

Юргинский технологический институт (филиал)  
Томского политехнического университета

На правах рукописи

Проскоков Андрей Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ РЕЖУЩИХ СВОЙСТВ РЕЗЦОВ С СМП ЗА СЧЕТ  
УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОБМЕНОМ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ**

Специальность 05.03.01

Технологии и оборудование механической  
и физико-технической обработки

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор С.И. Петрушин

Юрга 2007

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР.....	8
1.1 Виды и критерии износа металлорежущего инструмента и способы его оценки.....	8
1.2 Закономерности теплообмена при механической обработке металлов.....	15
1.2.1 Данные о влиянии температуры на процесс резания.....	15
1.2.2 Способы экспериментального измерения температуры резания....	18
1.3 Совершенствование инструмента на основе теплофизического анализа.....	20
1.3.1 Совершенствование инструмента путем изменения его геометрических параметров.....	20
1.3.2 Регулирование теплообмена изменением размеров контактных поверхностей инструмента.....	21
1.3.3 Улучшение теплоотвода в заготовку при несвободном резании....	23
1.4 Схематизация формы тела и расположение источников тепловыделения. Расчет итоговых плотностей теплового потока.....	25
1.5 Численные методы решения дифференциального уравнения теплопроводности.....	34
1.6 Напряженно-деформированное состояние в зоне резания. Схемы стружкообразования.....	37
1.7 Определение направления схода стружки при косоугольном резании .....	46
1.8 Цель, задачи и этапы исследования.....	47
Глава 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ .....	49
2.1 Определение направления схода стружки при несвободном косоугольном резании инструментом с закругленным лезвием .....	50
2.2 Уточнение схемы стружкообразования для различных значений переднего и заднего углов.....	56
2.3 Расчет напряжений в зоне пластической деформации.....	62

2.4 Расчет напряжений на контактных поверхностях.....	64
2.5 Пример расчета напряженного состояния в зонах стружкообразования и контакта.....	66
2.6 Особенности расчета напряженного состояния при несвободном резании.....	76
2.7 Выводы по главе 2.....	80
Глава 3 РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ РЕЗЦА.....	82
3.1 Расчет итоговых плотностей теплового потока .....	86
3.2 Расчет температуры на поверхностях резца методом конечных элементов при свободном резании.....	85
3.3 Расчет температуры на поверхностях резца методом конечных элементов при несвободном резании.....	86
3.4 Выводы по главе 3.....	97
Глава 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ НА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ.....	99
4.1 Выбор методов экспериментального исследования.....	99
4.1.1 Обрабатываемый материал.....	99
4.1.2 Режущий инструмент.....	100
4.1.3 Многогранные пластины.....	100
4.1.4 Экспериментальная установка.....	101
4.2 Измерение температуры резания.....	104
4.2.1 Измерение средней температуры резания естественной термопарой.....	104
4.2.2 Определение температурных полей на поверхности многогранной пластины.....	106
4.3 Определение направления схода стружки.....	107
4.4 Результаты определения температурных полей с помощью термоиндикаторных красок.....	111

4.5 Выводы по главе 4.....	121
Глава 5 КОНСТРУИРОВАНИЕ СМП С УЧЕТОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	122
5.1 Конструирование СМП с уменьшенным диапазоном температуры вдоль режущей кромки путем управления формой задней поверхности.....	122
5.2 Конструирование СМП с равномерным распределением температуры вдоль режущей кромки путем создания дополнительных элементов на передней поверхности.....	127
5.3 Сравнение распределений температуры вдоль режущей кромки предложенных пластин.....	129
5.5 Сравнительное экспериментальное исследование эксплуатационных свойств предлагаемых СМП.....	135
5.6 Оценка эксплуатационных свойств предлагаемых СМП с помощью коэффициента равномерности изнашивания.....	137
5.5 Выводы по главе 5.....	143
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	144
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Пример расчета НДС в зоне стружкообразования, выполненный в программе MathCAD.....	159
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Пример расчета итоговых плотностей теплового потока, выполненный в программе MathCAD.....	171
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Акты внедрения.....	176
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 Патенты на полезные модели.....	178

## ВВЕДЕНИЕ

Современное машиностроительное производство развивается по пути интенсификации производственных процессов и повышения режимов резания. Поэтому металлорежущие инструменты работают в жестких условиях нагружения при высоких температурах, когда изнашивание режущих лезвий происходит наиболее интенсивно, что напрямую отражается на производительности труда и экономичности.

Экспериментальными исследованиями отечественных и зарубежных авторов установлено, что при наиболее распространенном несвободном резании в процессе работы режущей пластины изнашивание по задней поверхности происходит неравномерно, а если учесть, что стойкость определяется на основе измерения максимального линейного износа  $h_{z\max}$ , то здесь имеется значительный резерв в повышении сроков службы инструментов. Идеология данной работы состоит в том, чтобы добиться равномерного износа по всей задней поверхности лезвия сменных многогранных пластин (СМП), и, тем самым, повысить стойкость сборных инструментов.

**Целью работы является обеспечение равномерности изнашивания задних поверхностей резцов со сменными многогранными пластинами путем управления геометрией и тепловыми потоками в лезвии.**

В теоретических исследованиях применены методы теории теплопроводности, МКЭ, компьютерное моделирование с использованием современного программного обеспечения и средств вычислительной техники. Экспериментальные исследования выполнялись по схеме однофакторного эксперимента в лабораторных условиях и включали в себя изучение топографии износа, температурных полей на задних поверхностях СМП с помощью термоиндикаторных красок, средней температуры резания и площадок контакта, составляющих силы резания и площадки контакта на передней поверхности при наружном продольном точении, а также стойкостные исследования. Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается экспериментальными данными и

производственными испытаниями.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. Разработанная уточненная схема образования стружки при несвободном косоугольном резании позволила рассчитать напряженно-деформированное состояние как на границах, так и внутри пластической зоны, а также оценить контактные напряжения на трущихся поверхностях лезвия.

2. Теоретически и экспериментально установлено, что при несвободном косоугольном резании угол схода стружки по передней поверхности определяется формой условной поверхности сдвига.

3. Установлено, что при уменьшении заднего угла на радиусной части лезвия происходит перераспределение тепловых потоков и снижение напряжений в режущем клине, что благоприятно сказывается на равномерности изнашивания задних поверхностей режущей пластины.

4. Разработан способ повышения стойкости металлорежущего инструмента путем выравнивания износа задних поверхностей вдоль режущей кромки за счет регулирования тепловыми потоками в лезвии.

**Практическая ценность работы** заключается в следующем:

1. Разработаны рекомендации по обеспечению равномерности износа задних поверхностей резцов с СМП путем изменения форм рабочих поверхностей и регулирования теплообменом в лезвии.

2. Создана методика конструирования новых форм СМП, обеспечивающих равный износ задних поверхностей вдоль режущей кромки.

3. Спроектирован ряд СМП с уменьшенным диапазоном колебания температур вдоль режущей кромки.

Результаты работы внедрены на ООО «Юрга-гидравлика», ООО «ЮТА». На разработанную форму сменной многогранной режущей пластины получен патент на полезную модель.

Диссертация состоит из пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. В первой главе приведен аналитический обзор материалов, пуб-

ликаций в периодической печати, патентных материалов, рассмотрены способы измерения температуры и пути управления тепловыми потоками и способы повышения стойкости инструмента. Изложены существующие методики определения геометрии и расчета криволинейного лезвия и расчет направления схода стружки при несвободном резании. Также рассмотрены известные схемы стружкообразования с развитыми зонами пластических деформаций и методы расчета напряжений на их основе.

Во второй главе изложены способы определения исходных данных для расчета температуры, включающий в себя: определение направления схода стружки при несвободном косоугольном резании с закругленной вершиной, расчетах внутренних напряжений в зоне стружкообразования, расчет контактных напряжений на передней и задней поверхностях лезвия, расчет плотностей тепловых потоков на контактных участках.

В третьей главе приведены расчеты плотностей теплового потока и температуры для случая несвободного резания методом конечных элементов с различными инструментальными и обрабатываемыми материалами.

Четвертая глава содержит результаты экспериментов по определению направления схода стружки, измерению тепловых полей на поверхностях СМП с помощью термоиндикаторных красок.

Пятая глава посвящена конструированию новых форм сменных многогранных режущих пластин с уменьшенным диапазоном колебания температуры вдоль режущей кромки и анализу температурного режима сконструированных пластин. Здесь также приводятся результаты сравнительных экспериментальных исследований СМП со стандартной и предложенной формами задних поверхностей.

Всего страниц - 179 , рисунков - 96 , таблиц - 9.

## Глава 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

### 1.1 Виды и критерии износа металлорежущего инструмента и способы его оценки

Износ инструмента является важнейшим показателем его работоспособности. Исследованию физической природы изнашивания посвящены работы как отечественных [23, 43, 49, 108] так и зарубежных исследований [142, 143] и ряд других. В настоящее время существуют гипотезы о механической, абразивной, адгезионной, химической, диффузионной, термической, электрической и магнитной природе изнашивания режущего инструмента, наличие которых свидетельствует о том, что механизм износа остается нераскрытым [48]. В работах [22, 45, 48, 142] авторы считают, что изнашивание режущих лезвий инструментов происходит в результате комплексного действия целого ряда механических и физико-химических явлений на площадках контакта: адгезии, диффузии и абразивного взаимодействия поверхностей.

Режущий инструмент изнашивается по всем поверхностям его режущей части, причем износ каждой из поверхностей зависит от химического состава и прочности контактирующих металлов, а также от параметров режима резания. Режущая способность и стойкость инструмента зависит от величины лимитирующего износа.

В зависимости от условий резания и свойств инструментального и обрабатываемого материалов преобладающий износ наблюдается либо на задних поверхностях (рис. 1.1, а), либо на передней поверхности (рис. 1.1, в). В общем случае, износ передней и задних поверхностей происходит одновременно (рис. 1.1, б).

Преобладающий износ задних поверхностей инструмента наблюдается чаще всего при малой толщине среза, особенно при обработке хрупких материалов, таких как чугуны, бронзы и др. Износ передней поверхности имеет место сравнительно редко, когда задняя поверхность предохраняется от износа наро-



стом, или в том случае, когда температура передней поверхности значительно превышает температуру задней поверхности.

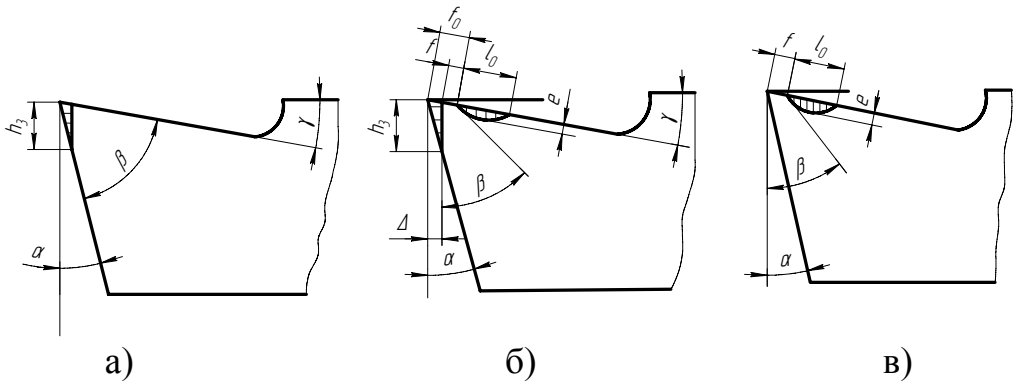


Рис. 1.1 Геометрия износа режущего инструмента по поверхностям [43]

( $e$  - глубина лунки;  $l_0$  - длина лунки;  $h_3$  - ширина площадки износа по задней поверхности;  $f$  - ширина фаски):  $a$  - по главной задней;  $b$  - по задней и передней;  $v$  - по передней

Особенностью износа передней поверхности является образование лунки на некотором расстоянии от режущей кромки. По мере износа длина  $l_0$  и глубина лунки  $e$  увеличиваются, а радиус ее кривизны уменьшается. Обычно длина лунки растет в сторону режущей кромки медленнее, чем в противоположную сторону. При одновременном износе передней и задней поверхностей инструмента участок передней поверхности, находящийся между лункой износа и режущей кромкой, постепенно уменьшается с двух сторон, уменьшается также угол заострения и в результате прочность режущей кромки снижается, что в ряде случаев сопровождается разрушением режущей части инструмента.

Влияние времени работы на износ резца из твердого сплава при обработке стали показано на рис.1.2 [48].

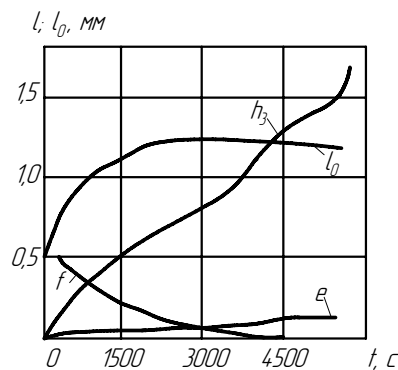


Рис. 1.2. Изменение параметров износа во времени при обработке сталей

Исследования [48] показали, что при износе задней поверхности скорость увеличения площади износа с течением времени уменьшается, однако скорость объемного износа почти не изменяется. Там же показано, что в определенных условиях резания происходит образование проточин по главной или вспомогательной задней поверхности. В ряде случаев образование проточин является превалирующим в износе инструмента (рис. 1.3).

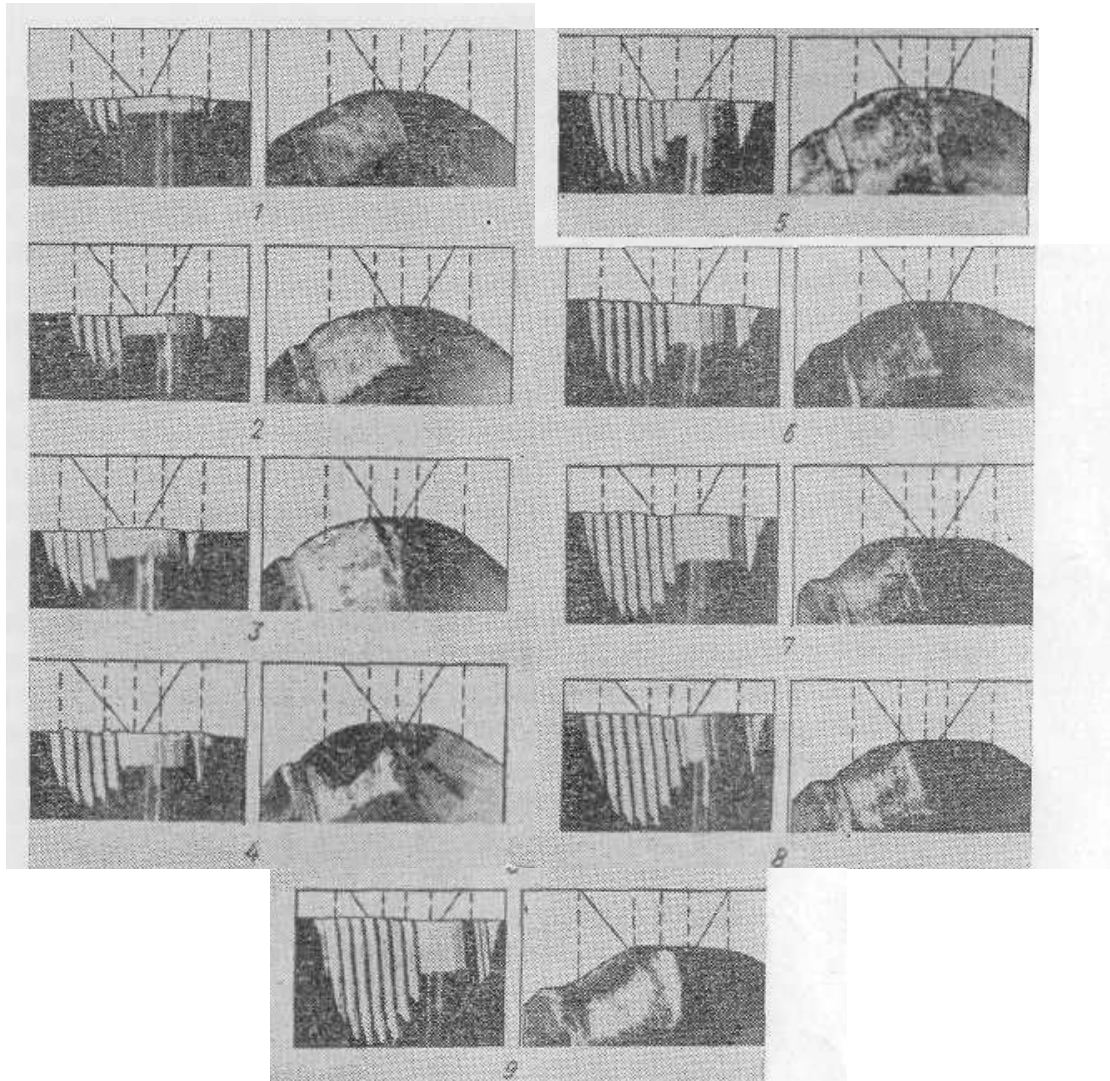


Рис. 1.3 Образование проточин по задним поверхностям при обработке Стали 10 инструментом из Т15К6:  $V=3,08$  м/с;  $S=0,1$  мм/об,  $t=0,25$  мм

Выход инструмента из строя может быть вызван различными причинами: резким возрастанием интенсивности износа, увеличением шероховатости обработанной поверхности, изменением размера обрабатываемой детали, увеличением силы и температуры резания за пределы допустимого и т. д. Критерий из-

носа инструмента зависит от характера выполняемой операции, инструментального и обрабатываемого материалов и др.

Для твердосплавных резцов при черновой обработке сталей критерием износа задней поверхности принимается  $h_3 = 0,8..1,0$  мм, а при обработке чугунов -  $h_3 = 0,8..0,7$  мм. При чистовых операциях величина допустимого износа составляет  $h_3 = 0,2..0,25$  мм

При фрезеровании в качестве критерия затупления режущего инструмента принимается определенная величина фаски износа по задней поверхности зуба фрезы  $h_3$ . Величина допустимого износа  $h_3$  в зависимости от типа фрезы и характера обработки колеблется в пределах  $0,15..2,0$  мм.

При отделочных операциях критерий затупления устанавливается согласно требованиям, предъявляемым к точности и шероховатости поверхности. В этом случае целесообразнее оперировать радиальным износом  $\Delta$ , измеряемым в направлении, нормальном к обработанной поверхности, так называемым размерным износом.

Первый период работы режущего инструмента сопровождается повышенным размерным износом. Относительное время работы инструмента на этом участке непродолжительно, а путь резания составляет десятые доли от общего пути резания. Второй период соответствует нормальному износу инструмента. Кривая износа прямолинейна и проходит под относительно небольшим углом наклона к оси абсцисс. Третий период характеризуется повышенной интенсивностью износа инструмента. Величина относительного размерного износа зависит от ряда факторов: вида инструмента, метода обработки, обрабатываемого и инструментального материалов, режимов резания, геометрии режущего инструмента, среды и т. д.

В работе [73] рассмотрены основные методы оценки степени изношенности режущей части резца, в том числе и резца с многогранной пластиной. Методы оценки можно разделить на две большие группы (рис. 1.4).

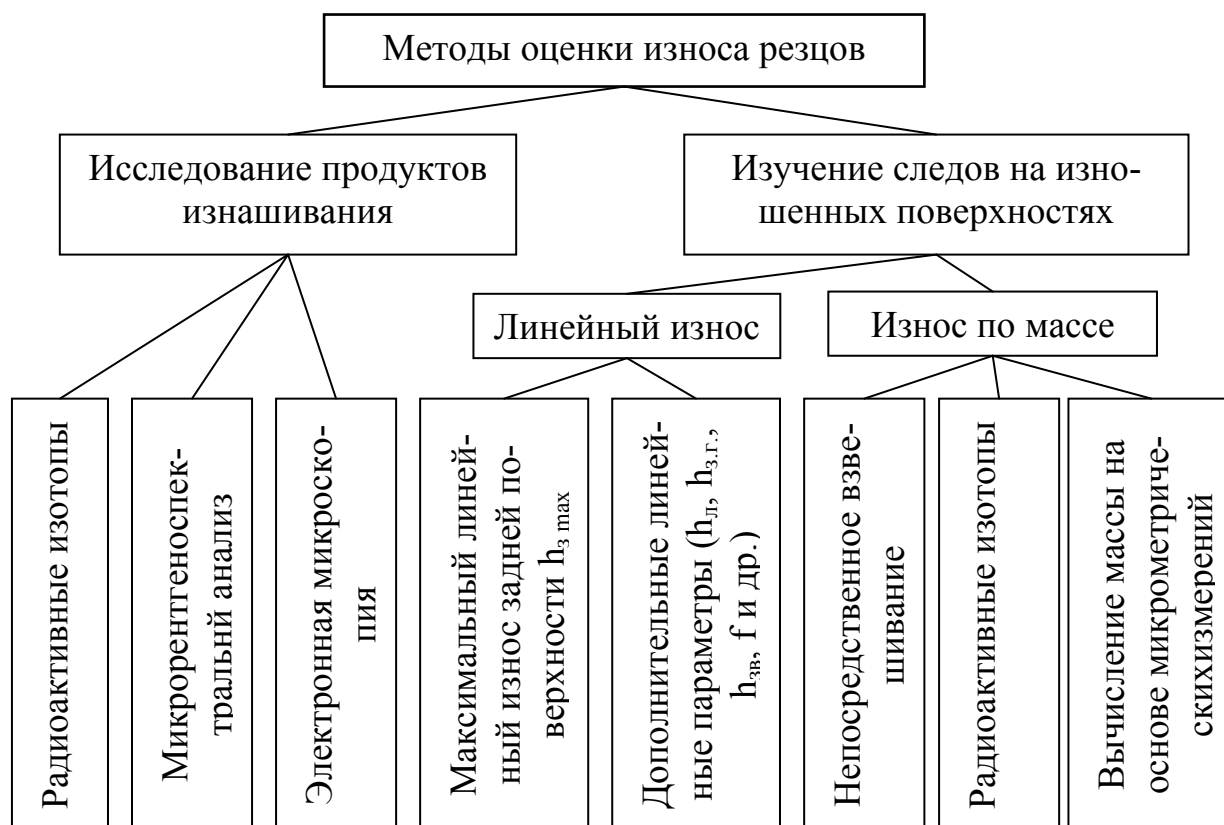


Рис. 1.4 Классификация методов измерения износа резцов

Первая группа подразделяется на методы изучения линейного износа, когда суждение о степени износа резца выводится на основании измерения одной или нескольких линейных величин изношенных площадок, и методы оценки износа по массе (объему) изношенного инструментального материала.

