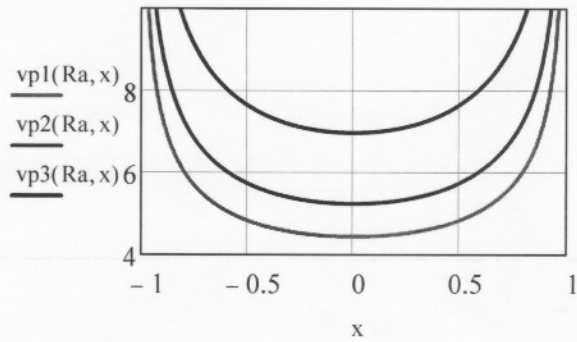
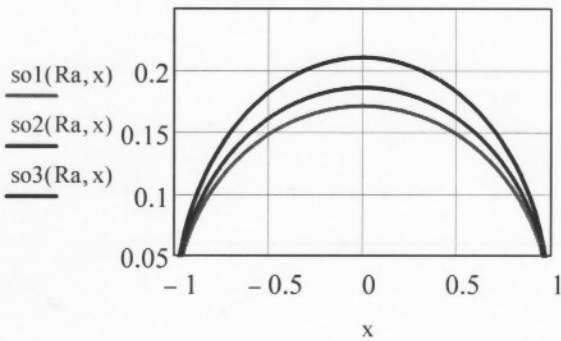
### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОСТИ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ВДОЛЬ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ОБРАЗУЮЩЕЙ

$ks(x) := \sin(\cos(x)) \quad x := -0.99, -0.985..0.99 \quad Ra := 2.5$

$$so1(Ra, x) := ks(x) \cdot \left(\frac{CR1}{Ra}\right)^{\frac{-1}{yr1}} \quad vp1(Ra, x) := \frac{Cv1}{\left(15^{m1} t^{xv1} so1(Ra, x)^{yv1}\right)}$$

$$so2(Ra, x) := ks(x) \cdot \left(\frac{CR2}{Ra}\right)^{\frac{-1}{yr2}} \quad vp2(Ra, x) := \frac{Cv2}{\left(15^{m2} t^{xv2} so2(Ra, x)^{yv2}\right)}$$

$$so3(Ra, x) := ks(x) \cdot \left(\frac{CR3}{Ra}\right)^{\frac{-1}{yr3}} \quad vp3(Ra, x) := \frac{Cv3}{\left(15^{m3} t^{xv3} so3(Ra, x)^{yv3}\right)}$$



$$vo1(Ra, x) := \left[\frac{m1}{(1-m1) \cdot M1}\right]^{m1} \cdot so1(Ra, x)^{-yv1}$$

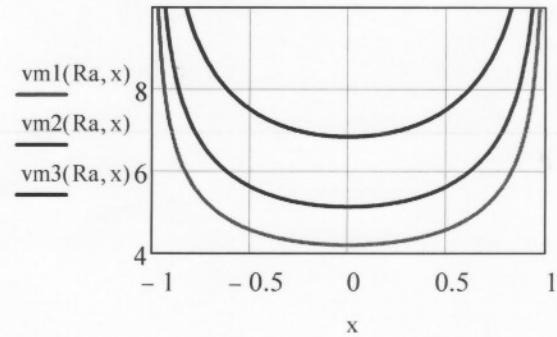
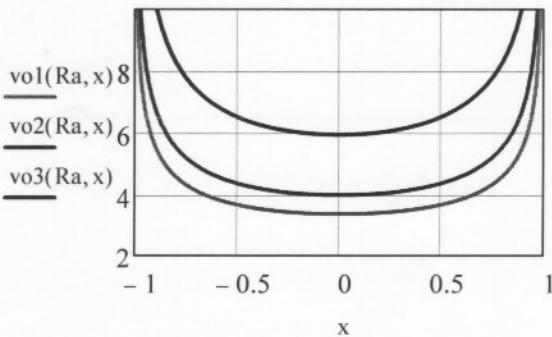
$$vm1(Ra, x) := \left[\frac{2m1}{(1-2m1) \cdot M1}\right]^{m1} \cdot so1(Ra, x)^{-yv1}$$

$$vo2(Ra, x) := \left[\frac{m2}{(1-m2) \cdot M2}\right]^{m2} \cdot so2(Ra, x)^{-yv2}$$

$$vm2(Ra, x) := \left[\frac{2m2}{(1-2m2) \cdot M2}\right]^{m2} \cdot so2(Ra, x)^{-yv2}$$

$$vo3(Ra, x) := \left[\frac{m3}{(1-m3) \cdot M3}\right]^{m3} \cdot so3(Ra, x)^{-yv3}$$

$$vm3(Ra, x) := \left[\frac{2m3}{(1-2m3) \cdot M2}\right]^{m2} \cdot so3(Ra, x)^{-yv3}$$



ПРИЛОЖЕНИЕ 4

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ В ПРОИЗВОДСТВО  
И УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС





**УТВЕРЖДАЮ:**

Проректор по научной работе ДонНТУ  
проф., д.т.н. Булгаков Ю.Ф.