Широкое распространение получила оценка линейного износа по максимальной величине штрихов износа задних поверхностей [43]. В некоторых случаях этот основополагающий показатель дополняется линейным износом главной, вспомогательной и переходной задней поверхности, глубиной и шириной лунки и другими линейными параметрами [43,44].

При несвободном течении изнашивание задних поверхностей происходит неравномерно [45]. Это явление очевидно связано с объемным деформированием срезаемой стружки и различными условиями резания в каждом ее сечении. Неравномерность износа задних поверхностей уменьшается при уменьшении действительных углов в плане в окрестности вершины на участке длиной (1,5-

2,0)S. Также в данной работе указывается, что на закономерности изнашивания инструмента большое влияние оказывает форма режущего лезвия в плане. Без специально принятых мер при несвободном резании максимальный износ чаще всего будет иметь место в окрестности вершины инструмента, т.е. при пересечении главной и вспомогательной режущих кромок. С целью выравнивания износа по длине режущих кромок, вершину инструмента закругляют или затачивают переходные и зачищающие кромки с малыми углами в плане [45].

В работе [78] производилось исследование износа задних поверхностей при точении чугунов. Измерения износа вдоль всей рабочей части режущего лезвия показали, что можно выделить две зоны интенсивного роста износа задних поверхностей: первая прилегает к вершине резца, а вторая приходится примерно на середину главной задней поверхности. Также в месте выхода вспомогательного режущего лезвия из-под стружки на задней поверхности часто наблюдалась риска, которая преобладала по размерам по сравнению с остальной площадкой износа задних поверхностей (см. Рис. 1.5). По мере изнашивания на вспомогательной радиусной части режущей кромки происходит сравнительно быстрое увеличение износа в результате «осыпания» или мелких выкрошиваний режущего лезвия, и именно в этой части происходит интенсивное опускание режущей кромки, а, следовательно, вспомогательная режущая кромка лезвия является элементом, определяющим стойкость СМП.

В работе [74] автор считает, что масса изношенной части инструмента является наиболее полной и объективной характеристикой износа. Ее можно определить одним из трех способов: непосредственным взвешиванием, методом радиоактивных изотопов и методом вычисления массы на основе микрометрических измерений. Последний метод прост, общедоступен и обеспечивает необходимую точность определения изношенной массы. Кроме того, он обладает тем важным преимуществом, что масса легко дополняется линейными параметрами износа. В этой же работе приведены формулы для расчета изношенной массы этим методом.

Однако, каждый из перечисленных методов исследования износа резцов не учитывает особенностей изнашивания резцов при несвободном резании.

В свою очередь, существующие рекомендации, нормативы режимов резания не учитывают фактора равномерности изнашивания задних поверхностей, что говорит о недостоверности и неэффективности назначаемых режимов.

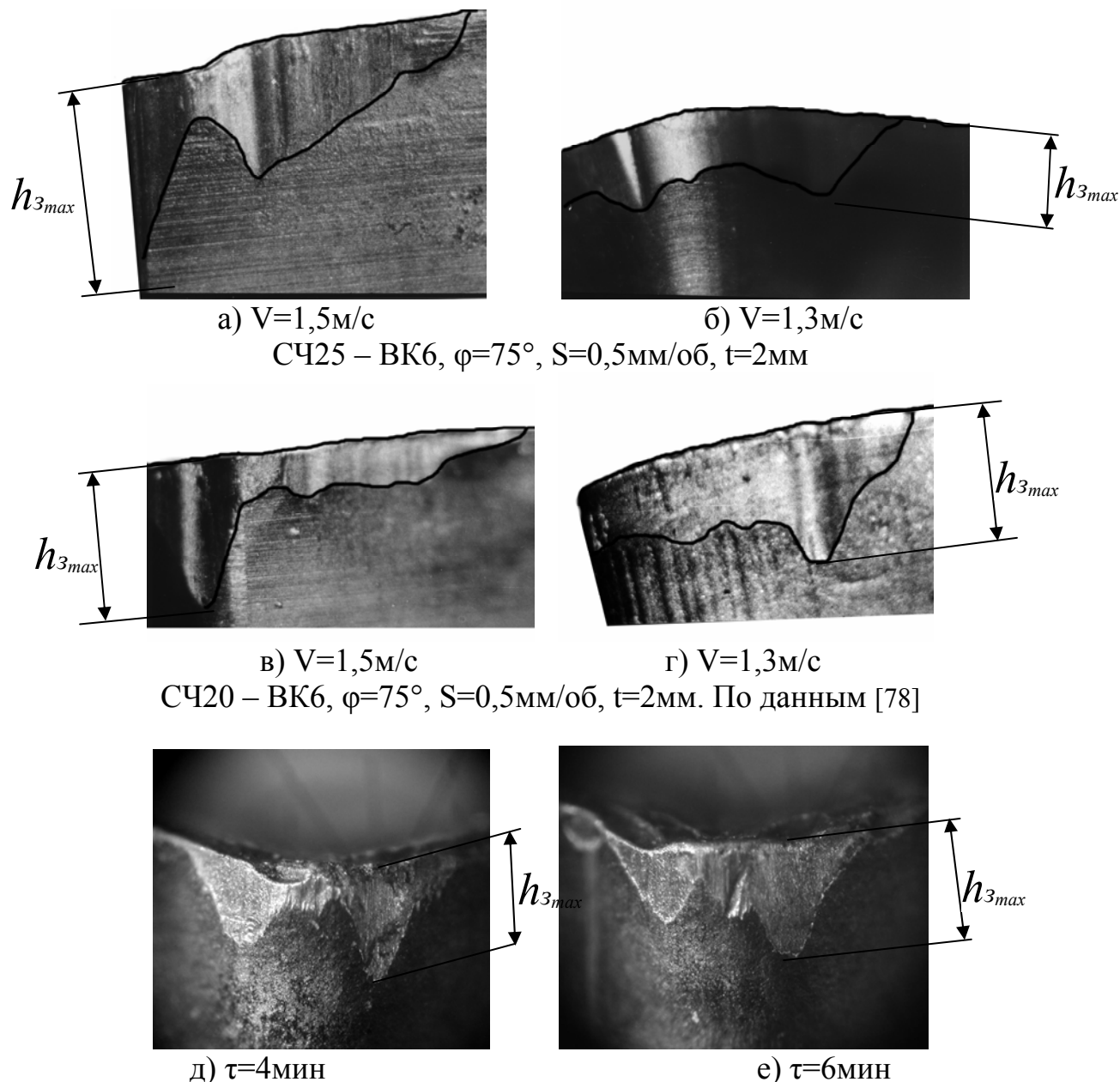


Рис.1.5 Характер изнашивания инструмента по задней поверхности

В результате изучения общих форм изнашивания задних поверхностей при несвободном резании режущей кромкой с закругленным лезвием можно

сделать предположение, что неравномерность изнашивания возникает в результате того, что температура вдоль режущей кромки лезвия имеет различное значение. Поэтому для более подробного изучения этого явления возникает необходимость исследования температурных зависимостей в зоне резания.

## 1.2 Закономерности теплообмена при механической обработке металлов

### 1.2.1 Данные о влиянии температуры на процесс резания

Процесс резания всегда сопровождается образованием тепла и повышением температуры в зоне обработки. Можно выделить три основных источника тепла: источник в зоне сдвига, вызванный процессом пластической деформации; источник в зоне трения между стружкой и инструментом на длине контакта с передней поверхностью; источник в зоне трения между заготовкой и инструментом на длине контакта с задней поверхностью (Рис.1.6). Каждый из этих тепловых источников выделяет определенное количество теплоты, в результате чего происходит их взаимовлияние. При этом происходит нагрев стружки, заготовки и инструмента, оказывающий существенное влияние на ход процесса резания.

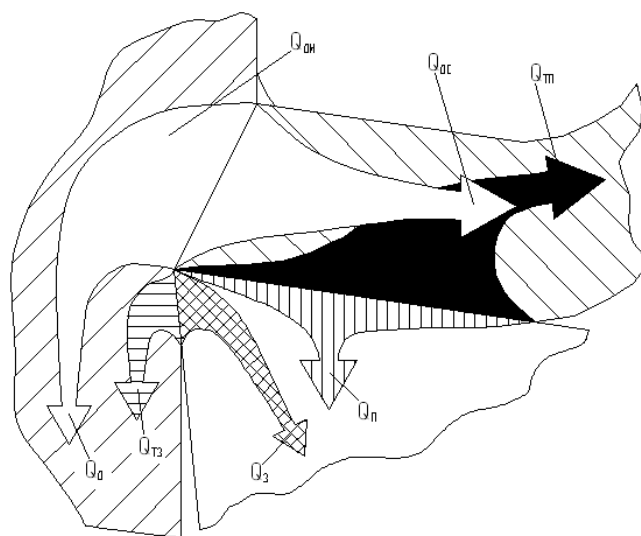


Рис.1.6 Схема взаимодействия источников тепла [97]

Изучением влияния температуры на процесс резания занимались многие ученые. Так или иначе затрагивали данную тему: Резников А.Н. [97, 98, 99], Даниелян А.М.[23], Лоладзе Т.Н.[44,48,49], Зорев Н.Н. [29], Полетика М.Ф. [83], Утешев М.Х. [125], Кушнер В.С. [14, 47], Trent.Е.М.[143], Komanduri R. и Nou Z. [141] и многие другие.

По мнению многих авторов, температура является основной характеристикой процесса резания. Так Зорев Н.Н. в работе [29] считает температуру резания «комплексной обобщающей характеристикой, отражающей деформационные процессы в зоне резания» и считает температуру резания основным фактором, определяющим условия трения на рабочих поверхностях инструмента, т.к. все внешние факторы влияют на трение постольку, поскольку они изменяют температуру резания. Грановский Г.И. [20] считает, что «распределение температуры на рабочих поверхностях является одной из важнейших характеристик условий работы и оказывает существенное влияние на закономерности изнашивания этих поверхностей».

Кушнер В.С. [14] называет температуру, возникающую на поверхностях инструментов, величиной, определяющей работоспособность инструмента и ограничивающей производительность обработки. Автор считает, что для повышения точности производимых расчетов необходимо учитывать ширину зоны стружкообразования с параллельными границами, а также наличие контактной зоны пластических деформаций на передней поверхности (рис. 1.7).

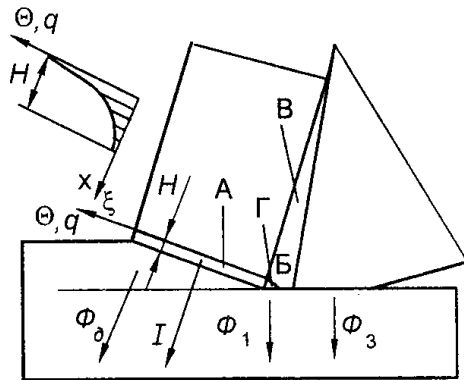


Рис. 1.7 Схема распределения температуры и плотности теплового потока в зоне стружкообразования с параллельными границами [14]



В зависимости от задач регулирования термического режима в технологической системе можно управлять температурой в зоне обработки и изменять температуру на отдельных участках заготовки и инструмента.

Изменение температуры в зоне резания необходимо производить для создания наиболее благоприятных условий, при которых будет обеспечена наибольшая стойкость и производительность инструмента с заданной точностью обработки.

В работе [98] автор выделяет несколько способов управления тепловыми явлениями при резании.

Естественным способом изменения температуры в зоне резания является регулирование мощности теплообразования. Это может быть достигнуто изменением режима работы или изменением геометрии инструмента. Управляя скоростью резания или толщиной срезаемого слоя, влияют на температуру в зоне резания. Например, при отрезке или обработке фасонных или конических поверхностей стремятся задавать скорость резания и толщину среза постоянными.

Температурой резания также можно управлять, периодически прерывая контакт инструмента с заготовкой. Снижение температуры будет тем большим, чем длиннее цикл времени рабочего и вспомогательного ходов и чем больше отношение времени вспомогательного хода ко времени рабочего хода инструмента.

Ещё одним способом управления тепловыми потоками является применение смазочно-охлаждающих технологических сред. С одной стороны, они могут смазывать трущиеся поверхности и, таким образом, снижать мощность теплообразующих источников. С другой стороны, омывая твердые тела, входящие в систему, жидкости или газы участвуют в конвективном теплообмене и уносят из зоны резания часть теплоты, также снижая температуру.

Для управления тепловыми процессами в процессе резания кроме энергии, затрачиваемой на резание, в технологическую систему вводят еще какую-либо энергию, предназначенную для дополнительного нагрева заготовки. В ре-

зультате этого изменяются свойства материала заготовки, условия трения в зоне резания, а, следовательно, меняется теплофизическая обстановка и температуры на контактных поверхностях.

Направленное изменение температуры производят путем выбора рациональной конструкции инструмента [47, 99]. В этом случае все варианты конструкций направлены на изменение итоговых тепловых потоков теплообмена в зоне резания.

Несмотря на достигнутые успехи в аналитических расчетах температуры при резании и управлении тепловыми потоками, никто из перечисленных авторов не уделил достаточно внимание ее распределению вдоль режущей кромки, поэтому вопрос о таких расчетах остается открытым.

### 1.2.2 Способы экспериментального измерения температуры резания

Исследование тепловых процессов в технологических системах тесно связано с проведением экспериментов по измерению температур на различных участках инструмента, заготовки или оборудования, а также с определением мощности и плотности тепловых потоков. Такие эксперименты необходимы, с одной стороны для решения тех или иных задач опытным путем, а с другой – для проверки правильности и корректировки результатов теоретических построений, предназначенных для определения расчетным путем температур или характеристик источников и стоков теплоты.

Все методы измерения температуры можно разделить на две большие группы: контактные и бесконтактные [99]. К первой группе относятся методы и устройства, в которых между датчиком температуры и объектом измерения имеется непосредственный контакт. Вторая группа содержит методы, при которых датчики измерительных устройств находятся на некотором удалении от объекта, температура которого подлежит определению. Контактные методы измерения, в свою очередь, могут быть разделены на три группы в соответст-

вии с основными особенностями устройств, с помощью которых их осуществляют: термометры, термопары, термоиндикаторы. На рисунке 1.8 показана классификация методов экспериментального исследования тепловых потоков и температур в технологических системах. Она получена в результате анализа общей классификации из работы [98].

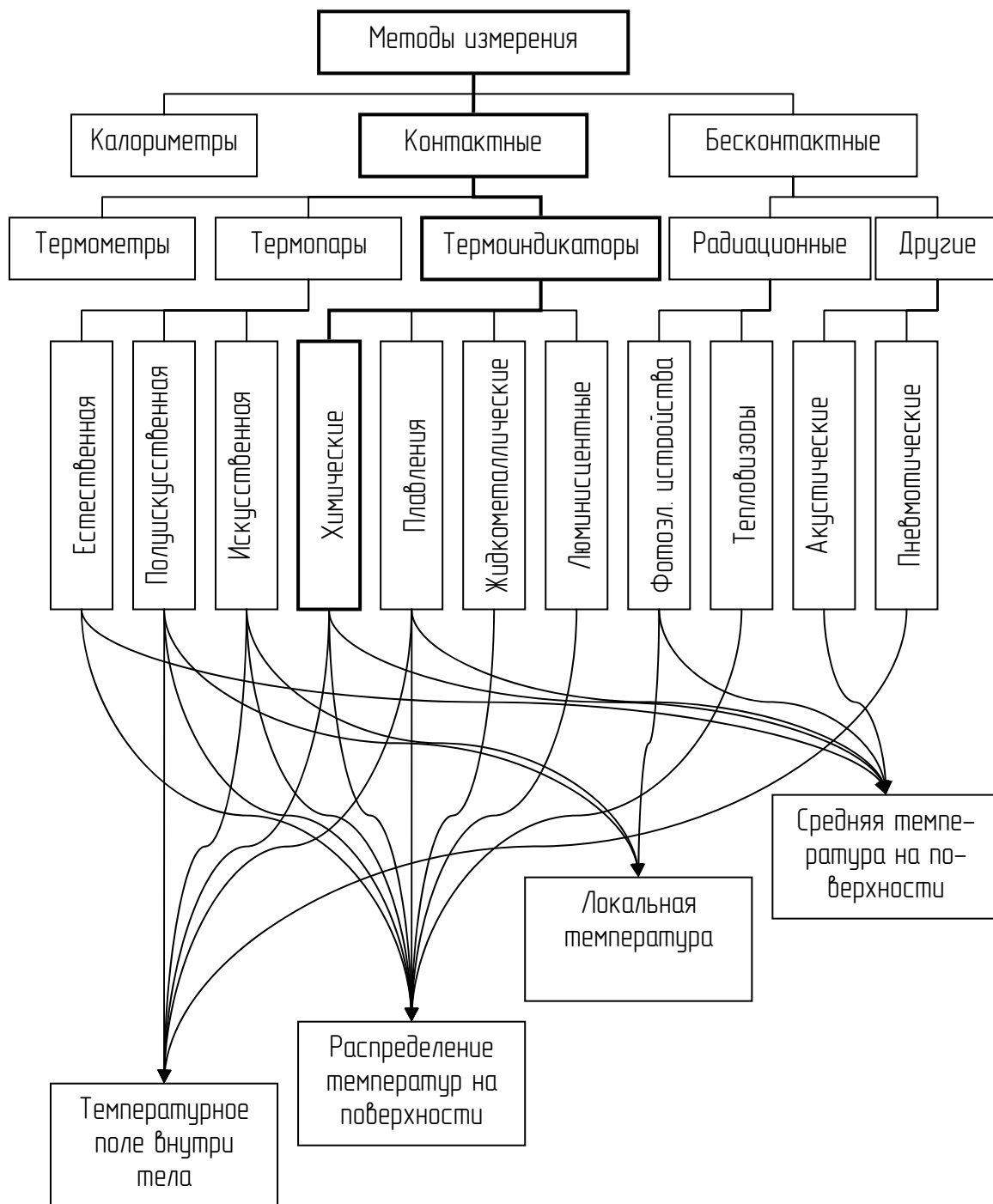


Рис. 1.8. Классификация методов экспериментального исследования тепловых потоков и температур в технологических системах

Каждый из существующих способов измерения температуры имеет свои достоинства и недостатки, поэтому выбор того или иного метода зависит от целей и конкретных условий измерения. В частности, когда необходимо определить температуру не в отдельной точке, а ее распределение по поверхности для установления участков с большим градиентом температуры, термометры термоэлектрические и сопротивления непригодны. Для этих целей наиболее применимы цветные термоиндикаторы. Они являются одним из перспективных средств не только регистрации, но и измерения температуры. К таким термоиндикаторам относятся вещества, обладающие способностью резко изменять свой цвет при определенной температуре, называемой температурой перехода. По принципу действия термоиндикаторы подразделяются на 4 основных типа: термохимические индикаторы, термоиндикаторы плавления, жидкокристаллические термоиндикаторы и люминесцентные термоиндикаторы.

Бесконтактные измерения, используемые в технологической практике, осуществляют либо с помощью радиационных устройств, либо с помощью других устройств, использующих оптические, акустические или пневматические датчики.

### 1.3 Совершенствование инструмента на основе теплофизического анализа

#### 1.3.1 Совершенствование инструмента путем изменения его геометрических параметров

При изменении формы и геометрических параметров рабочей части инструмента происходит перераспределение источников теплообразования в зоне механической обработки, что ведет к изменению интенсивности и направления потоков, обеспечивающих отвод теплоты через инструмент.

Известно [2, 14, 29, 102], что передний угол  $\gamma$ , оказывает существенное влияние на составляющие силы резания  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$  и, следовательно, на интенсивность источников теплообразования в зоне резания. При увеличении  $\gamma$  сила

резания и относительный сдвиг в зоне стружкообразования уменьшаются, снижается интенсивность тепловых источников, эквивалентных работе деформации и работе трения по передней поверхности инструмента. Поскольку угол  $\gamma$  влияет на усадку стружки и длину контакта по передней поверхности, интенсивность источников изменяется не прямо пропорционально углу резания, а, следовательно, учет этого параметра при теплофизических расчетах является сложной математической задачей.

Задний угол инструмента  $\alpha$  также влияет на способность последнего отводить теплоту из зоны резания. При увеличении  $\alpha$  и заданном значении переднего угла, угол заострения инструмента  $\beta$  уменьшается, а, следовательно, уменьшаются и напряжения в режущем клине. Это тормозит теплоотвод в тело инструмента, но одновременно облегчает переток теплоты от площадки контакта на передней поверхности резца к площадке контакта на задней его поверхности и далее в массу обрабатываемой детали. Различное влияние  $\alpha$  на теплообразование и теплоотвод приводит к тому, что в конкретных случаях имеется возможность установить значения переднего и заднего углов, соответствующее оптимальной температуре  $\theta$ . При этом, естественно, теплофизические расчеты не исчерпывают всех требований к оптимизации геометрии инструмента, поскольку они не касаются проблем прочности режущего клина, шероховатости обработанной поверхности и других не менее важных условий, необходимых для обеспечения технологических требований к операции. Если другие требования выполняются, то всегда надо стремиться к оптимальному соотношению переднего и заднего углов, полученному на основании теплофизических расчетов [47, 97, 98].

### 1.3.2 Регулирование теплообмена изменением размеров контактных поверхностей инструмента

Размеры контактных площадок на рабочих поверхностях инструмента

оказывают существенное влияние на тепловые явления при механической обработке материалов.

Исследования [83, 105, 111] показывают, что наибольшая температура на поверхности соприкосновения острого резца со стружкой находится на расстоянии (0,4..0,5) длины контакта, отсчитываемой от режущей кромки (Рис.1.9). Поэтому уменьшение длины контакта между стружкой и резцом приводит к снижению температуры и уменьшению размеров области прогрева режущего клина [99].

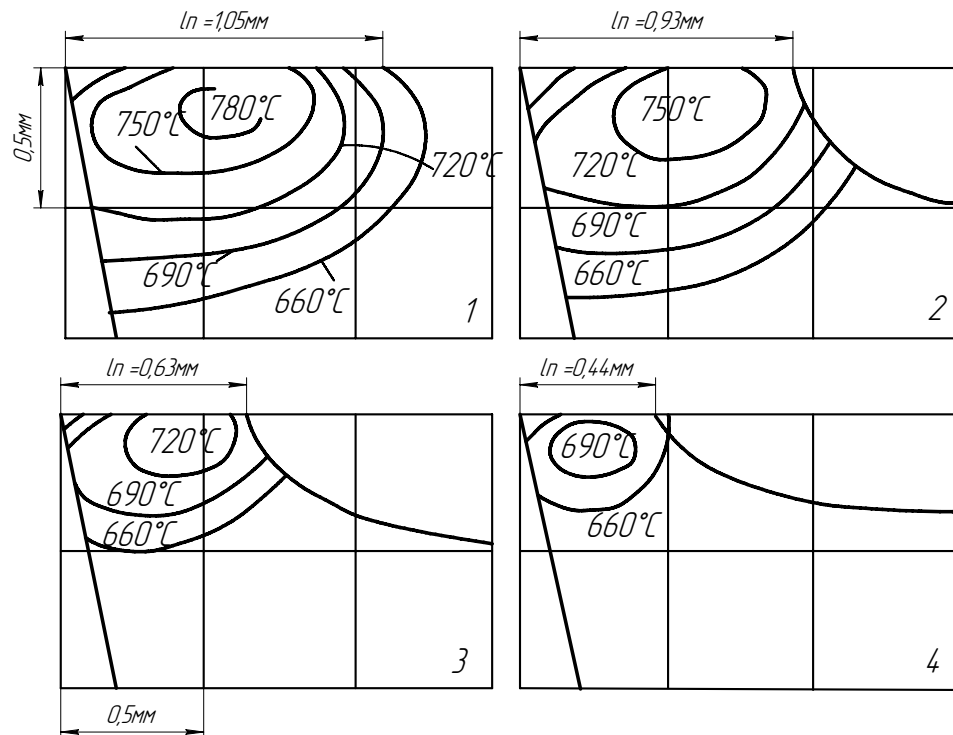


Рис. 1.9 Температурные поля в режущем клине при ортогональном точении стали твердосплавным инструментом с различной длиной контакта по передней поверхности:  $V=125$  м/мин,  $S=0,25$  мм/об [99]

Искусственное укорочение передней поверхности инструмента, снижает силы резания и усадку стружки, что, в свою очередь, приводит к уменьшению тепловыделения в зоне резания. С другой стороны, теплоотвод в тело инструмента при укорочении передней поверхности затрудняется в связи с удалением из режущего клина части металла для образования канавки.

Температура передней и задней поверхностей ограничивает режимы ре-

зания, допускаемые формоустойчивостью и износостойкостью режущего инструмента. Роль температуры передней поверхности возрастает при увеличении толщины срезаемого слоя и уменьшении переднего угла.

С точки зрения теплофизики процесса, на передней поверхности резца целесообразно делать канавки возможно меньшей глубины [98]. Размеры и форма канавки при этом должны обеспечивать свободный сход стружки, без ее вторичного контакта с передней поверхностью инструмента.

Автор [14] заменил плоскую переднюю поверхность криволинейной формой с упрочняющей и стабилизирующей фасками и стружкозавивающей плоскостью, что позволило при той же предельной температуре на передней поверхности увеличить величину подачи вдвое.

Если стойкость инструмента в большей мере определяется износом его задней поверхности, то имеет смысл заранее ограничивать длину контакта этой поверхности с деталью.

Стабилизация температуры при работе инструментами с укороченной задней поверхностью приводит к тому, что радиальный износ такого резца нарастает медленнее, чем резца с плоской задней гранью, а стойкость инструмента увеличивается, что позволяет поддерживать стабильность размеров детали более длительное время. Оптимальная длина, до которой производится укорочение площадки контакта по задней поверхности резца при точении, должна быть различной в разных условиях и увеличиваться с ужесточением режима резания [98].

### 1.3.3 Улучшение теплоотвода в заготовку при несвободном резании

В случае, когда температура задней поверхности меньше температуры передней, обрабатываемая деталь служит охладителем для инструмента. При больших размерах заготовки увеличение теплоотвода из инструмента в заготовку не приносит особого вреда. Но в этом случае имеется возможность суще-

ственно улучшить температурный режим в режущей части инструмента. Одним из методов интенсификации теплоотвода в деталь является создание на инструменте малонагруженных теплоотводящих кромок. Такие кромки, снимая небольшой слой материала, незначительно увеличивают общее количество теплоты, образующейся при резании. Вместе с тем, соприкасаясь с деталью, они способствуют активному теплоотводу из инструмента в ее массу [45].

Теплофизический анализ [98] показывает, что по мере увеличения отношения длины малонагруженной кромки  $q_3$  к подаче  $S$  (рис. 1.10) интенсивность теплоотвода из режущего клина в деталь возрастает, особенно резко при  $b_1 < 2S$ . Отвод теплоты по вспомогательной кромке  $q_3$  почти не влияет на интенсивность теплопередачи от стружки в инструмент  $q_1$ , но снижает интенсивность подвода теплоты к главной задней поверхности  $q_2$ , а следовательно, температуру и износ последней, особенно вблизи вершины резца. При больших длинах малонагруженных кромок ( $b_1 > 2S$ ) возможно, однако, слишком большое повышение температуры на вспомогательной задней поверхности и концентрация износа на этом участке инструмента.

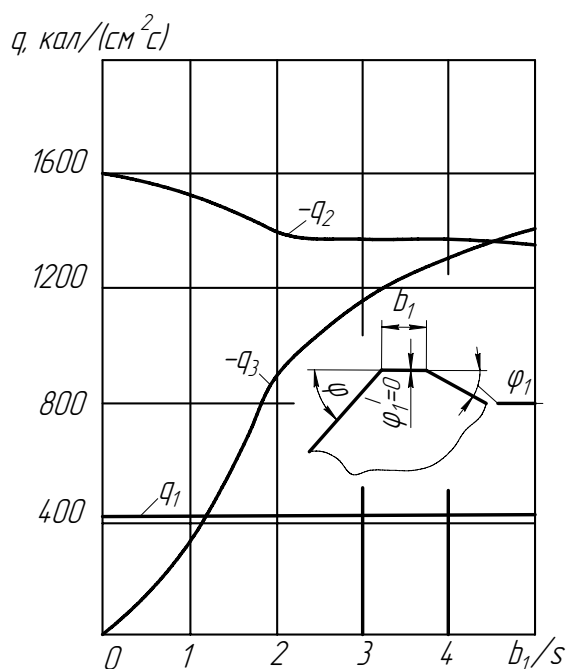


Рис. 1.10 Зависимость интенсивности тепловых потоков через инструмент от отношения  $b_1:S$  при точении (обрабатываемый материал – сталь ШХ15, резец из сплава Т14К8,  $V=60$  м/мин,  $t=3,5$  мм,  $S=0,31$  мм/об) [98]



В ряде случаев на задних поверхностях инструментов, не имеющих мало-нагруженных теплоотводящих кромок, целесообразно создавать малые теплоотводящие фаски с задним углом, близким к  $0^\circ$ , тем более, что это не только улучшает теплообмен, но и содействует снижению вибраций при резании. Размер таких фасок в зависимости от режима работы, свойств режущего и обрабатываемого материалов, назначения и геометрии инструмента может находиться в пределах 0,03–0,15 мм.

Кушнер В.С. в работе [14] считает, что неравномерность износа задних поверхностей при несвободном резании зависит от соотношения радиуса закругления вершины к подаче. Неравномерность износа задних поверхностей уменьшается при уменьшении действительных углов в плане в окрестности вершины на участке (1,5-2,0) S, а при больших подачах переходно-зачищающую кромку он предлагает заменять прямоугольной.

#### 1.4 Схематизация формы тела и расположение источников тепловыделения. Расчет итоговых плотностей теплового потока

Решением задачи теплопроводности является нахождение температурного поля в теле, которое представляет собой совокупность значений температуры во всех точках тела в каждый фиксированный момент времени.

В теле с неравномерным распределением температуры всегда происходит перенос теплоты от более нагретых к менее нагретым частям и возникает тепловой поток – вектор, перпендикулярный к изотерме, но направленный в сторону уменьшения температуры. Поэтому решение задачи аналитического расчета температуры в режущем клине и построение в нем температурных полей основывается, в первую очередь, на правильном определении величины и направления действия плотностей теплового потока, а затем можно рассчитать абсолютное значение температуры.

При аналитических расчетах температурных полей в стружке, инструмен-

те и заготовке тепловые источники, действующие в зоне резания, подвергаются схематизации по методу расположения, форме, закону распределения интенсивности, скорости перемещения и времени функционирования. Геометрическая форма тел, участвующих в теплообмене и теплофизические свойства их материалов также заменяются упрощенными моделями. Затем определяются граничные условия теплообмена на поверхности тела и начальные условия, и для этих условий рассчитывается температура в интересующей точке.

При резании пластичных материалов сливная стружка сплошной лентой проходит по передней поверхности резца. Это дает право представить ее в виде одномерного стержня бесконечной длины, так как при практических применяемых режимах резания скорость перемещения стружки превосходит скорость распространения теплоты. Поэтому считается [96, 122], что влияние источников и стоков, действующих на поверхностях стружки, не распространяется за пределы поверхности сдвига и изменение граничных условий в воображаемой части стержня не влияет на температуру. Исключение составляет источник, эквивалентный работе деформации, так как его теплота передается как стружке, так и изделию.

В узкой области вблизи поверхности сдвига возникает источник теплоты, эквивалентный работе пластической деформации [122]. Известно [18, 25], что напряжения вдоль  $\alpha$  –линии скольжения меняются незначительно. Поэтому вдоль линии сдвига мощность теплового потока распределена равномерно. Интенсивность источников теплового потока определится

$$q_{\partial} = \tau_{cp} \cdot V_{рез} . \quad (1.1)$$

Теплота, возникающая в результате трения на передней поверхности инструмента, определяется касательными напряжениями. Известно [82, 83], что касательные напряжения распределяются равномерно на пластическом участке, а на упругом участке уменьшаются по линейному закону. Поэтому мощность источников теплового потока на пластическом участке определится как

$q_n = \tau_m \cdot \frac{V_{рез}}{\zeta}$ , где  $\tau_m$  -касательное напряжение на пластическом участке;  $V_{рез}$  – скорость резания,  $\zeta$  – усадка стружки. Известно, что при несвободном резании вдоль режущей кромки в каждом сечении меняются условия напряженного состояния, поэтому мощность теплового потока вдоль режущей кромки также будет иметь различные значения.

В работе [97] рассмотрена следующая последовательность расчетов для определения итоговых плотностей теплового потока, действующих в результате взаимодействия всех источников теплоты в зоне стружкообразования.

Для определения режима передачи теплоты быстродвижущимся источником определяется безразмерный критерий Пекле для источника, эквивалентного теплоте деформации:

$$Pe_\delta = \frac{1}{6} \cdot \frac{V_{рез} \cdot l_n}{\zeta \cdot \omega_d} \quad (1.2)$$

где  $V_{рез}$  -скорость резания, м/мин;  $l_n$  -длина контакта на передней поверхности, мм;  $\zeta$  -усадка стружки;  $\omega_d$  –коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала,  $\frac{см^2}{сек}$

Исходя из скорости перемещения и геометрических параметров источника теплоты, определяется параметр, показывающий относительное количество теплоты деформации, уходящее со стружкой:

$$b^* = \frac{1}{1 + 1,33 \cdot \frac{\zeta \cdot \sqrt{\sin \beta_1}}{\sqrt{Pe_\delta}}}, \quad (1.3)$$

где  $\beta_1$ -угол сдвига, определяемый из соотношения  $\sin \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{\sqrt{\zeta^2 - 2\zeta \sin \gamma + 1}}$

При расчете температуры точек, расположенных на контактной площадке стружки с резцом определяется безразмерный критерий R:

$$R = Pe \cdot \frac{\zeta^2 \cdot a^2}{l_n^2} = \frac{1}{6} \cdot \frac{\zeta \cdot V \cdot a^2}{\omega \cdot l_n} \quad (1.4)$$

Температура деформации в зависимости от геометрических параметров и теплофизических характеристик обрабатываемого материала определяется по формуле:

$$\Theta_{\delta} = 0,6 \cdot \frac{\omega \cdot \zeta}{\lambda \cdot V} \cdot b^* \cdot q_{\delta}, \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad (1.5)$$

Автор в работе [14] предлагает определять температуру деформации по формуле:  $\Theta_{\delta} = \frac{\tau_{cp} \cdot \varepsilon_u}{C_V}$ , где  $\varepsilon_u = \frac{\zeta + (1/\zeta) - 2 \sin \gamma}{\cos \gamma}$  - истинный сдвиг;  $C_V$  - теплоемкость обрабатываемого материала.

Средняя температура на контактной поверхности стружки:

$$\Theta_{c_{cp}} = 0,195 \cdot \frac{\sqrt{\omega}}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\zeta \cdot l_n}{V}} \cdot (q_0 \cdot T_{1cp} - 1,41 \cdot q_n \cdot T_{2cp}) + (1 + c) \cdot \Theta_{\delta} \quad (1.6)$$

где коэффициенты  $T_{1cp}$ ,  $T_{2cp}$  определяются по рис. 1.11

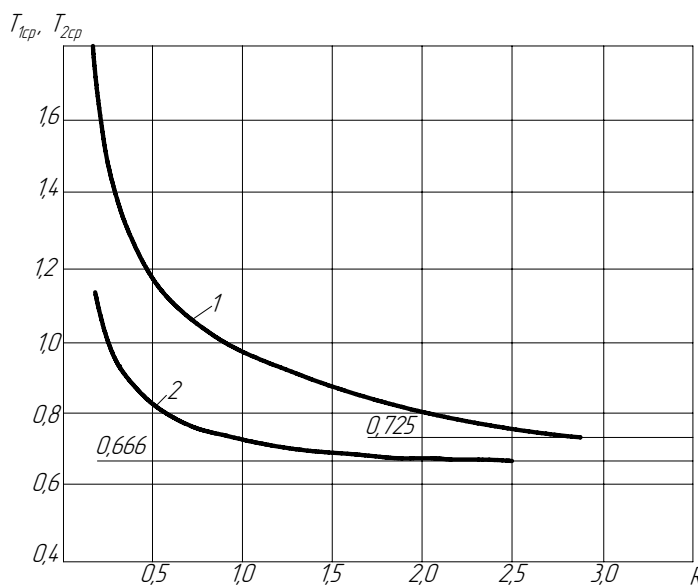


Рис. 1.11 Средние значения функций: 1-  $T_{1cp}$ , 2-  $T_{2cp}$  [97]

Для учета подогрева поверхностных слоев материала из которых образуется стружка, используется коэффициент  $c$ , который также зависит от безразмерного критерия  $\varphi$ , позволяющего учитывать геометрические параметры, скорость перемещения и теплофизические характеристики процесса:

$$\varphi = 1,33 \cdot 10^{-2} \frac{V \cdot a^2}{\omega \cdot d}, \quad (1.7)$$

где  $a$  – толщина срезаемого слоя, мм;  $d$  – диаметр заготовки, мм.

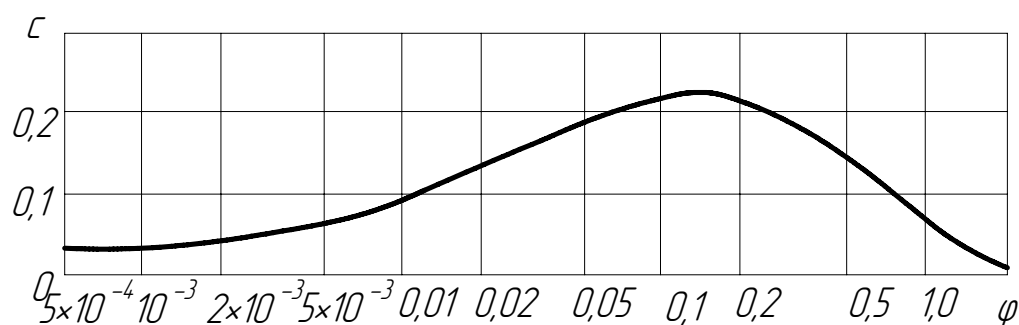


Рис. 1.12 Зависимость коэффициента  $c$  от безразмерного критерия  $\varphi$  для надрезцовой стороны стружки [97]

Средняя температура на контактной поверхности изделия:

$$\Theta_{u_{cp}} \approx (1+c) \cdot \Theta_{\delta} \cdot T_{u_{cp}} + 0,1 \cdot \frac{\sqrt{\omega}}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{l_3}{V}} \cdot (q_1 - 1,82 \cdot q_3) \quad (1.8)$$

где коэффициент  $T_{u_{cp}}$ , (см. рис.1.13) определяется в зависимости от безразмерного критерия  $k$ , который рассчитывается по формуле (1.9):

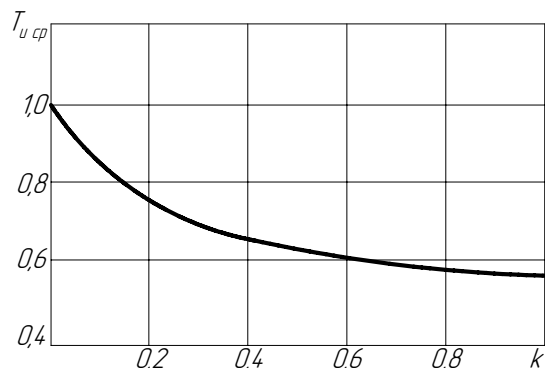


Рис. 1.13 Значение функции  $T_{u_{cp}}$  от безразмерного критерия  $k$  [97]

$$k = \frac{l_3}{a} \cdot \operatorname{tg} \beta_1 \quad (1.9)$$

Средняя температура на контактной площадке:  
передней поверхности резца

$$\Theta_{n_{cp}} = \frac{q_n \cdot l_n}{\lambda_p} \cdot M_1 + \frac{q_3 \cdot l_3}{\lambda_p} \cdot N_2 \quad (1.10)$$

задней поверхности резца

$$\Theta_{з.р.} = \frac{q_n \cdot l_n}{\lambda_p} \cdot N_1 + \frac{q_3 \cdot l_3}{\lambda_p} \cdot M_2, \quad (1.11)$$

где  $M_1$ ,  $M_2$  и  $G$  -коэффициенты, учитывающие взаимовлияние источников тепловыделения определяются по рис. 1.14 в зависимости от угла заострения резца  $\beta$  и безразмерных величин  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ :

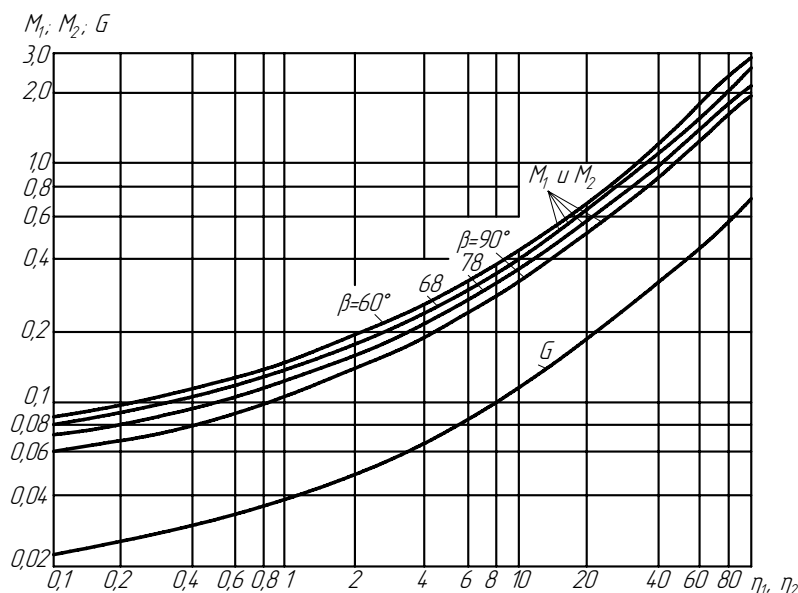


Рис. 1.14 Функции  $M$ ,  $M_1$  и  $G$  в зависимости от угла заострения резца  $\beta$  и безразмерных величин  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  [97]

На данном графике построена функциональная зависимость безразмерных величин, отображающих отношение ширины контактной площадки к длине, которые определяются по формуле:

$$\eta_1 = \frac{b}{l_n} \text{ и } \eta_2 = \frac{b}{l_3} \quad (1.12)$$

где безразмерные функции  $N_1$  и  $N_2$  определяются в зависимости от коэффициента  $G$ :

$$N_1 = B \cdot \left( \frac{l_3}{l_n} \right) \cdot G(\eta_1) \quad (1.13)$$

$$N_2 = B \cdot \left( \frac{l_n}{l_3} \right) \cdot G(\eta_2) \quad (1.14)$$

Пренебрегая изменением температуры вдоль активного участка режущей кромки, температура той же площадки со стороны резца должна равняться средней температуре со стороны задней поверхности:

$$\Theta_{u_{cp}} = \Theta_{з_{cp}} \quad \text{и} \quad \Theta_{n_{cp}} = \Theta_{с_{cp}}$$

Поэтому, определив значения температур, получим систему уравнений с двумя неизвестными  $q_n$  и  $q_з$

$$\begin{cases} (1+c) \cdot \Theta_0 \cdot T_{u_{cp}} + 0,1 \cdot \frac{\sqrt{\omega}}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{l_3}{v}} \cdot (q_1 - 1,82 \cdot q_з) = \frac{q_n \cdot l_n}{\lambda_p} \cdot N_1 + \frac{q_з \cdot l_з}{\lambda_p} \cdot M_2 \\ \frac{q_n \cdot l_n}{\lambda_p} \cdot M_1 + \frac{q_з \cdot l_з}{\lambda_p} \cdot N_2 = 0,195 \cdot \frac{\sqrt{\omega}}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\zeta \cdot l_n}{v}} \cdot (q_0 \cdot T_{1_{cp}} - 1,41 \cdot q_n \cdot T_{2_{cp}}) + (1+c) \cdot \Theta_0 \end{cases} \quad (1.15)$$

Решая полученную систему уравнений (1.15), определяются итоговые плотности теплового потока  $q_n$  и  $q_з$ .

Методика расчета температуры по [14] также основана на методе источников. Ее отличие заключается в том, что для расчета используется суперпозиция температурных полей от равномерно распределенных непрерывно действующих источников и стоков теплоты, аппроксимирующих заданное неравномерное распределение.