» \_\_\_\_\_ 2016 г.

**АКТ**

внедрения результатов диссертационной работы Петряевой Ирины Алексеевны в учебном процессе кафедры «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета

Кафедрой технологии машиностроения Донецкого национального технического университета выполняются научно-исследовательские работы по повышению эффективности обработки фасонных поверхностей деталей. Одним из направлений этой работы является управление процессом и повышение производительности обработки фасонных поверхностей за счет определения оптимальных режимов резания.

Представленная в работе методика многокритериальной оптимизации режимов резания на основе оценки повышения производительности и снижения себестоимости обеспечивает возможность обоснования рекомендаций по выбору оптимальных режимов резания для любых условий токарной обработки фасонной поверхности, а также позволяет количественно оценить эффективность использования инструментов с износостойкими покрытиями.

Разработанная методика определения оптимальных режимов резания при точении фасонных поверхностей деталей с учетом переменности параметров процесса обработки, представленная в диссертационной работе Петряевой Ирины Алексеевны внедрена в учебный процесс кафедры «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета для чтения курсов лекций технологического профиля кафедры.

Представленная на кафедру «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета методика и рекомендации дают возможность повысить качество подготовки, инженерную компетенцию и навыки студентов и магистрантов, обучающихся на кафедре.

Председатель комиссии:  
профессор, к.т.н.

Горобец И.А.

Члены комиссии:

доц., к.т.н. Ивченко Т.Г.  
доц., к.т.н. Ищенко А.Л.  
доц., к.т.н. Буленков Е.А.



УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор  
ООО «НПО «Донвентильатор»  
Мавродий С.В.

2016 г.

АКТ

внедрения методики повышения производительности и  
снижения себестоимости токарной обработки за счет  
применения твердосплавного инструмента с износостойкими  
покрытиями

Кафедрой Технология машиностроения Донецкого национального технического университета выполняются научно-исследовательские работы по повышению эффективности обработки деталей машин за счет применения инструмента с различными износостойкими покрытиями. Возможности повышения эффективности (повышения производительности, снижения себестоимости при заданном уровне качества обработки) чистового точения твердосплавными инструментами с износостойкими покрытиями основаны на многокритериальной оптимизации режимов резания.

Разработанная методика повышения производительности и снижения себестоимости токарной обработки за счет применения твердосплавного инструмента с износостойкими покрытиями, основанная на результатах диссертационных исследований Петряевой Ирины Алексеевны, используется на предприятии ООО «НПО «Донвентильатор», г. Донецк при производстве деталей промышленных вентиляторов. Представленные рекомендации используются при выборе инструментального материала в зависимости от условий обработки и назначении режимов резания при производстве деталей.

Ожидаемый экономический эффект от использования представленной методики составит 17500,00 рос. руб. (семнадцать тысяч пятьсот рублей 00 коп.).

Председатель комиссии

Главный инженер

Члены комиссии:

Начальник производства

Главный конструктор

Платонов В.А.

Журавлев О.Д.

Ломов А.А.





**УТВЕРЖДАЮ:**

Директор ЧП «ДЕПЛА»

**Петров М.Г.**

«04» 03 2014 г.

**АКТ**

внедрения методики определения оптимальных режимов резания при точении фасонных поверхностей деталей с учетом переменности параметров процесса обработки

Кафедрой Технология машиностроения Донецкого национального технического университета выполняются научно-исследовательские работы по повышению производительности и снижению себестоимости обработки фасонных поверхностей деталей твердосплавным инструментом с износостойкими покрытиями с функционально-ориентированными свойствами.

Одним из направлений этой работы является управление процессом и повышение производительности обработки фасонных поверхностей за счет обеспечения оптимальных режимов резания инструментом с покрытиями в условиях переменности технических ограничений по шероховатости обработанной поверхности и температуре резания. Исследования в этой области позволяют получить более полную оценку возможностей повышения производительности и снижения себестоимости обработки для твердосплавного инструмента с покрытиями.

Разработанная методика многокритериальной оптимизации режимов резания и оценки эффективности точения фасонных поверхностей деталей инструментом с покрытиями с учетом переменности параметров процесса обработки, представленная в диссертационной работе Петряевой Ирины Алексеевны, используется на ЧП «ДЕПЛА» (г. Луганск) при производстве транспортных роликов прокатного оборудования. Представленные рекомендации используются при назначении режимов обработки указанных поверхностей деталей.

Ожидаемый экономический эффект от использования представленной методики составит 5800 грн. (пять тысяч восемьсот грн. 00 коп.).

Председатель комиссии

Члены комиссии:

Алишевский А.Н.

Головятинская В.В.

Васильева Л.Д.

Назаренко А.А.