На рис. 1.15 показан алгоритм расчета температуры на застойной зоне и фаске износа. Здесь в качестве исходных данных используются теплофизические характеристики материала, механические характеристики материала (действительный предел прочности, максимальное значение безразмерной плотности теплового потока), геометрические параметры инструмента, параметры сечения срезаемого слоя, скорости резания и числа  $N$  разбиения участка фаски износа. Также вычисляются вспомогательные данные  $h_1 = 0,3a$  - высота застойной зоны, безразмерные комплексы  $Pe = \frac{VH_0}{\omega}$ ,  $A_0 = 1,13\sqrt{Pe}$ ,  $A_1 = \frac{\sigma_b}{C_v T_{nl}}$ , где  $V$  - скорость резания,  $\omega$  - коэффициент температуропроводности,  $\sigma_b$  - предел прочности материала при растяжении,  $C_v$  - удельная объемная теплоемкость,  $T_{nl}$  - абсолютная температура плавления обрабатываемого материала.

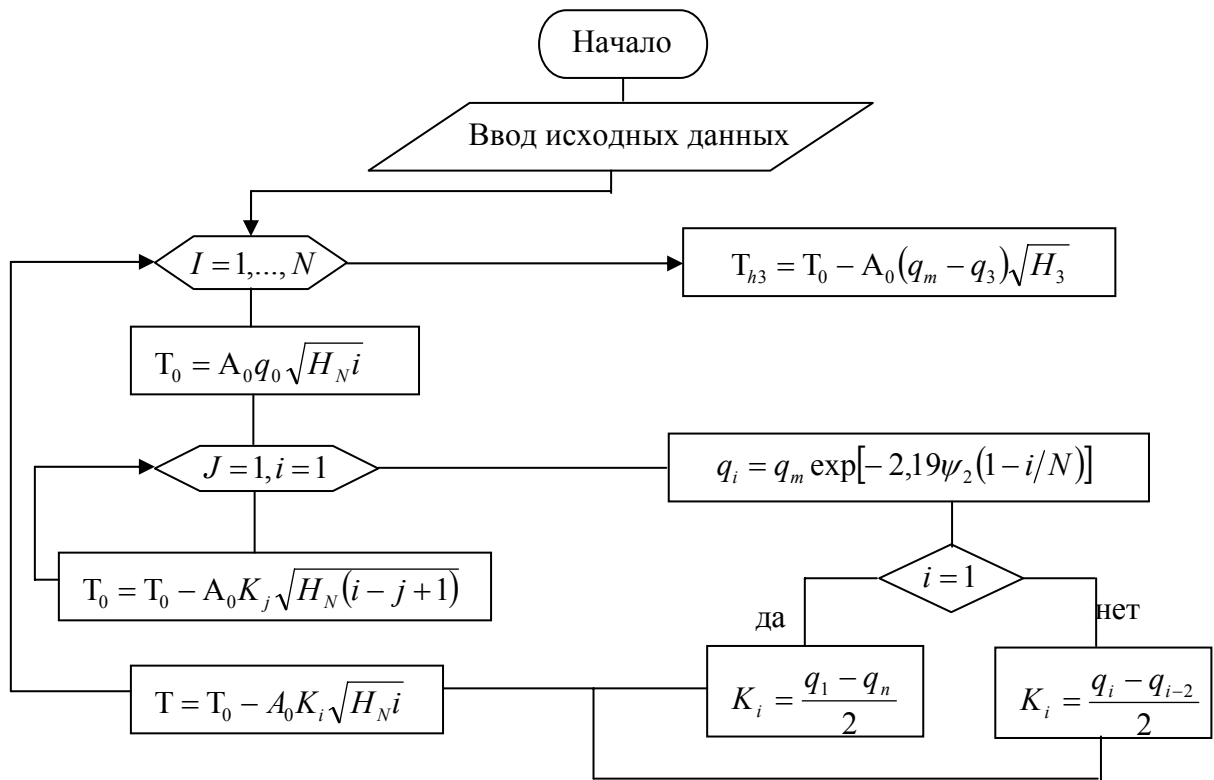


Рис. 1.15 Алгоритм расчета температуры на застойной зоне и фаске износа [14]

В данном алгоритме при расчете температуры в дополнение к равномерно распределенному источнику теплоты плотностью теплового потока  $q_0$ , на каждом интервале, начиная с первого, вводятся дополнительные равномерно распределенные источники или стоки, интенсивность которых определяется по формулам:

$$k_i = \begin{cases} (q_1 - q_0) / 2 \\ (q_i + q_{i-2}) / 2, & i = 2..N; \end{cases} \quad (1.16)$$

$$k_{N+1} = q_3 - q_m \quad (1.17)$$

Температуры в конце  $i$ -го интервала определяются суммированием решений от стоков и источника. Для определения средней температуры интервал по высоте застойной зоны и длине фаски износа разбивают на  $N$  отрезков, вычисляют температуры в конце этих отрезков, повторяя описанную процедуру  $N$  раз.

Расчет температуры на передней поверхности автор проводит с учетом упрочнения материала. Алгоритм расчетов представлен на рис. 1.16.



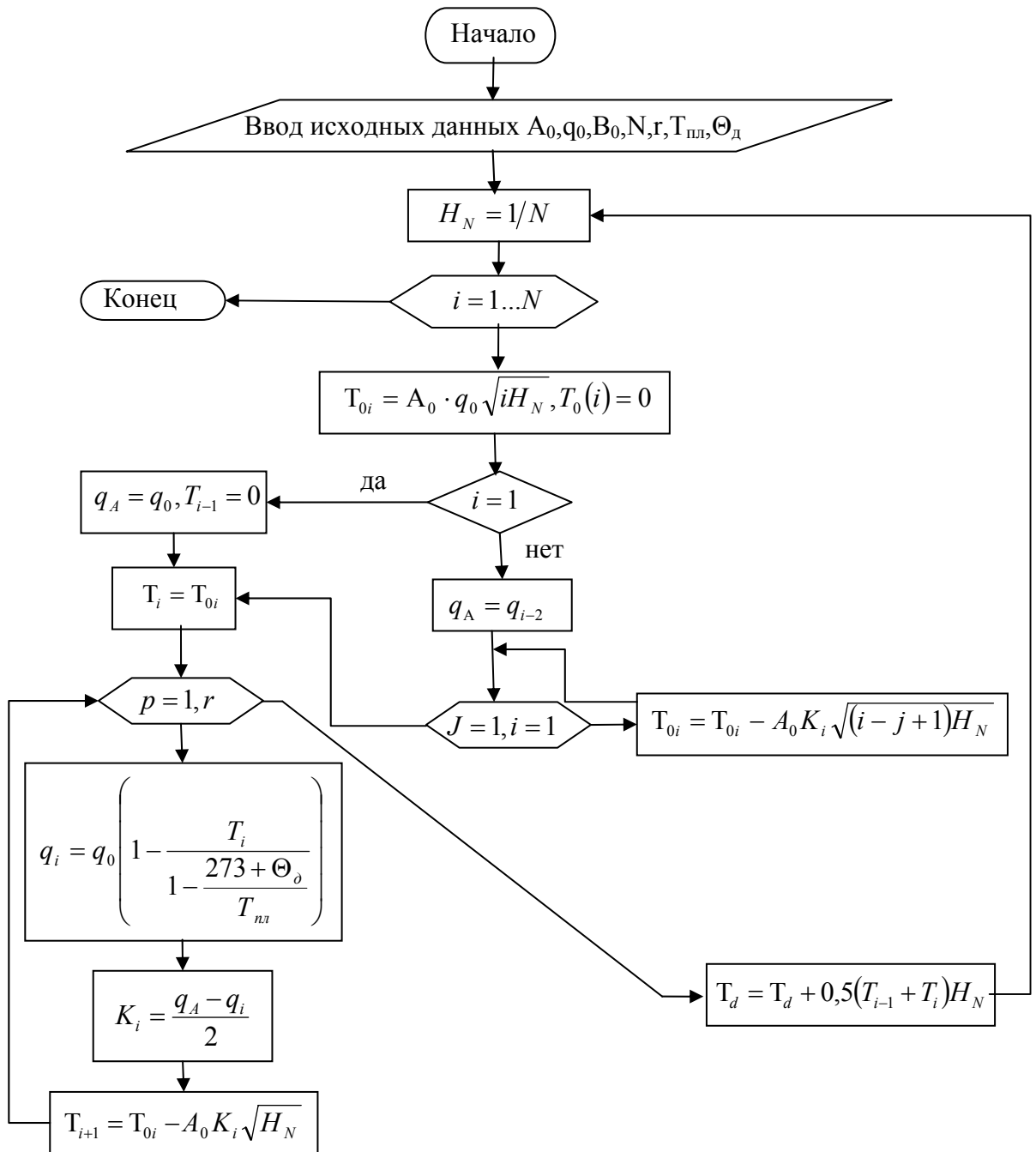


Рис. 1.16 Алгоритм расчета температуры и предела текучести на передней поверхности инструмента [14]

Длина контакта режущего инструмента со стружкой при этом разбивается на три участка: участок упрочнения материала, участок разупрочнения и участок упругого контакта. Длину пластического контакта также разбивают на равное  $N$  количество интервалов. В первом приближении приращение температуры определяется по формуле:

$$T_{10} = A_0 q_0 \sqrt{H_N}, \quad (1.18)$$

$$\text{где } A_0 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} A_1 \sqrt{Pe \frac{l_{nl}}{a} \frac{1}{\zeta} \left(1 - \frac{l_{упроч}}{a}\right)}, \quad A_1 = \frac{\sigma_b}{C_V T_{nl}}, \quad Pe = \frac{V \cdot a}{\omega}$$

Первое приближение для безразмерной плотности теплового потока вычисляется по формуле:

$$q_{11} = q_0 \left(1 - \frac{T_{10}}{1 - T_0}\right)^{B_q} \quad (1.19)$$

Затем определяется мощность стока и температура на участке:

$$K_{11} = \frac{q_0 - q_{11}}{2}, \quad (1.20)$$

Повторяя цикл вычислений  $r$  раз, получаем последующие приближения температуры на пластической длине контакта.

Затем повторяется цикл вычислений по формулам:

$$T_{0i} = A_0 q_0 \sqrt{i H_N} - A_0 q_{1,p} \sqrt{i H_N} \quad (1.21)$$

$$q_{11} = q_0 \left(1 - \frac{T_{i,p-1}}{1 - \frac{273 + \Theta_d}{T_{nl}}}\right)^{B_q}, \quad K_{i,p} = \frac{q_A - q_{i,p}}{2} \quad (1.22)$$

Уточнение температуры в конце  $i$ -го интервала достигается путем итераций по формулам (1.21- 1.22) с введением дополнительного стока теплоты. В результате получаем распределение температуры на участке длины контакта.

### 1.5 Численные методы решения дифференциального уравнения теплопроводности

В связи с развитием вычислительной техники все более широкое применение при описании тепловых процессов в технологической системе находят численные методы решения дифференциального уравнения теплопроводности.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \omega \cdot \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \quad (1.23)$$

где  $\omega = \frac{\lambda}{c\rho}$  - коэффициент температуропроводности вещества, м<sup>2</sup>/с,

В своей основе они являются приближенными методами интегрирования дифференциальных уравнений. Эти методы позволяют учесть больше особенностей конкретного процесса, чем при аналитическом подходе, поскольку не связаны с чисто математическими трудностями, возникающими при аналитических способах решения. Особенно актуальны методы при решении задач расчета температуры несвободного резания, где их применение позволяет учесть геометрические параметры инструмента, зависимость теплофизических характеристик тел, участвующих в теплообмене, контактных нагрузок, величины зоны пластической деформации, скорости движения элементарных объемов срезаемого слоя.

При решении задач технологической теплофизики применяют методы конечных разностей и конечных элементов [104, 122, 127].

Методы численного решения дифференциального уравнения теплопроводности основаны на замене истинных значений производных, входящих в уравнение (1.23), приближенными значениями в некоторых точках, называемых узлами. Узлы являются центрами элементов конечной длины, на которые разбивается твердое тело, участвующее в теплообмене.

При методе конечных разностей тела разбиваются на одинаковые элементы, что вызывает для сложных случаев теплообмена большой объем вычислительной работы, так что процесс счета оказывается очень длительным. Метод конечных элементов (МКЭ) учитывает тот факт, что в любой конкретной задаче разные участки представляют для теории и практики различный интерес.

Контактные площадки на передней и задней поверхностях лезвия должны быть изучены с большей степенью детализации, чем удаленные участки. То есть разбиты на более мелкие элементы. Причем могут быть использованы элементарные объемы, различные не только по величине, но и по конфигурации.

Уравнение энергетического баланса для квазистационарного поля, которое описывает процесс распространения теплоты при резании, имеет следующий вид [122]:

$$A + Q = 0, \quad (1.24)$$

где  $A = \left( \lambda_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right)$ ;  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  – коэффициенты теплопроводности соответственно по осям  $x, y, z$ ;  $Q$  – мощность внутренних источников теплоты.

Уравнение (1.23) может быть решено путем нахождения минимума функционала.

$$\chi(\theta) = \int_V 0,5(2(Q - A)\theta) dV + \int_{S_q} q\theta dS + \int_{S_h} h(0,5\theta^2 - \theta\theta_\infty) dS, \quad (1.25)$$

При этом задаются граничные условия: на верхней границе  $S_T$  распространения теплоты известна температура  $\theta = \theta_S$ ; на участках  $S_q$ , через которые идут потоки теплоты в инструмент, стружку и заготовку  $\lambda \frac{\partial \theta}{\partial p} = -q$  (закон Фурье), где  $q$  – тепловой поток в направлении нормали  $p$ ; на участках  $S_h$  контакта с окружающей средой  $K \frac{\partial \theta}{\partial p} = h\theta_\infty$ , где  $h$  – коэффициент теплоотдачи поверхности  $S_h$ ;  $\theta_\infty$  – температура окружающей среды.

Для нахождения минимума функционала зону резания разбивают на конечные тетраэдральные элементы. Разбитую таким образом зону можно описать информационными массивами-векторами координат узлов элементов и матрицей номеров узлов, связанных в элемент.

Внутри каждого элемента температура  $\theta$  определяется через узловые значения  $[\theta]^e$  с помощью функций формы  $N = [N_i, N_j, N_l, N_m]$ , линейного тетраэдрального элемента следующим образом:  $\theta = [N][\theta]^e = \sum_{i=1}^n N_i T_i$ , где  $[N]$  – матрица функции формы;  $n$  – число узлов в элементе.

Температурное поле всей области определяется через узловые значения температуры  $\theta_i$ , которые обеспечивают минимум функционалу (1.26):

$$\frac{\partial \chi}{\partial \theta_i} = \sum_e \frac{\partial \chi^e}{\partial T_i} = 0 \quad (1.27)$$

Общий алгоритм описания тепловых процессов методом конечных элементов состоит из следующих основных этапов:

1. Схематизация формы тела, источников тепловыделения и граничных условий, расчет итоговых плотностей теплового потока;
2. Разбиение схематизированного тела на элементы;
3. Конкретизация вида функционала, соответствующего дифференциальному уравнению теплопроводности и граничным условиям;
4. Определение численных значений температур в узловых точках тела путем решения системы уравнений с помощью ЭВМ.

## 1.6 Напряженно-деформированное состояние в зоне резания.

### Схемы стружкообразования

В теории резания считается, что вся работа пластической деформации переходит в тепло. Количество выделяемого тепла зависит от степени деформации и от свойств материала. Поэтому для расчета плотностей теплового потока в качестве исходных данных необходимо четкое определение границ зоны пластической деформации и соответственно величины напряжений в зоне стружкообразования и на контактных площадках. Аналитический расчет напряжений зависит от принятой схемы стружкообразования.

Несмотря на определенные успехи в изучении механики резания до сих пор в стадии становления находится адекватная модель процесса резания, описывающая взаимосвязанные явления: напряжения и деформации в зоне стружкообразования и на рабочих поверхностях режущего инструмента, формирование стружки и поверхностного слоя [18].

Описания схемы зоны деформации при резании весьма противоречивы. Это привело к возникновению двух взглядов в подходе решения данного вопроса. Одни исследователи, основывают свои рассуждения на схеме с одной плоскостью сдвига, показанной на рис. 1.15, а. Другие, проводят свои аналитические исследования, как показано на рис. 1.15, б.

Так как пластическая деформация происходит в определенной зоне, а не по плоскости, то для достижения поставленных в данной работе задач рассмотрим предложенные схемы стружкообразования с развитой зоной деформации.

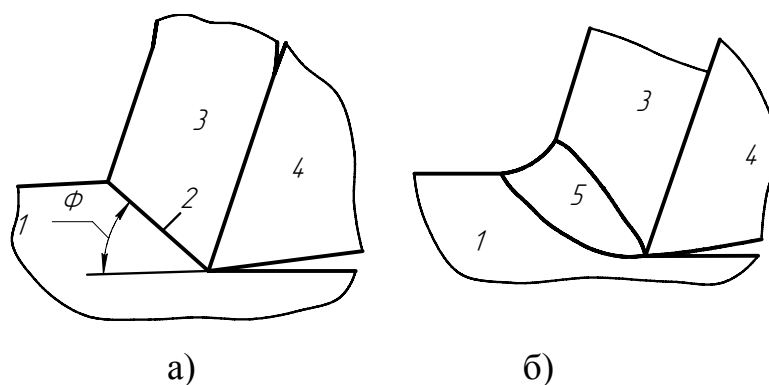


Рис 1.17 Схемы стружкообразования

А. Брикс [5] впервые высказал предположение, что пластические сдвиги в срезанном слое происходят по семейству плоскостей, расположенных веерообразно и проходящих через лезвие инструмента (плоскости  $OA_0, OA_1, OA_2, \dots, OA_n$  на рис.1.18).

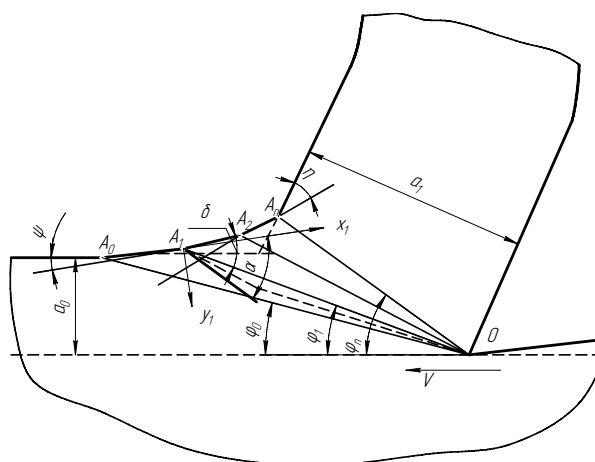


Рис. 1.19. Схема стружкообразования по Бриксу [5].

Основание этому давало наличие наплыва металла в зоне перехода задней поверхности стружки на свободную обрабатываемую поверхность. Предлагаемая А. Бриксом схема стружкообразования явилась несомненным шагом вперед по сравнению схемой с единственной плоскостью сдвига.

Н. Н. Зорев [29], исходя из свойств линий характеристик при пластической деформации, представлял схему стружкообразования как показано на рис. 1.20. Согласно этой схеме, пластическая зона LOM ограничивается линией сдвига OL, вдоль которой происходят первые пластические деформации, линией сдвига OM, вдоль которой происходят последние сдвиговые деформации, и линией LM, которая представляет деформированный участок наружной поверхности среза. Внутри пластической зоны LOM расположено семейство линий скольжения, вдоль которых последовательно осуществляются нарастающие деформации снимаемого слоя.

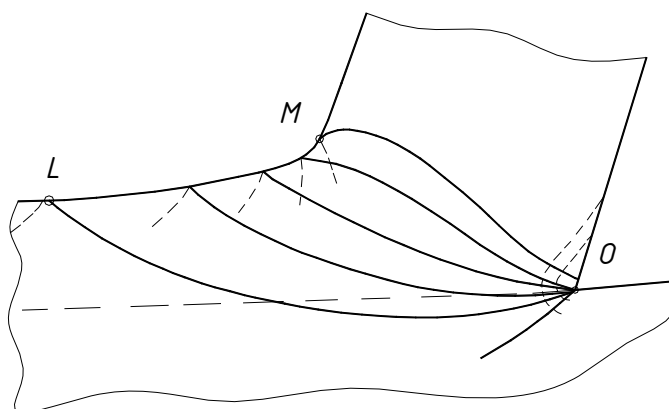


Рис. 1.20 Схематическое изображение линий скольжения в зоне стружкообразования по Н. Н. Зореву [29]

На рис 1.21 показаны предложенные различными авторами схемы полей скольжения при свободном ортогональном резании.

Еще одну схему образования сливной стружки предложил С.И. Петрушин (рис. 1.22) [74], в которой разделены зона первичной деформации, примыкающая к свободной поверхности и зона вторичной деформации, примыкающая к инструменту. Одним из преимуществ данной схемы является четкое аналитиче-

ское описание границ зоны пластичности, которые, зависят от условий трения на передней и задней поверхности и определяются закономерностями распределения контактных напряжений на трущихся площадках между передней поверхностью и стружкой и между задней поверхностью и заготовкой.

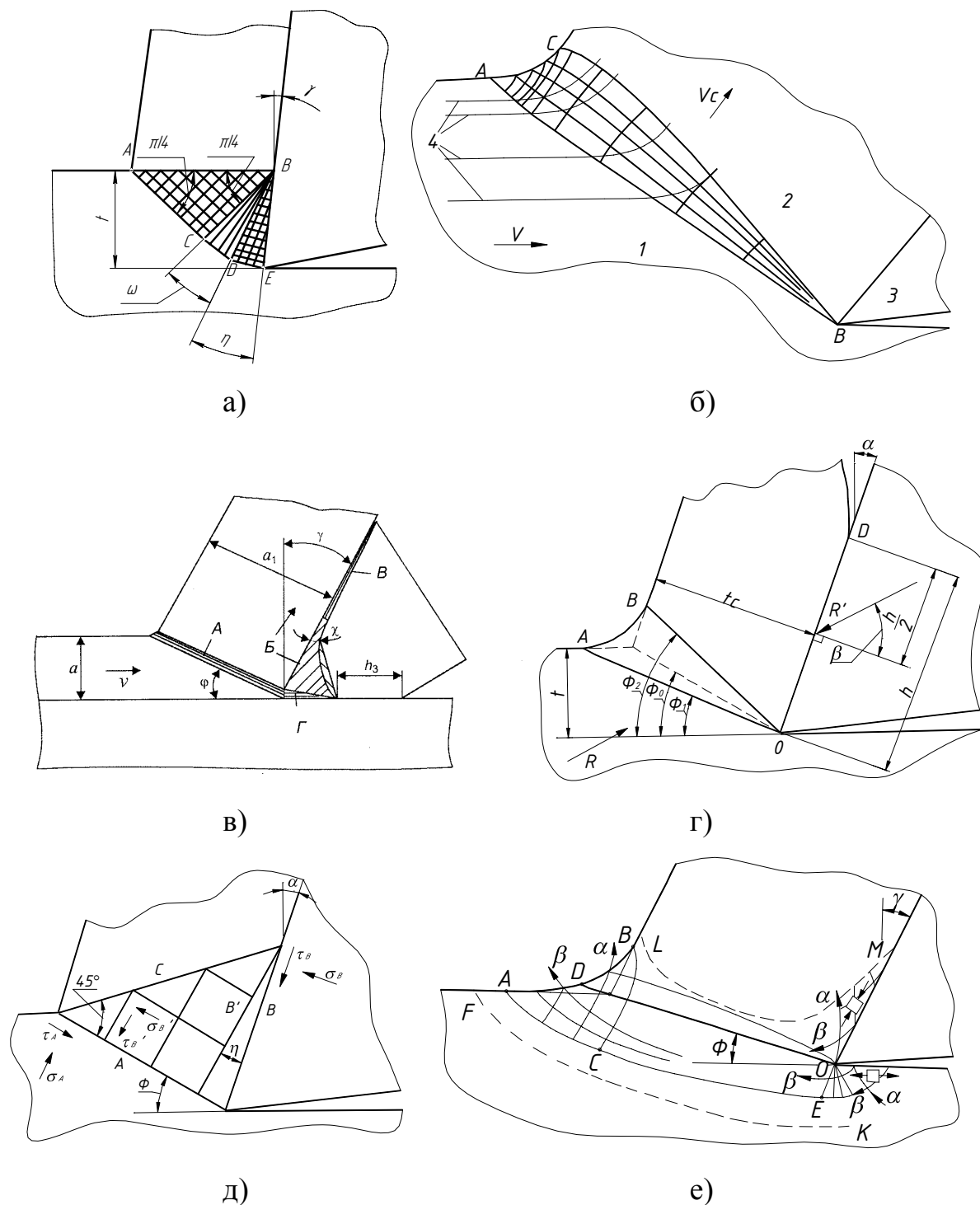


Рис. 1.21 Схемы стружкообразования: а) О.Н. Черменского и Е.Д. Борисова [5]; б) Палмера и Оксли [5]; в) В.С. Кушнера [14]; г) Окушимы и Хитоми [5]; д) Ли и Шафера [5]; е) М.К Гольдшмидта [18]



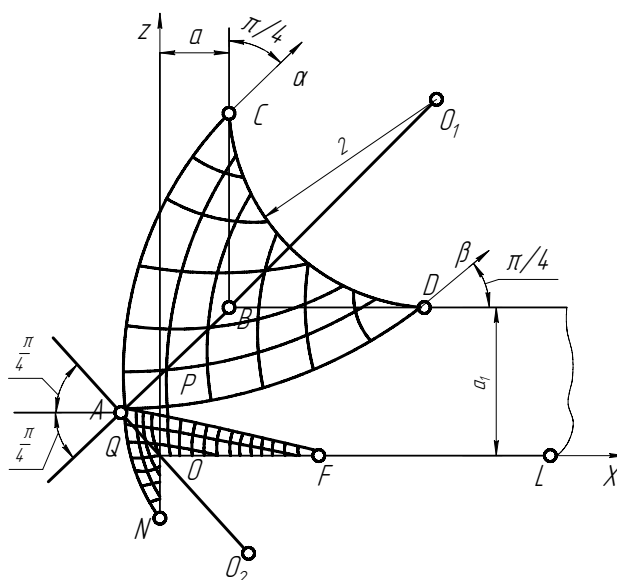


Рис. 1.22 Поле линий скольжения при образовании сливной стружки по [74]

Зона деформаций образована  $\alpha$  и  $\beta$  линиями.  $\alpha$ -линия состоит из нескольких участков: участок CA образован логарифмической спиралью с центром в точке  $O_1$ , участок AQ также спираль с центром в точке  $O_2$ , участок KN определяется из условия соотношений контактных нагрузок на задней поверхности.

$\beta$ -линия имеет участок DA, участок спирали AP и участком PF который определяется нагрузками на передней поверхности.

Граничные  $\alpha$  и  $\beta$  -линии зон первичной и вторичной деформаций имеют общую точку A, которая имеет координаты:  $x_a = -0,5(a_1 - a)$ ,  $z_a = 0,5(a_1 - a)$

После некоторых преобразований схема стружкообразования изображенная на рис.1.22 претерпела некоторые изменения [76], и ее построение производится в следующей последовательности.

Общая длина  $\ell_n$  контакта стружки с передней поверхностью состоит из пластического  $\ell_{nl}$  и упругого  $\ell_{упр}$  участков примерно одинаковой величины. Соответственно, на участке  $\ell_{nl}$  присутствует трение между пластически деформируемым материалом заготовки и передней поверхностью лезвия, а на длине  $\ell_{упр}$  - внешнее трение скольжения между сформировавшейся стружкой и инст-

рументом. Поэтому, для жесткопластической модели обрабатываемого материала поле линий скольжения будет располагаться выше участка  $l_{nl}$  и отсутствовать в стружке на участке  $l_{упр}$ .

Обобщая большой экспериментальный материал [81, 83], полученный проф. М.Ф. Полетикой, автор [74] аппроксимирует распределение нормальных контактных напряжений законом треугольника, а касательные предлагает принять постоянными на пластическом участке, и линейно уменьшающимися до нуля в конце контакта – на упругом (см. рис. 1.23).

Эти зависимости представлены следующими выражениями:

$$\sigma^n = \sigma_m^n \left( 1 - \frac{y_2}{l_n} \right); \quad (1.28)$$

$$\tau^n = \begin{cases} \tau_m^n, & 0 \leq y_2 \leq l_{nl}; \\ \frac{\tau_m^n}{l_n - l_{nl}} (l_n - y_2); & l_{nl} < y_2 < l_n, \end{cases} \quad (1.29)$$

где  $\sigma_m^n$  и  $\tau_m^n$  - максимальные величины соответственно нормальных и касательных контактных напряжений на передней поверхности

Из закона трения Амонтона–Кулона коэффициент трения в рассматриваемой точке контактной поверхности определится отношением касательного контактного напряжения к нормальному в той же точке передней

$$\mu_n = \tau^n / \sigma^n \quad (1.30)$$

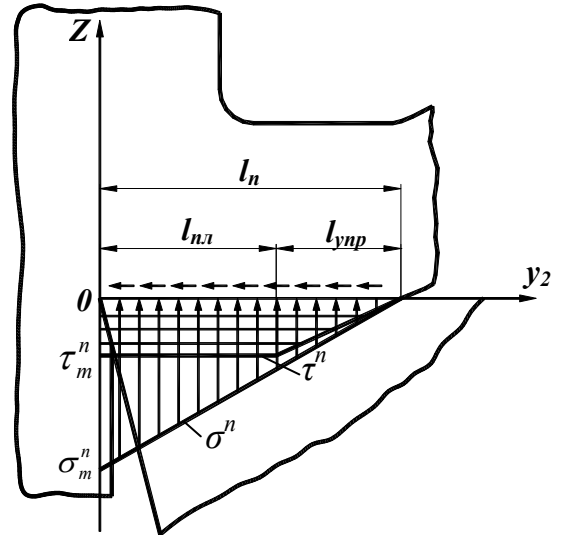


Рис. 1.23 Схема нагружения передней поверхности лезвия контактными напряжениями

Подставив в (1.22) значение контактных напряжений из (1.28) и (1.29) на участке пластического контакта имеем:

$$\mu_n = \frac{\tau_m^n}{\sigma_m^n} \cdot \frac{l_n}{l_n - y_2} = \mu_{no} \cdot \frac{l_n}{l_n - y_2}, \quad (1.31)$$

где через  $\mu_{no}$  обозначено значение коэффициента трения в вершине лезвия.

По условию пластичности максимальная величина касательного напряжения при плоском деформированном состоянии не может быть больше, чем  $0,5\sigma_T$ , поэтому в области пластического контакта  $\mu_n < 0,5$ . Угол трения  $\theta$  на передней поверхности, задающий направление осей главных напряжений в точке А контакта (рис. 1.21), определяется через коэффициент трения известным соотношением:

$$\theta = \operatorname{arctg} \mu_n. \quad (1.32)$$

Направление выхода линий скольжения на контактную поверхность совпадает с линией сдвигов, наклоненных по отношению к главным нормальным напряжениям на угол  $\pi/4$ .

Отсюда следует, что углы выхода линий скольжения в зоне пластического контакта равны (см. рис. 1.24):

для  $\alpha$  - линий скольжения:

$$\theta_1 = \frac{\pi}{4} + \theta = \frac{\pi}{4} + \operatorname{arctg} \mu_n; \quad (1.33)$$

для  $\beta$  - линий скольжения:

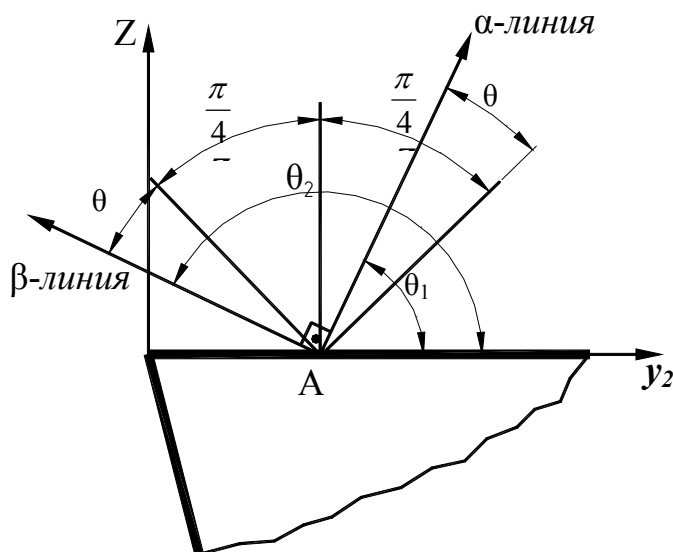


Рис. 1.24. Схема расчета углов выхода линий скольжения на контактную поверхность

$$\theta_2 = \frac{3\pi}{4} + \theta = \frac{3\pi}{4} + \text{arctg} \mu_n. \quad (1.34)$$

Тангенсы этих углов представляют собой дифференциальные уравнения линий скольжения:

$$\alpha - \frac{dz}{dy_2} = \text{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \text{arctg} \mu_n \right) = \frac{1 + \mu_n}{1 - \mu_n}; \quad (1.35)$$

$$\beta - \frac{dz}{dy_2} = \text{tg} \left( \frac{3\pi}{4} + \text{arctg} \mu_n \right) = -\text{ctg} \left( \frac{\pi}{4} + \text{arctg} \mu_n \right) = -\frac{1 - \mu_n}{1 + \mu_n}. \quad (1.36)$$

Уравнения граничных линий скольжения на которых обрабатываемый материал переходит из упругого в пластическое состояние и наоборот для значений  $\alpha$  и  $\gamma$  равными нулю имеют вид:

$$\alpha - z = y_2 + 2\mu_{n0}l_n \cdot \ln \left| \frac{l_n(1 - \mu_{n0})}{(1 + \mu_{n0})l_n - y_2} \right| \quad (1.37)$$

$$\beta - z = l_{nn} - y_2 + 2\mu_{n0}l_n \cdot \ln \left| \frac{l_{ynp} + \mu_{n0}l_n}{(1 + \mu_{n0})l_n - y_2} \right| \quad (1.38)$$

Аналогичный вид имеют формулы для граничных линий скольжения со стороны задней поверхности. Участок ВС образован частью окружности радиусом в точке 0, радиус которой определяется точкой пересечения граничных линий скольжения. Участок СК расположен эквидистантно  $\alpha$ -линии ON, описываемой уравнением (1.37). Кривые KL и KM представляет собой части логарифмических спиралей. Измененная модель стружкообразования представлена на рис.1.25.

Данная схема применима только для случая  $\alpha = \gamma = 0$  и, к сожалению, уравнения, описывающие границы зон пластичности, не учитывают изменение

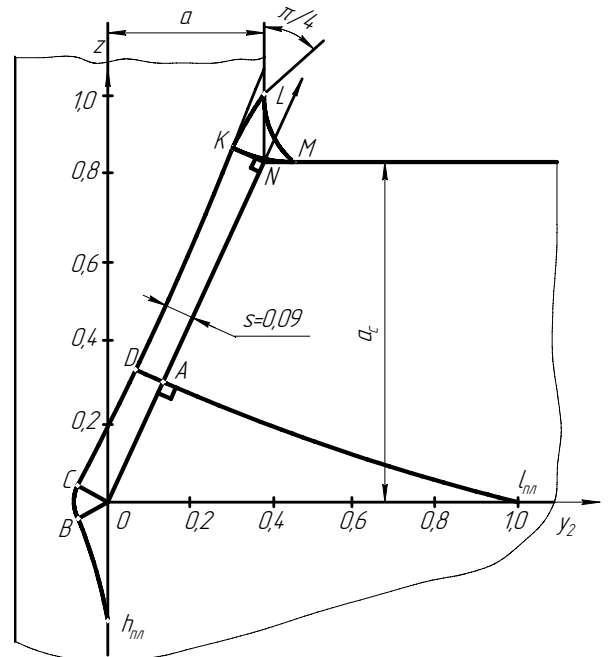


Рис. 1.25 Измененная модель образования сливной стружки по [76]

геометрии режущего клина. Поэтому вышеописанная схема требует некоторых уточнений (см. главу 2).

Точное теоретическое решение задачи определения напряженно-деформированного состояния можно получить для жестко-пластической модели обрабатываемого материала без упрочнения. В этом случае построенное поле линий скольжения в пластической области однозначно связано с напряженным состоянием в ней. Изменение среднего напряжения вдоль линий скольжения пропорционально углу ее поворота [32, 49, 114, 126]:

$$\sigma_{cp,k} = \sigma_{cp,L} \pm 2k \cdot w_{LK}, \quad (1.39)$$

где  $L$  и  $K$  – две точки линии скольжения (см. рис.1.22);

$w_{LK}$  - угол поворота линии скольжения при переходе от точки  $M$  к точке  $N$ ;

$k$  - максимальная величина касательных напряжений при пластической деформации.

Для плоской схемы деформации состояния величина  $k$  равна [97]:  $k = \frac{\beta \cdot \sigma_T}{2}$

где  $\sigma_T$  - предел текучести обрабатываемого материала, МПа;

$\beta$  - коэффициент, зависящий от вида состояния: для плоско-напряженного состояния  $\beta = 1$ ; для плоско-деформированного состояния -  $\beta = 2/\sqrt{3} \approx 1,15$  [114].

По известному среднему напряжению в рассматриваемой точке линии скольжения можно рассчитать компоненты напряжений для плоской задачи [32]:

$$\begin{aligned} \sigma_{y_2} &= \sigma_{cp} + k \sin 2w; \\ \sigma_z &= \sigma_{cp} - k \sin 2w; \\ \tau_{yz} &= -k \cos 2w. \end{aligned} \quad (1.40)$$

где  $w$  - угол между касательной к линии скольжения и осью  $y_2$  в данной точке.

### 1.7 Определение направления схода стружки при несвободном резании закругленным лезвием

Для полного описания напряженно-деформированного состояния зоны стружкообразования при несвободном резании расчет напряжений в стружке и на контактных площадках, а также тепловых полей, целесообразно производить по сечениям, произведенным в направлении схода стружки.

Аналитическим определением направления схода стружки при несвободном резании занимались многие отечественные ученые: Куфарев Г.Л., Окенов К.Б., Говорухин В.Д., Зорев Н.Н., Розенберг Ю.А. и др., которые получили результаты, подтверждающие экспериментальные данные. Однако, вопрос о расчете направления схода стружки при несвободном резании округленным лезвием рассмотрен недостаточно широко. При определении выражения для расчета угла схода  $\eta$  при ортогональном несвободном резании автор [76] раскладывает силу, действующую на срезаемый элемент стружки со стороны условной поверхности сдвига (УПС), на составляющие, направленные параллельно осям  $x$  и  $y$  (рис. 1.22). Под действием этих сил стружка на начальном участке будет двигаться в направлении равнодействующей

$$\operatorname{tg} \eta = P_y^c / P_x^c. \quad (1.41)$$

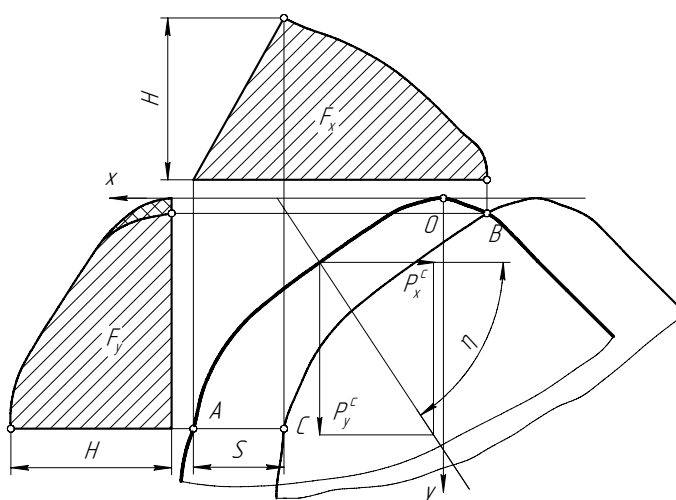


Рис. 1.22 Схема к определению начального угла схода стружки при ортогональном несвободном резании

В свою очередь, составляющие сил определяются выражениями:

$$P_y^c = \int_{F_x} \sigma_{сдв} \cdot dF_x; \quad (1.42)$$

$$P_x^c = \int_{F_y} \sigma_{сдв} \cdot dF_y, \quad (1.43)$$

где  $\sigma_{сдв}$  - напряжения на условной поверхности сдвига, ориентированные перпендикулярно оси  $z$ . Закон распределения этих напряжений вдоль оси  $Oz$  одинаков для любой точки режущей кромки и имеет вид  $\sigma_{сдв} = \sigma_{max} \cdot k(z)$ , где  $k(z)$  - некоторая функция, зависящая только от координаты  $z$ . Тогда, подставляя это выражение в (1.42) и (1.43), а затем в (1.41), имеем

$$\eta = \arctg\left(\frac{F_x}{F_y}\right) \quad (1.44)$$

где  $F_x$  – проекция УПС на плоскость  $xOy$  станочной системы координат;

$F_y$  - проекция УПС на плоскость  $yOz$ .

Отсюда следует, что при сделанном допущении определение угла схода стружки сводится к расчету площадей проекций УПС на координатные плоскости.

## 1.8 Цель, задачи и этапы исследования

На основе выводов и приведенных материалов установлено, что путем управления геометрическими параметрами режущего клина и управления температурным режимом вдоль режущей кромки можно создать условия равномерного изнашивания задних поверхностей.

В результате проведения анализа, публикаций в отечественной и зарубежной печати, патентных материалов можно сделать следующие выводы:

1. При несвободном резании на задней поверхности наблюдается неравномерное изнашивание контактной площадки, что приводит к неполному использованию ресурса инструмента.
2. Одним из определяющих факторов изменения износа задней поверхности для изотропного инструментального материала является неравномерное

распределение температуры на площадках контакта режущего инструмента со стружкой и с обрабатываемой заготовкой, которая меняет интенсивность изнашивания при нагреве.

3. Форма и геометрия режущей части инструмента в значительной мере влияет на распределение тепловых потоков. Одним из путей повышения стойкости инструмента является равномерное изнашивание задних поверхностей за счет применения рациональной формы режущего клина, изменяющей величины и направления тепловых потоков.

**Цель работы:** обеспечение равномерности изнашивания задних поверхностей резцов со сменными многогранными пластинами путем управления геометрией и тепловыми потоками в лезвии.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи исследования:

- 1) разработать методику численного расчета напряжений в зоне резания и на контактных площадках режущего клина при несвободном резании, позволяющую учитывать изменение геометрических параметров режущего клина;
- 2) разработать методику расчета температурных полей в режущем клине при несвободном резании лезвием с закругленной вершиной;
- 3) экспериментально определить тепловые поля на поверхности инструмента при наружном точении и проверить достоверность расчетных данных;
- 4) на основе расчетов температуры и результатов экспериментов разработать новые формы сменных многогранных режущих пластин, обеспечивающих равномерное изнашивание по задней поверхности;
- 5) провести сравнительное экспериментальное исследование эксплуатационных характеристик СМП предложенной конструкции.

Решение указанных задач осуществляется путем проведения теоретических и экспериментальных исследований, конструкторских разработок и внедрения их в производство.



### Глава 3 РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ РЕЗЦА

#### 3.1 Расчет итоговых плотностей теплового потока

Для решения дифференциального уравнения теплопроводности задают граничные условия, которые бывают нескольких видов. Граничные условия первого рода задают в виде распределения температуры на поверхности тела, а второго рода в виде распределения плотности теплового потока для каждой точки поверхности. Учитывая сложную геометрию режущего инструмента при несвободном резании на первом этапе расчета температуры при несвободном резании необходимо произвести расчет итоговых плотностей теплового потока, которые образуются в результате действия нескольких источников образования тепла. Здесь нужно определить величину источников тепловыделения, их форму и скорость перемещения тел, участвующих в теплообмене.

При расчете итоговых плотностей теплового потока использовалась часть методики Н.Н. Резникова [97], основанная на методе точечных источников. Последовательность вычислений была описана в п.1.4. По этой методике была составлена программа в среде математического пакета Mathcad (Приложение 2). В качестве исходных данных в данной программе используются следующие величины:

-теплофизические характеристики

- а) коэффициенты теплопроводности обрабатываемого  $\lambda_d$  ( $Bm/m \cdot K$ ) и инструментального материалов  $\lambda_u$  ( $Bm/m \cdot K$ )
- б) коэффициенты температуропроводности обрабатываемого  $\omega_d$  ( $mm^2/c$ ) и инструментального материалов  $\omega_u$  ( $mm^2/c$ );

-геометрия режущего клина

- а) передний угол  $\gamma^\circ$
- б) задний угол  $\alpha^\circ$ ;

-параметры режимов резания

а) толщина срезаемого слоя  $a$  (мм),

б) скорость резания  $V$  (м/мин)

-параметры сопутствующие процессу резания

а) величина усадки –  $\zeta$

б) длины контакта площадок передней  $l_{полн}$  (мм), и задней  $h_{задн}$  (мм) поверхностей, ширина контактной площадки  $b$  (мм)

в) касательное напряжение  $\tau_{max_n}$  (МПа)  $\tau_{max_s}$  (МПа) на контактных поверхностях

г) среднее напряжение в зоне стружкообразования  $\sigma_{cp}$  (МПа)

С помощью разработанной программы с использованием исходных расчетных напряжений свободного резания, описанных в п.2.3 (см. рис. 2.8 - 2.12), для разных значений переднего угла, найдены итоговые плотности теплового потока в инструмент  $q_1$  и в заготовку  $q_2$ . На рис. 3.1 по полученным значениям построена зависимость расчетных значений плотностей теплового потока на передней и задней поверхностях от переднего угла (рис. 3.1). Из графиков видно, что с увеличением переднего угла  $\gamma$  плотности теплового потока в инструмент  $q_1$ , и в заготовку  $q_2$  уменьшаются. Знак перед величиной плотности теплового потока отражает направление потока. Минус задает направление потока в заготовку, плюс – в инструмент.

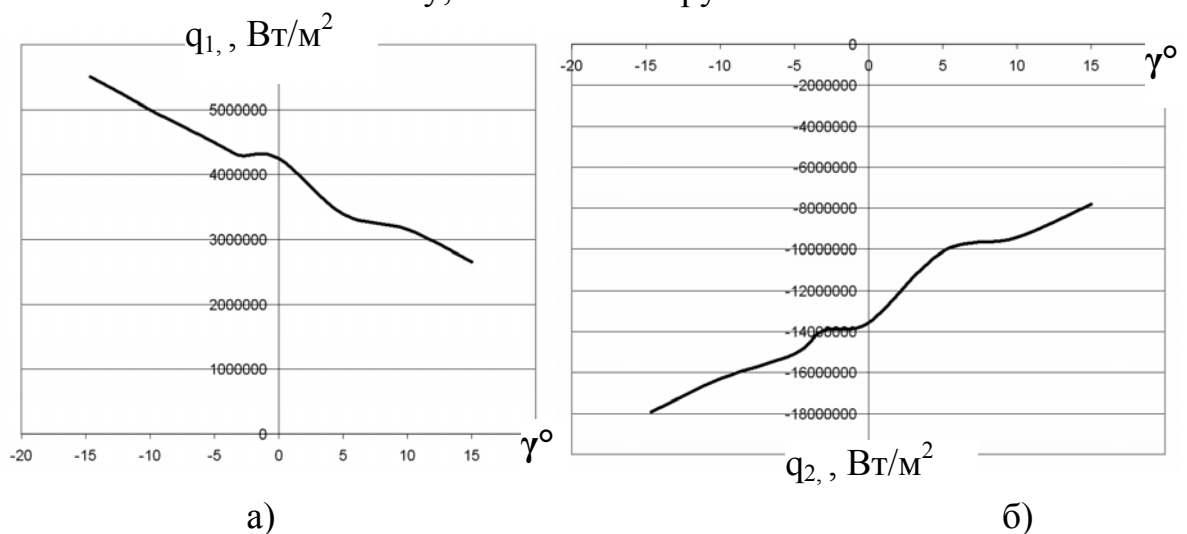


Рис 3.1 Зависимость изменения итоговых плотностей теплового потока от величины переднего угла  $\gamma$  Сталь 30X,  $V=100$  м/мин,  $a=0,149$  мм,  $b=5$  мм:

а) в инструмент  $q_1$ , б) заготовку  $q_2$

В отличие от свободного резания прямолинейной режущей кромкой, при несвободном резании, обработка производится закругленным лезвием с использованием части вспомогательной режущей кромки. Так как в результате того, что в каждом сечении, взятом в направлении схода стружки, действуют источники тепловыделения различной интенсивности (Рис. 3.2), то и расчет итоговых плотностей  $q_1$  и  $q_2$  нужно производить дифференцированно, т. е. производить их вычисления в каждом сечении отдельно. Причем, при определении итоговых плотностей в сечениях, произведенных в направлении схода, безразмерные величины, определяющие отношение ширины контактной площадки к длине контакта по передней и задней поверхностям  $\eta_1 = \frac{b}{l_n}$  и  $\eta_2 = \frac{b}{l_3}$ , в каждом сечении необходимо принимать усредненно.

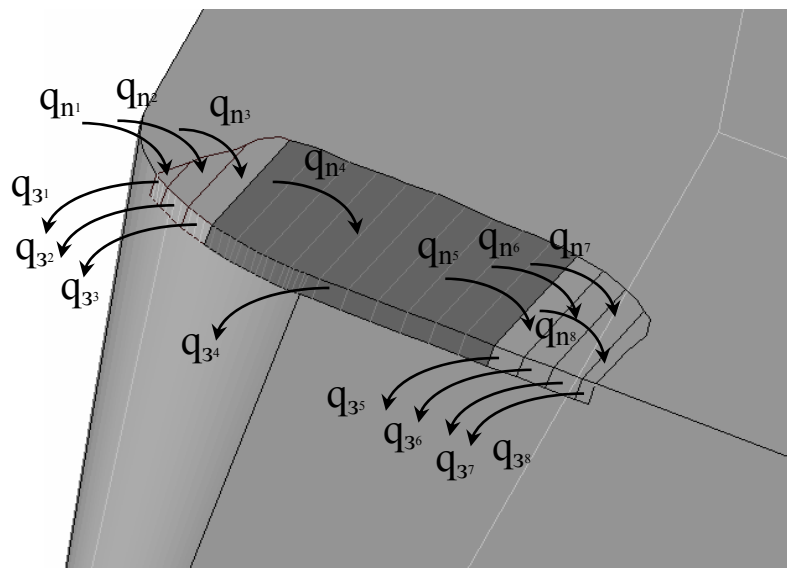


Рис. 3.2 Направление тепловых потоков при несвободном резании

Расчет температурных полей проводится при продольном точении вала диаметром 120 мм из стали 45 ( $\sigma_T=360\text{МПа}$ ) резцом с четырехгранной сменной пластиной из твердого сплава T5K10 SPGN 16 05 08 по ГОСТ19044-80 со скоростью резания  $V=100$  м/мин.

Теплофизические характеристики необходимые для расчета:  
 обрабатываемый материал – сталь 45  $\lambda_{\partial}=40,2$  Вт/(м°С),  $\omega_{\partial}=0,08 \times 10^4$  м<sup>2</sup>/с;  
 инструментальный материал – Т5К10  $\lambda_{и}=38,5$  Вт/(м°С),  $\omega_{и}=0,144 \times 10^4$  м<sup>2</sup>/с

Характеристики, сопутствующие процессу резания, для расчета итоговых плотностей теплового потока возьмем из таблицы 2.2 и таблицы 2.3 (см. главу 2). В предыдущей главе уже был рассмотрен пример расчета контактных напряжений для условий несвободного резания, где контактная площадка была разбита на четыре характерных сечения. Для каждого сечения с помощью программы (см. Приложение 2) произведен расчет плотностей тепловых потоков. Все рассчитанные по сечениям значения  $q_1$  и  $q_2$  занесены в табл. 3.1

Расчетные значения плотностей теплового потока в сечениях Таблица 3.1

Итоговые плотности теплового потока, кВт/м <sup>2</sup>	Сечение			
	А-А	Б-Б	В-В	Г-Г
$q_1$	10972,21	7616,607	7033,447	7068,617
$q_2$	-26881,062	-18370,690	-16674,575	-17385,533

В связи с тем, что нас интересует распределение температуры на поверхностях СМП, то дальнейший расчет температурных полей наиболее целесообразно проводить методом конечных элементов. Метод позволяет учесть максимально возможное количество геометрических особенностей объекта, его конструкцию и материал. Расчет этим методом требует больших объемов математических вычислений, поэтому реализуется на персональном компьютере.

Существует ряд пакетов программ, реализующих алгоритм вычислений МКЭ, одной из которых является программа «ANSYS DesignSpace». Она позволяет рассчитывать температуру как на поверхности, так и внутри твердотельной модели, разбитой на конечные элементы при заданных теплофизиче-

ских характеристиках материала и граничных условиях с необходимой точностью вычислений.

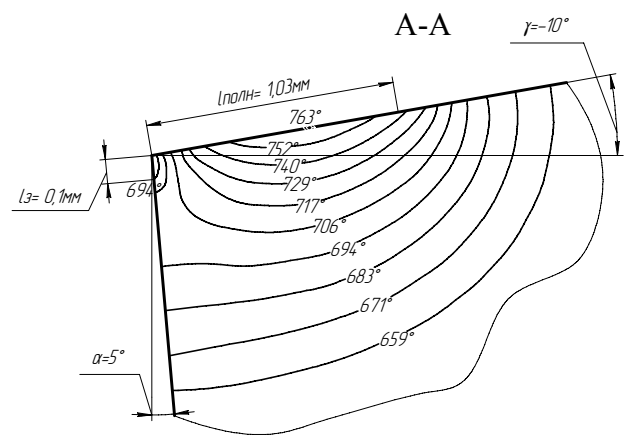
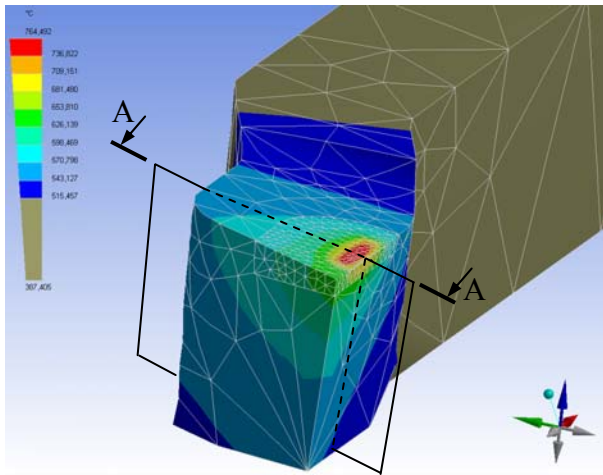
### 3.2 Расчет температуры на поверхностях резца методом конечных элементов при свободном резании

Расчет температуры проведен на основе экспериментальных данных Зорева Н.Н. [29] (см. п. 2.4.) для свободного течения Стали 30Х при разных значениях переднего угла.

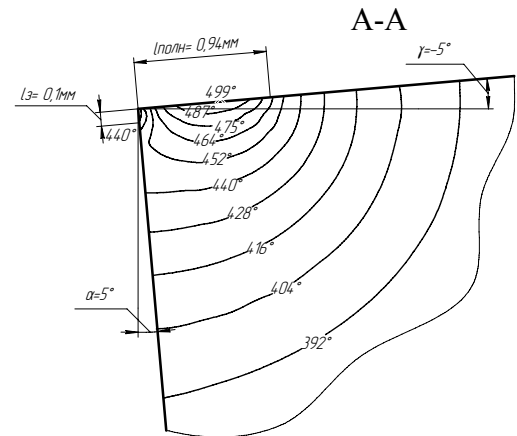
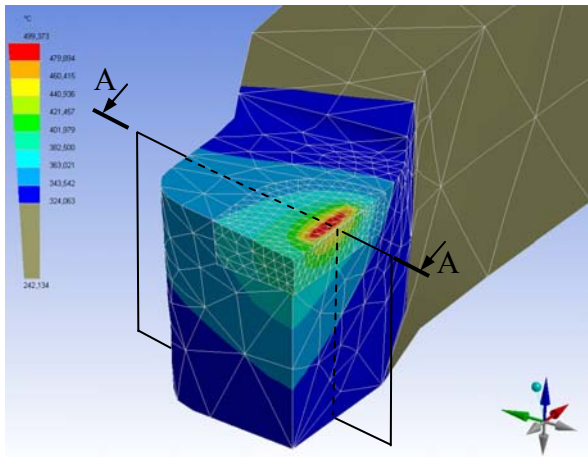
Предварительно были построены объемные модели токарных резцов, состоящих из двух частей: корпуса резца и режущей пластины в формате «STL». На передней и задней поверхностях моделей режущих пластин строились контактные площадки. Таким образом, были построены 5 разных моделей, каждая из которых имела разные значения передних углов  $\gamma = (-10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ)$ . Модели резцов заносили в программу «ANSYS DesignSpace», где державке и режущей пластине задавались характеристики коэффициентов теплопроводности. Для корпуса резца из стали 45 коэффициент теплопроводности  $\lambda = 40,2 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$ , для режущей пластины из твердого сплава Т15К6  $\lambda = 27,2 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$ .

Далее производилось генерирование сетки конечных элементов. С целью сокращения объемов и времени вычислений, разбиение на конечные элементы производилось неравномерно. В связи с поставленными задачами размеры конечных элементов режущей пластины выбирались меньше, чем на корпусе. Также размеры конечных элементов подбирались из условий, что при изменении количества элементов на один порядок, результаты вычислений отличаются не более чем на 1-2%,

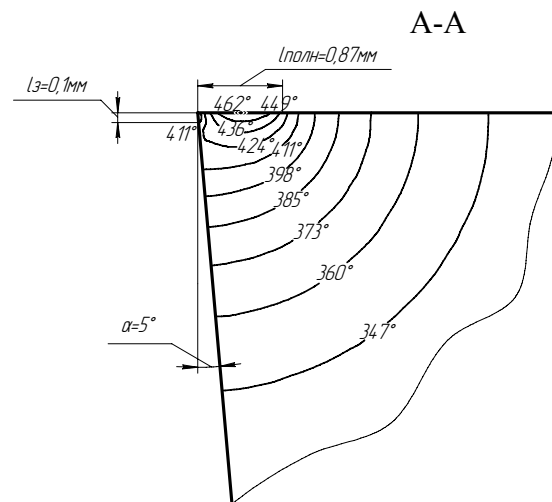
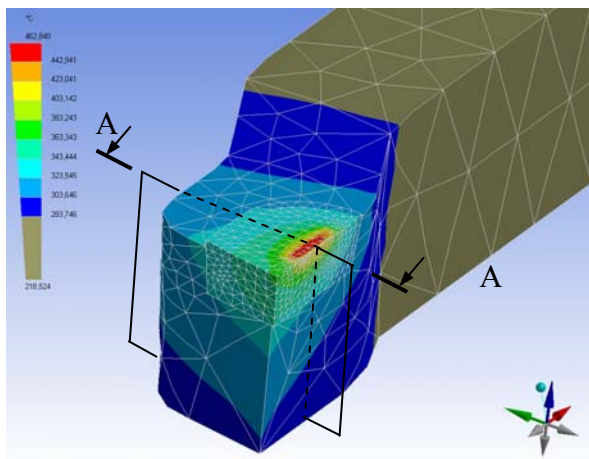
На контактных площадках передней и задней поверхностей построенной модели задавались определенные для данных условий резания плотности тепловых потоков  $q_1$  и  $q_2$ . Результаты расчетов представлены на рис. 3.3



а)



б)



в)

Рис.3.3 Температурные поля для свободного резания: Сталь 30Х,  $V=100$ ; м/мин;  $a=0,149$  мм;  $b=5$  мм; а)  $\gamma=-10^\circ$ , б)  $\gamma=-5^\circ$  в)  $\gamma=0^\circ$

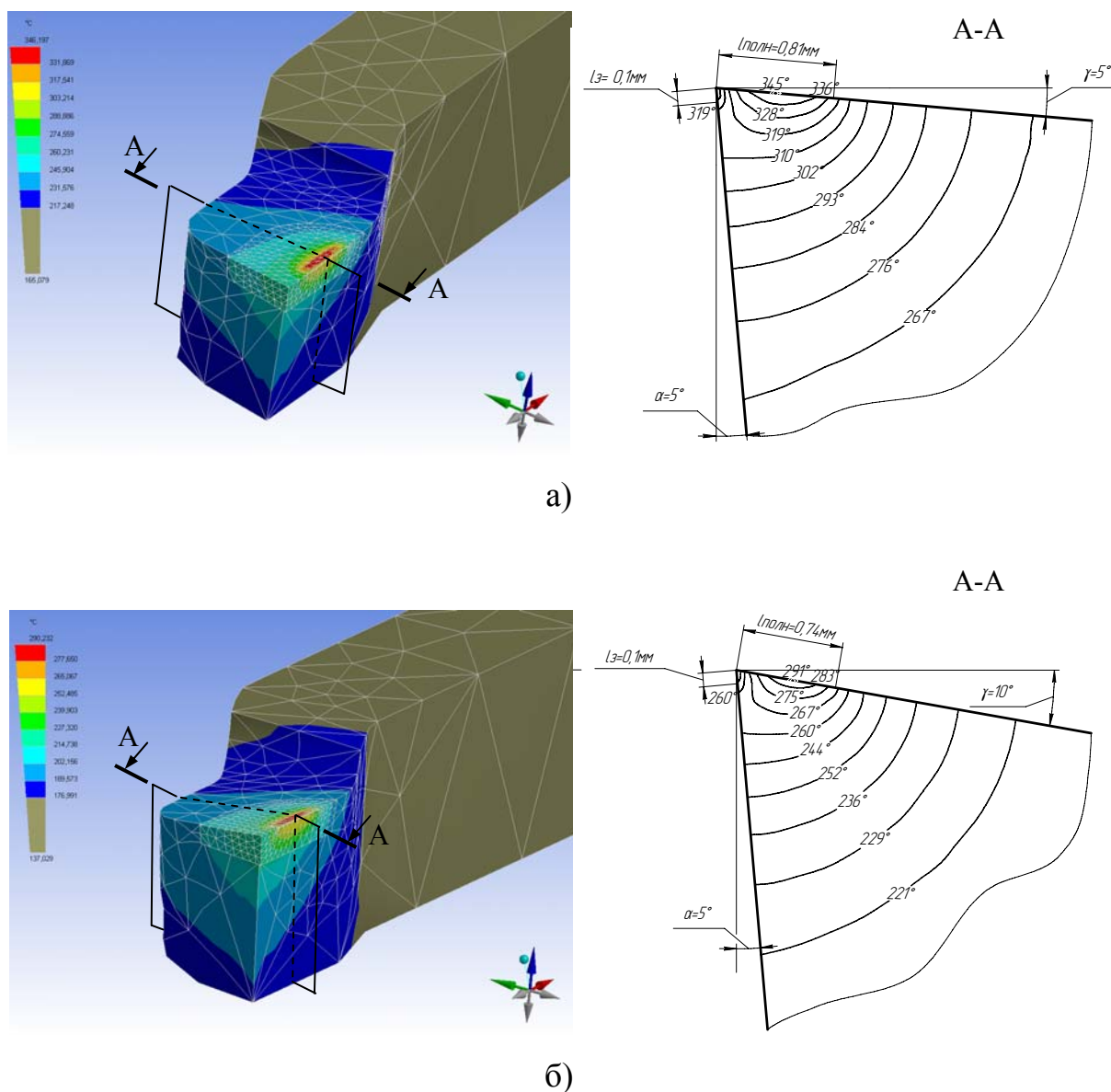


Рис.3.3 Температурные поля для свободного резания: Сталь 30X,  $V=100$ ; м/мин;  $a=0,149$  мм;  $b=5$  мм; а)  $\gamma=5^\circ$  б)  $\gamma=10^\circ$

Из произведенных расчетов видно, что при увеличении переднего угла максимальное значение температуры на передней поверхности смещается в зону упругого контакта. Результаты вычислений показали, что предложенная методика хорошо соотносится с экспериментальными данными [29]. Это позволяет сделать вывод, что предложенную методику можно применять для более сложных задач определения тепловых полей.

### 3.3 Расчет температуры на поверхностях резца методом конечных элементов при несвободном резании

По методике, рассмотренной в предыдущем пункте, был проведен расчет температуры при несвободном резании. В предыдущих главах были определены напряжения в сечениях режущего лезвия (см. п.2.6) и итоговые плотности тепловых потоков  $q_1$  и  $q_2$  (см. табл. 3.1).

После этого была построена твердотельная модель резца в реальных размерах, состоящая из корпуса, зажимных элементов и режущей пластины. (рис.3.4). Для корпуса и крепежных элементов пластины был принят коэффициент теплопроводности Стали 45 -  $\lambda=40,2$  Вт/(м<sup>°С</sup>), для инструментального материала Т5К10 –  $\lambda=38,5$  Вт/(м<sup>°С</sup>). На твердотельной модели режущей пластины отображены контактирующие со стружкой площадки, которые были разбиты на сечения в соответствии с произведенными ранее расчетами по определению контактных напряжений и плотностей теплового потока. На каждую из частей площадок приложены с учетом знака величины плотностей теплового потока  $q_{1i}$  и  $q_{2i}$ . Построенная модель разбивалась на конечные элементы (см. рис. 3.4) и производился расчет температурных полей.

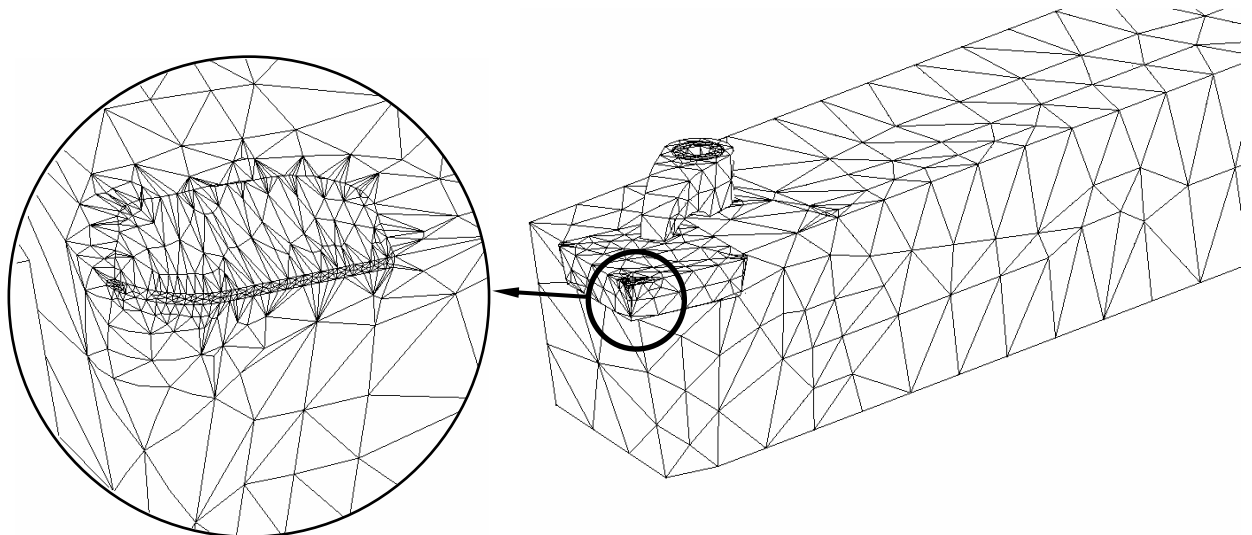


Рис. 3.4 Модель токарного резца со сменной многогранной пластиной, разбитая на тетраэдральные конечные элементы



На рис. 3.5 показана расчетная температура на рабочих поверхностях режущей пластины. Из расчетов видно, что изотермические линии на задней и передней поверхностях при несвободном резании имеют сложный неравномерный характер. Так изотермическая линия на передней поверхности  $388^\circ$  имеет вид плавной эллипсоидной кривой, но по мере приближения ее к вспомогательной режущей кромке она меняет форму и переходит на заднюю поверхность режущей части пластины. Аналогичная картина наблюдается с изотермическими линиями температур  $376^\circ$  и  $353^\circ$ , но здесь изотермы проходят с большей глубиной распространения на заднюю поверхность инструмента. Чем ниже температура, тем более равномерно проходит кривая изотермы на поверхностях режущей пластины.

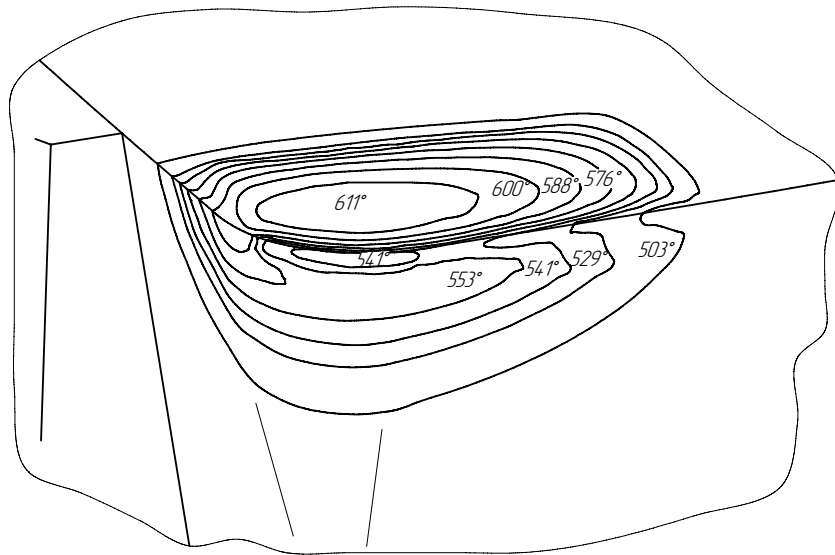


Рис. 3.5 Пример расчета температурного поля на контактных поверхностях режущей пластины при несвободном резании:

Сталь 45 - Т5К10,  $r=0,8\text{мм}$ ,  $\alpha=11^\circ$ ,  $\gamma=0^\circ$ ,  $\varphi=45^\circ$ ,

$V=100\text{ м/мин}$ ,  $S=0,26\text{ мм/об}$ ,  $t=1,2\text{ мм}$

Для наиболее полного представления распределения температуры в режущем клине, рассмотрим сечения режущего клина, как было описано в п.2.6. На рис. 3.6 показано распределение температуры в режущем клине для заданных сечений. В результате того, что каждое сечение имеет различную длину контакта со стружкой, а также угол заострения режущего клина на ра-

диусном участке, наблюдается различное распределение кривых изотерм по ширине контакта.

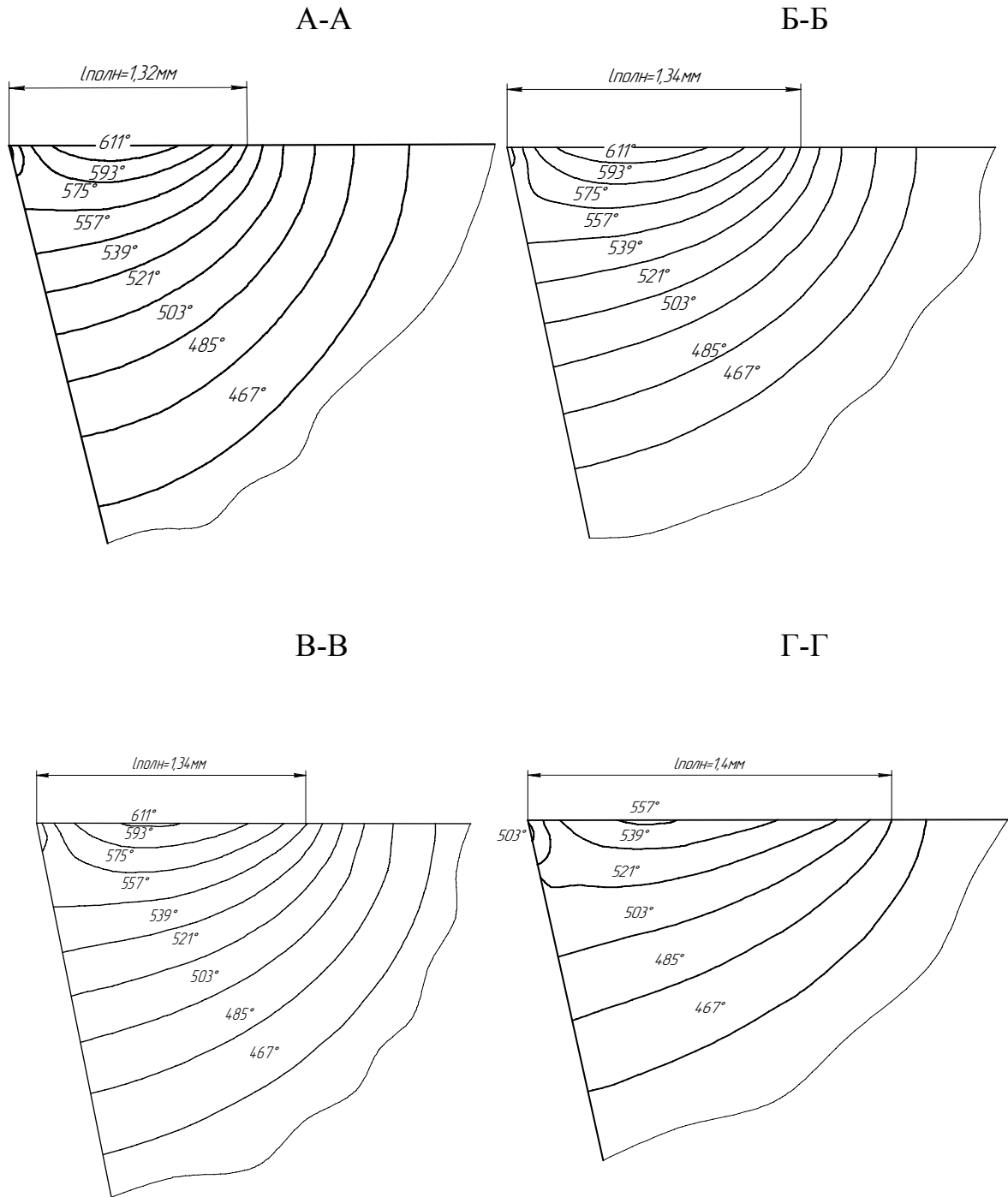


Рис. 3.6 Распределение температуры в сечениях режущей пластины в направлении схода стружки: Сталь45 - Т5К10,  $r=0,8\text{мм}$ ,  $\alpha=11^\circ$ ,  $\gamma=0^\circ$ ,  $\varphi=45^\circ$   
 $V=100\text{ м/мин}$ ,  $S=0,26\text{ мм/об}$ ,  $t=1,2\text{ мм}$

В предыдущих главах показано (см. п.1.2.1), что износ задней поверхности во многом определяется температурой. В то же время контакт по зад-

ней поверхности происходит на небольшой длине. Следовательно, для анализа влияния температурного режима необходимо рассмотреть температуру вдоль рабочего участка режущей кромки. На рис. 3.7 показано изменение температуры вдоль режущей кромки в виде развернутой линии, построенной относительно вершины радиусного участка режущей кромки, для рассмотренных выше условий. Здесь же показан вид в плане сменной многогранной пластины с построенными на поверхности изотермическими линиями.

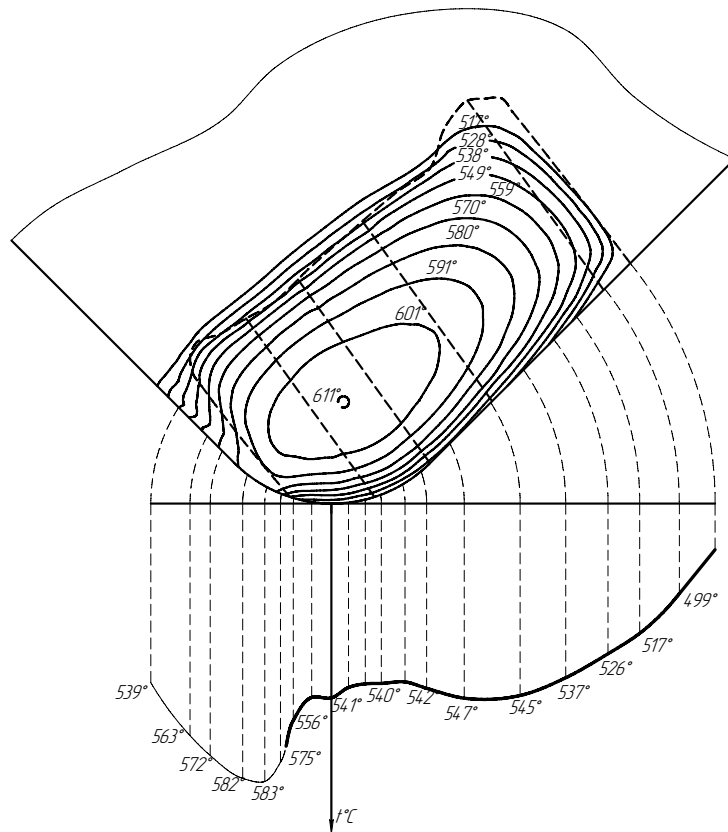


Рис. 3.7 Изменение температуры вдоль режущей кромки, рассчитанное для условий: Сталь45 - Т5К10,  $r=0,8\text{мм}$ ,  $\alpha=11^\circ$ ,  $\gamma=0^\circ$ ,  $\varphi=45^\circ$   
 $V=100\text{ м/мин}$ ,  $S=0,26\text{ мм/об}$ ,  $t=1,2\text{ мм}$

Для удобства восприятия, направление оси температуры задано вниз. Утолщенной линией показана температура рабочего участка режущей кромки, а тонкой значение температуры на нерабочей части вспомогательной режущей кромки. Температура вдоль режущей кромки имеет непостоянное значение. При перемещении вдоль режущей кромки справа налево, значение

температуры увеличивается примерно до середины главной режущей кромки, затем температура стабилизируется на радиусном участке главной режущей кромки. Далее в результате отсутствия стока теплоты в заготовку и близости расположения источника нагрева на передней поверхности, наблюдается повышение температуры на нерабочем участке вспомогательной режущей кромки. Наибольшее значение расчетной температуры наблюдаются на радиусном участке вспомогательной режущей кромки, что соответствует характеру износа задних поверхностей на этом участке. Это указывает на то, что для снижения интенсивности изнашивания задней поверхности на этом участке необходимо обеспечить уменьшение температуры.

Явление переменной температуры вдоль режущей кромки можно объяснить тем, что при несвободном резании на вспомогательной режущей кромке сказывается близость площадки нагрева передней поверхности и отсутствие стока теплоты на участке вспомогательной режущей кромки. Изменение температуры вдоль режущей кромки связано, прежде всего, с направлением распространения итогового теплового потока, формирующегося в результате совместного взаимодействия источников теплоты, в зависимости геометрических особенностей твердого тела, в котором происходит распределение температуры.

Все это позволяет сделать предварительный вывод о том, что для перераспределения тепловых потоков вдоль режущей кромки необходимо изменять угол заострения  $\beta$  режущего клина на различных участках. Угол заострения можно изменять путем подбора заднего угла  $\alpha$ , переднего угла  $\gamma$  или сочетанием обоих путей. Аналогичные расчеты по определению температуры вдоль режущей кромки были произведены для разных сочетаний обрабатываемых и инструментальных материалов, имеющих различные теплофизические характеристики. При постоянных режимах резания, величина усадки и форма контактных площадок во всех случаях принималась одинаковой.

В качестве примера на рис 3.8 показаны результаты расчетов температуры вдоль режущей кромки при обработке: Сталь20 –  $\lambda=39,7\text{Вт}/(\text{м}^\circ\text{С})$ ,

Сталь 45 –  $\lambda=40,2$  Вт/(м°С), Сталь 40Х –  $\lambda=33,9$  Вт/(м°С), Сталь 30ХГС –  $\lambda=36$  Вт/(м°С).

По результатам расчетов температуры можно сделать вывод, что коэффициент теплопроводности  $\lambda$  оказывает меньшее влияние на величину температуры вдоль режущей кромки, чем механические характеристики материала. Определенной зависимости влияния этого параметра на общий уровень температуры не выявлено. В случае же температурных расчетов с одним обрабатываемым материалом и различными марками инструментального материала коэффициент теплопроводности значительно влияет на уровень температуры. Так для этих расчетов были выбраны следующие марки твердого сплава: ВК8 –  $\lambda=54,4$  Вт/(м°С); Т5К10 –  $\lambda=38,5$  Вт/(м°С), Т14К8 –  $\lambda=33,9$  Вт/(м°С), Т15К6 –  $\lambda=27,2$  Вт/(м°С), Т30К4 –  $\lambda=23,8$  Вт/(м°С). Из графиков (рис. 3.9) видно, что с увеличением коэффициента теплопроводности инструментального материала температура на режущей кромке уменьшается, но, в то же время, характер изменения температуры вдоль режущей кромки остается постоянным.

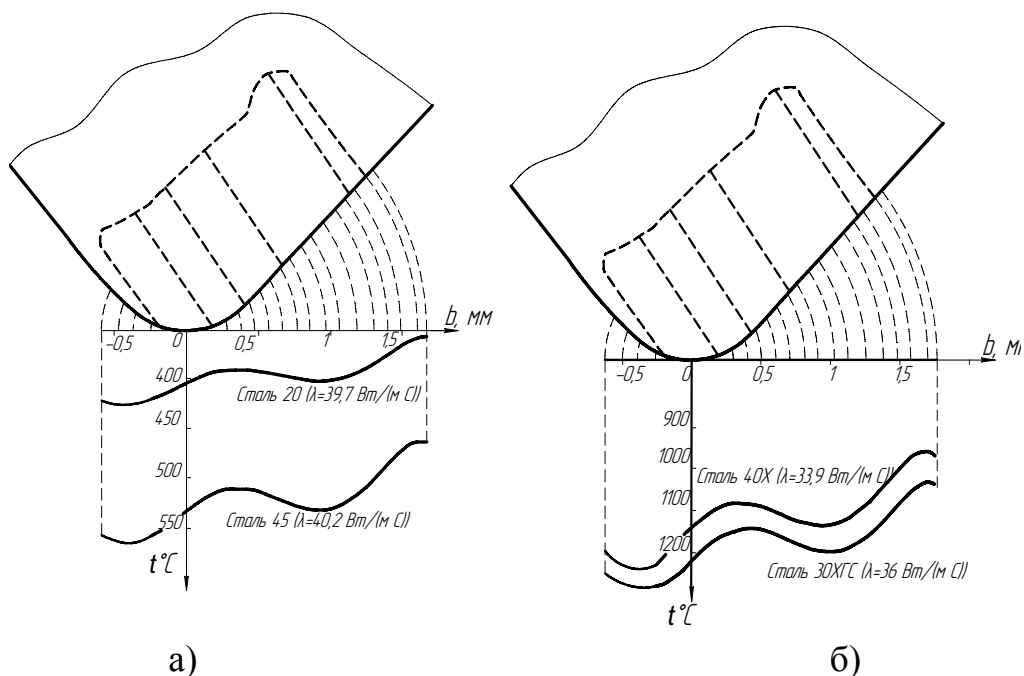


Рис. 3.8 Изменение температуры вдоль режущей кромки при обработке различных обрабатываемых материалов: инструмент - Т5К10,  $\alpha=10^{\circ}$ ,  $\gamma=0^{\circ}$ ,  $\varphi=45^{\circ}$ ,  $V=100$  м/мин,  $S=0,26$  мм/об,  $t=1,6$  мм

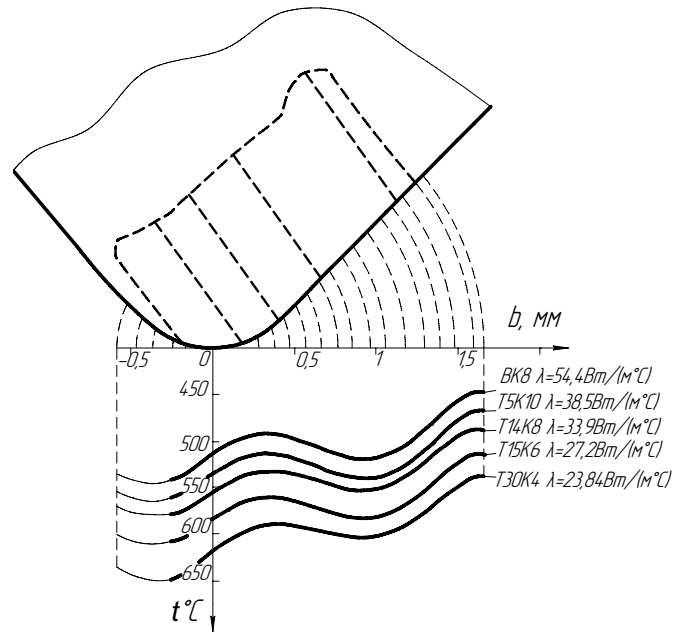


Рис. 3.9 Изменение температуры вдоль режущей кромки при обработке Стали 45 различными инструментальными материалами  
 $\alpha=10^\circ$ ,  $\gamma=0^\circ$ ,  $\varphi=45^\circ$ ,  $V=100$  м/мин,  $S=0,26$  мм/об,  $t=1,6$  мм

По алгоритмам [14], описанным в главе 1, были также произведены расчеты температуры по длине контакта с передней поверхностью и по фаске износа на задней поверхности для условий несвободного течения Стали 45 инструментом из T5K10 при  $\alpha=10^\circ$ ,  $\gamma=0^\circ$ ,  $\varphi=45^\circ$ ,  $V=100$  м/мин,  $S=0,26$  мм/об,  $t=1,6$  мм.

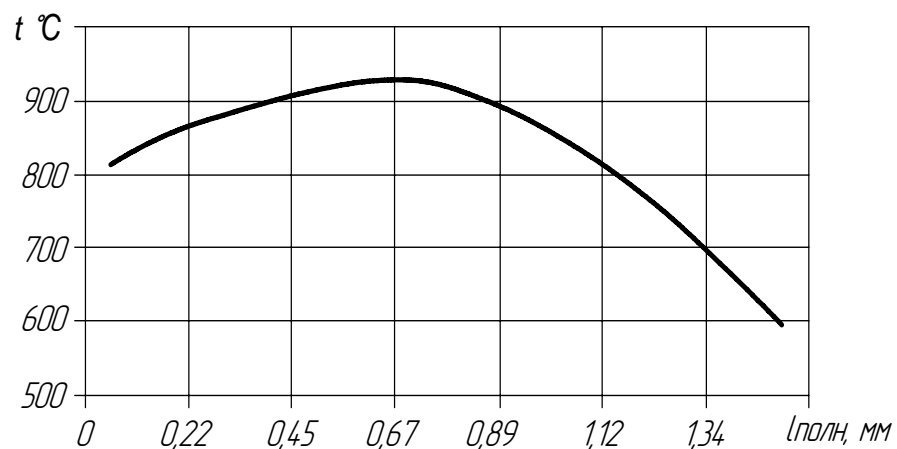


Рис. 3.12 Изменение температуры на передней поверхности для условий:  
 Сталь45 - T5K10,  $r=0,8$ мм,  $\alpha=11^\circ$ ,  $\gamma=0^\circ$ ,  $\varphi=45^\circ$   
 $V=100$  м/мин,  $S=0,26$  мм/об,  $t=1,2$  мм

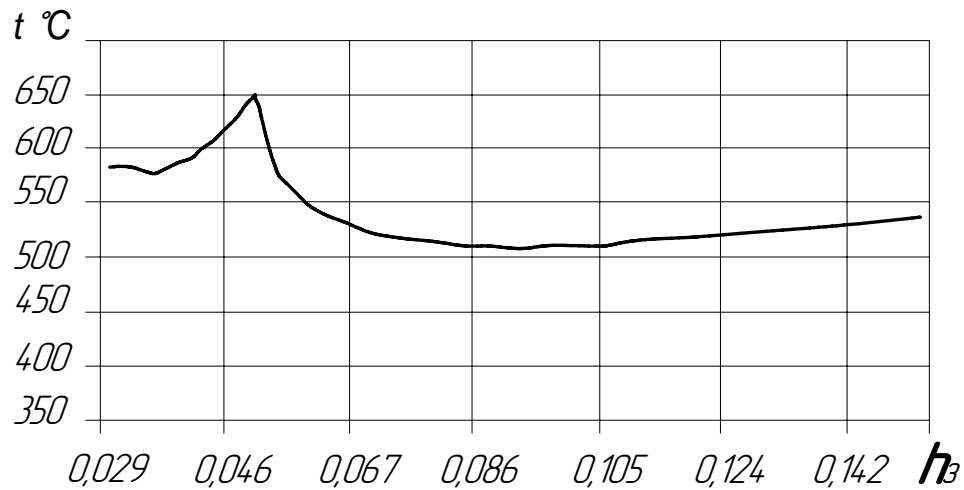


Рис. 3.13 Изменение температуры на задней поверхности для условий

Сталь45 - T5K10,  $r=0,8$ мм,  $\alpha=11^\circ$ ,  $\gamma=0^\circ$ ,  $\varphi=45^\circ$

$V=100$  м/мин,  $S=0,26$  мм/об,  $t=1,2$  мм

Из построенного графика рис. 3.13 видно, что существенное влияние на форму кривой температуры на фаске износа вносит толщина заторможенного слоя.

Так как методика расчетов не позволяет определить итоговые плотности теплового потока на поверхностях инструмента, то, для того чтобы получить распределение температуры вдоль режущей кромки, необходимо решить задачу распределения температуры для несвободного резания в два этапа. На первом этапе решается задача нахождения итоговых плотностей теплового потока на контактных поверхностях методом конечных элементов. В данном случае известно распределение температуры на передней и задней поверхностях в одном сечении. Следовательно, задав граничные условия первого рода (температуру в точках сечения на модели), определим итоговые плотности тепловых потоков в сечении. Затем, применив на модели граничные условия второго рода или итоговые плотности теплового потока на все контактные площадки.

Для тех же условий резания рассчитаны средние итоговые плотности теплового потока на контактных площадках: средняя плотность теплового потока передней поверхности  $q_1=1,41 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, на задней поверхности -

$q_2 = -3,34 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>. После чего, применив рассчитанные тепловые потоки на контактные площадки, было получено распределение температуры на всей поверхности режущей пластины рис. 3.14.

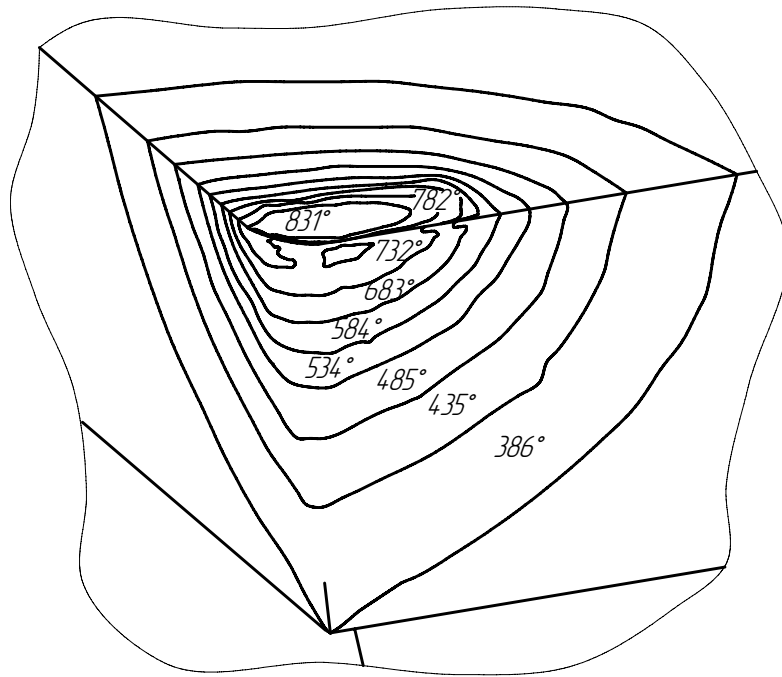


Рис. 3.14 Распределение температуры при несвободном резании, рассчитанное по методике [14]

Из построенных зависимостей видно, что несмотря на некоторую разницу в уровне температур, ее распределение вдоль режущей кромки идентично предыдущим расчетам.

### 3.4 Выводы по главе 3

1. Расчеты температурных полей в режущем клине при свободном резании показывают, что увеличение отрицательного переднего угла приводит к смещению максимальной температуры в зону упругого контакта стружки с передней поверхностью. Снижение температуры в результате увеличения положительного переднего угла соответствует экспериментальным данным



[29], что позволяет судить о справедливости применения данной методики расчета для случая несвободного резания.

2. Произведенные числовые расчеты температуры при несвободном резании показали, что в результате близкого расположения источника теплоты на передней поверхности к вспомогательной режущей кромке и отсутствия стока теплоты в заготовку на этом же участке происходит нагрев вспомогательной радиусной части режущей кромки в большей степени, чем на главной. Следовательно, процесс изнашивания задних поверхностей на этих участках протекает с большей интенсивностью.

3. Расчет температуры для несвободного резания показал, что теплофизические характеристики обрабатываемого и инструментально материалов не оказывают качественного влияния на характер изменения температуры вдоль режущей кромки.

4. Для снижения степени неравномерности износа по задней поверхности необходимо стремиться к выравниванию температуры или, по крайней мере, к уменьшению диапазона температуры вдоль режущей кромки.

## Глава 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ НА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ СМП

### 4.1 Выбор методов экспериментального исследования

Экспериментальная часть работы выполнялась в лаборатории кафедры «Технология машиностроения» Юргинского технологического института (филиала) Томского политехнического университета по схеме классического однофакторного эксперимента [8,21,33]. В соответствии с целями и задачами работы в ней экспериментально определялись распределение температуры вдоль режущей кромки, значения технологических составляющих силы резания, форма и размеры пятен контакта со стружкой и с обрабатываемой заготовкой на передней и задней поверхностях инструмента. Измерялись также усадка стружки в сечениях вдоль режущей кромки в направлении схода стружки, средняя температура в зоне резания определялась методом естественной термопары, а также распределение температурных полей на границах пятен контакта.

#### 4.1.1 Обрабатываемый материал

Эксперименты проводились на образцах из Стали 45 (в состоянии поставки, ГОСТ 4543-80). Заготовки проверялись на соответствие физико-техническим требованиям.

Химический состав Стали 45 представлен в табл. 3.1

Таблица 3.1

Содержание элементов, %		
С	Mn	Si
0,42-0,5	0,5-0,8	0,17-0,37

## Физико-механические свойства Стали 45 [113]

Временное сопротивление, $\sigma_B$ , МПа.....	750
Предел текучести $\sigma_T$ , МПа.....	360
Твердость, НВ.....	190
Теплофизические характеристики стали 45 [124]:	
-теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м °С).....	40,2
-температуропроводность $\omega$ , м <sup>2</sup> /с.....	$0,08 \times 10^4$
-объемная теплоемкость $c_p$ , Дж/(м <sup>3</sup> °С).....	$5,02 \times 10^6$

Заготовка поставлялась в виде проката диаметром  $D=200$  мм, длиной  $L=1000$  мм. Перед проведением экспериментов заготовки предварительно обрабатывались для удаления корки.

## 4.1.2 Режущий инструмент

В исследовании применялся сборный токарный проходной отогнутый резец с механическим креплением многогранной режущей пластины. Ориентация пластины в корпусе параллельна основанию корпуса державки. Геометрические параметры инструмента:  $\varphi=45^\circ$ ,  $\varphi_1=45^\circ$ ,  $\gamma=0^\circ$ ,  $\alpha=10^\circ$ ,  $\lambda=0^\circ$  Резец состоит из корпуса с сечением державки  $25 \times 25$  мм, режущей пластины и опорной пластины из твердого сплава ВК15 SNUA 16 05 08 ГОСТ19044-80, прикрепленной к корпусу винтом. Закрепление режущей пластины производится прихватом и винтом.

В процессе проведения экспериментов резец изолировался от резцедержателя. Вершина резца устанавливалась точно по линии центров станка. При повороте или смене пластины производилась тщательная очистка от стружки опорных поверхностей гнезда корпуса.

## 4.1.3 Многогранные пластины

При проведении экспериментов использовались многогранные пластины

из твердого сплава марки МР7 обозначение по ГОСТ19044-80 SPGN 16 05 08 , (аналог по химическому составу Т5К10), квадратной формы с плоской передней поверхностью без центрального отверстия. Геометрические параметры пластин следующие:

- форма.....квадрат
- диаметр описанной окружности  $D$ , мм.....15,875;
- передний угол  $\gamma^\circ$ .....0;
- задний угол  $\alpha^\circ$  .....11;
- толщина  $h$ , мм.....4,76;
- радиус при вершине  $r$ , мм.....0,8.

Химический состав Т5К10

Таблица 3.2

Содержание элементов, %		
Co	TiC	WC
9	6	85

Теплофизические свойства твердого сплава Т5К10 по данным источника [86] следующие:

- теплопроводность  $\lambda$ , Вт/(м °С).....38,6
- температуропроводность  $\omega$ , м<sup>2</sup>/с..... $0,14 \times 10^4$
- объемная теплоемкость  $c_p$ , Дж/(м<sup>3</sup> °С)..... $2,68 \times 10^{-6}$

Перед проведением экспериментов пластины проверялись на отсутствие трещин, выкрашиваний и других дефектов под микроскопом ИМЦ50-100А.

#### 4.1.4 Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рис. 4.1) представляет собой токарно-винторезный станок 1К62 поз.1 с установленным на нем трехкомпонентным тензоэлектрическим динамометром поз.2 конструкции В.Н. Сбоева (Томский

политехнический университет). Внешний вид динамометра показан на рис. 4.2. Электрический сигнал с динамометра поступает на тензоусилитель «Топаз-4-01» 3. После усиления сигнал поступает на самопишущий прибор НЗ38-8П, где регистрируется изменение силы резания.

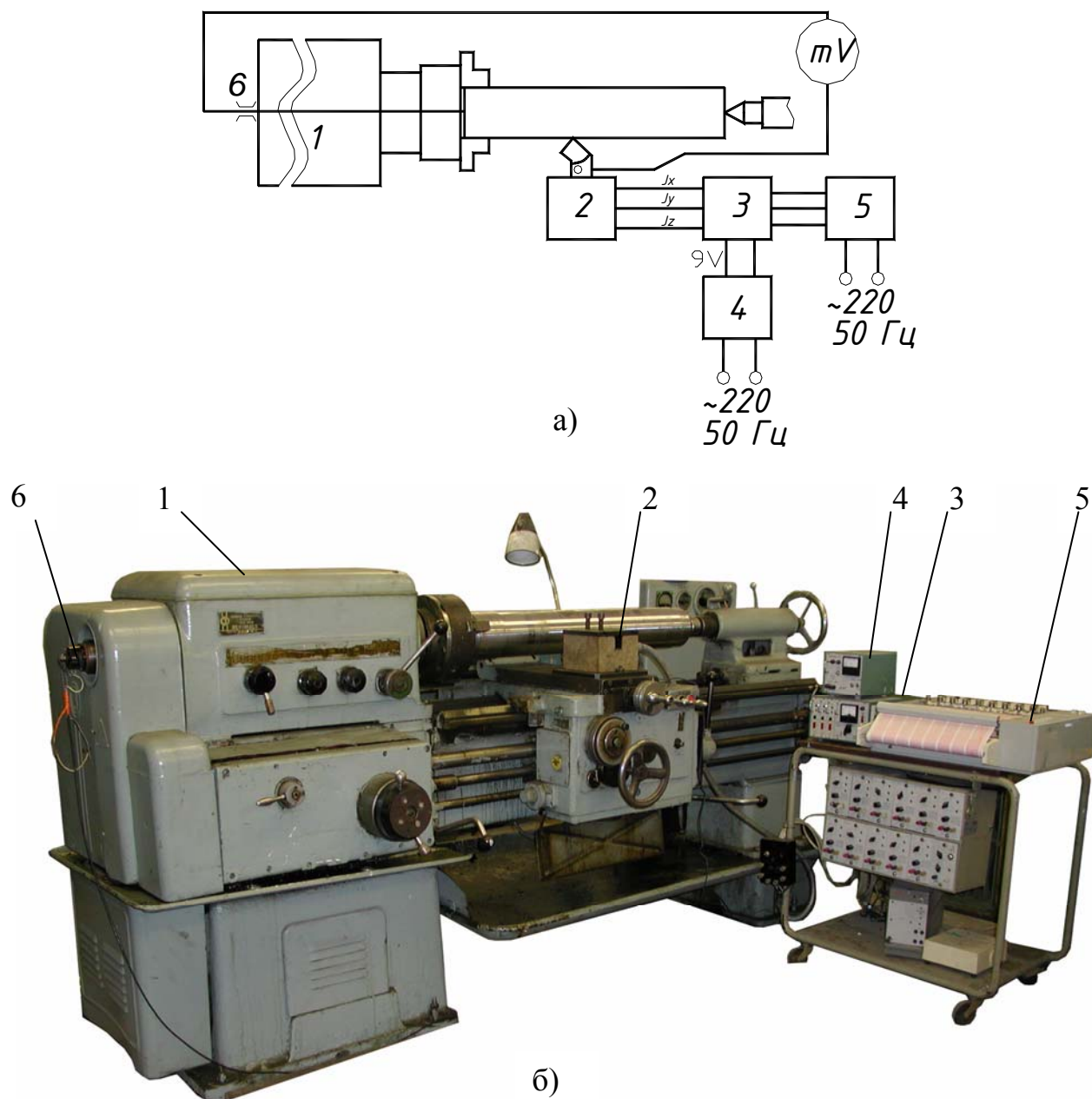


Рис.4.1 Экспериментальная установка: а) электрическая схема, б) внешний вид (1-токарно-винторезный станок 1К62; 2- трехкомпонентный тензоэлектрический динамометр; 3 - тензоусилитель «Топаз-4-01»; 4 –блок питания; 5 - самопишущий прибор НЗ38-8П; 6 –вращающийся токосъемник).



Рис. 4.2 Внешний вид трехкомпонентного динамометра

Тарирование динамометра производилось с использованием тарировочного приспособления и образцового динамометра ДОСМ –3-0,2. Тарировка показала, что взаимовлияние каналов измерения составляющих силы резания не превышает 3%. Тарировочные графики представлены на рис. 4.3

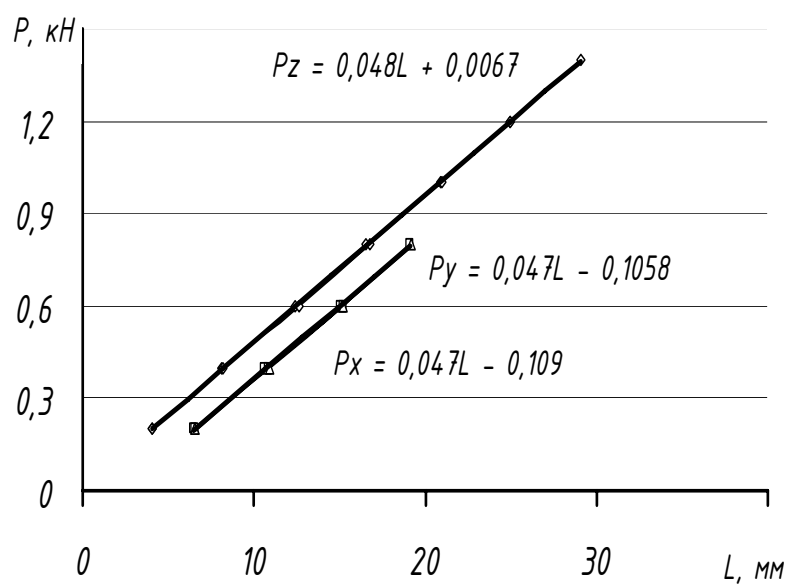


Рис. 4.3 Тарировочный график динамометра

Все приборы и устройства до проведения опытов подвергались проверкам и тарировкам, в результате которых установлено их соответствие техническим требованиям.

По мощности, жесткости и диапазонам изменения частоты вращения шпинделя и продольных подач применявшийся станок полностью соответствует требованиям проведения эксперимента.

Эксперименты по измерению составляющих силы резания проводились при продольном наружном точении. Скорость резания и число оборотов шпинделя контролировались тахометром соприкосновения ТЧ10-Р, время прохода – секундомером, фактическая глубина резания – штангенциркулем ШЦ2-250.

## 4.2 Измерение температуры резания

### 4.2.1 Измерение средней температуры резания естественной термопарой

Для образования естественной термопары, в одном торце заготовки сверлилось отверстие и нарезалась резьба под винт. В другом торце также сверлилось отверстие и устанавливалась, с целью исключения «паразитной» термопары, изолирующая поливинилхлоридная втулка. Заготовка крепилась в трехкулачковом патроне с изолирующими подкладками, и поджималась задним вращающимся центром.

Корпус резца изолирован от резцедержателя текстолитовыми прокладками. Обработываемая заготовка также изолирована от станка и соединена медным проводником со скользящим токосъемником (рис. 4.4), неподвижно закрепленным на корпусе станка. Второй конец термопары проводится через токосъемник к режущей пластине. Внешний вид токосъемника представлен на рис.4.5.



Рис. 4.4 Вращающийся токосъемник



Рис. 4.5 Изоляция заготовки во вращающемся центре и токосъемник

Регистрация измерений осуществлялась с помощью цифрового мультитестера DT – 838. Проверка изоляции резца от корпуса станка проводилась до и после проведения опытов также цифровым мультитестером DT – 838. Для исключения влияния паразитной термопары к многогранной пластине прижимается твердосплавная игла.

Перед проведением опытов термопара подверглась тарировке в электропечи СУОЛ 0,4.4/12-М2-У4.2 ГОСТ13474-70. В качестве контрольной термопары использовалась платина-родиевая термопара. Тарировочный график показан на рис.4.6



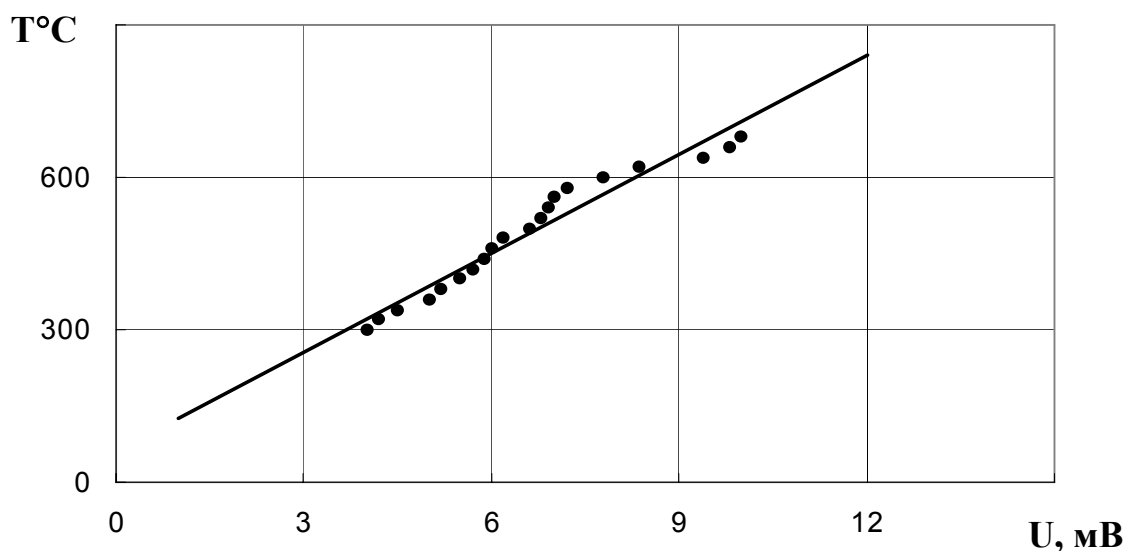


Рис. 4.6 Тарировочный график термопары Сталь 45 – Т5К10

#### 4.3.2 Определение температурных полей на поверхности многогранной пластины

Для определения температурных полей на поверхности многогранной пластины использовались термоиндикаторные краски фирмы SIA “RĪGAS LAKU UN KRĀSU RŪPNĪCA” пяти цветовых переходов, характеристики которых представлены в табл. 4.3.

Характеристики термоиндикаторных красок. Таблица 4.3

Наименование краски по ТУ 6-09-79-76	Температура перехода цвета, °C	Цвет индикатора	
		до воздействия температуры	после воздействия температуры
ТИК №7	230	Бледно-зеленый	Коричневый
ТИК №14	570	Розовый	Белый через бежевый

ТИК №490	510	Сине-зеленый	Оранжевый, при остывании бежевый
ТИК №470	456	Зелено-синий	Бежевый через темно-зеленый

Все краски перед проведением опытов были проверены на соответствие цветам перехода в электропечи СУОЛ 0,4.4/12- М2-У4.2 ГОСТ13474-70.

Подготовка многогранной пластины к экспериментам производилась следующим образом. На обезжиренную пластинку тонким слоем наносилась термоиндикаторная краска. Образцы выдерживались до полного высыхания в течение 6 часов при комнатной температуре. После чего пластины устанавливались на резец и производились эксперименты.

После проведения эксперимента зона цветового перехода многогранной пластины фотографировалась цифровой фотокамерой «Ерson» под инструментальным микроскопом ИМЦ50-100.

Характеристики микроскопа ИМЦ50-100

Таблица 3.4

1. Максимальное увеличение	100
2. Размеры стола, мм	240×160
3. Цена деления продольного ходового винта стола, мм	0,005
4. Цена деления поперечного ходового винта стола, мм	0,005

#### 4.3 Определение направления схода стружки

Определение направления схода стружки производилось двумя способами. В первом случае фотографировалось направление схода стружки в процессе резания, во втором – после остановки фотографировалось пятно контакта стружки с передней поверхностью. Затем фотографии заносились в компьютер,

где производились измерения в графическом редакторе.

Производилось точение Стали 45 на различных режимах резания  $S$  и  $t$  и скоростью  $V=100\text{м/мин}$ , геометрические параметры ориентирования пластин в корпусе державки были следующие:  $\gamma_x=0^\circ$  – фронтальный угол,  $\gamma_y=0^\circ$  – профильный. Результаты экспериментов показаны на рис 4.7 – 4.10.



Рис.4.7 Результаты измерения направления схода стружки:

а) в процессе резания; б) по отпечатку

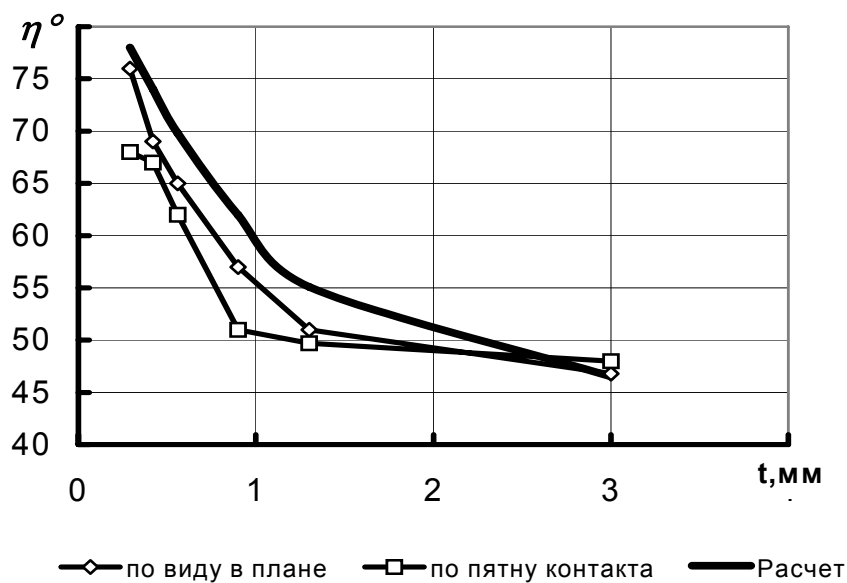


Рис. 4.8 Зависимость угла схода стружки от глубины резания:

$\gamma_x=0^\circ, \gamma_y=0^\circ, \varphi=45^\circ, r=1,6 \text{ мм}, S=0,3 \text{ мм/об}$

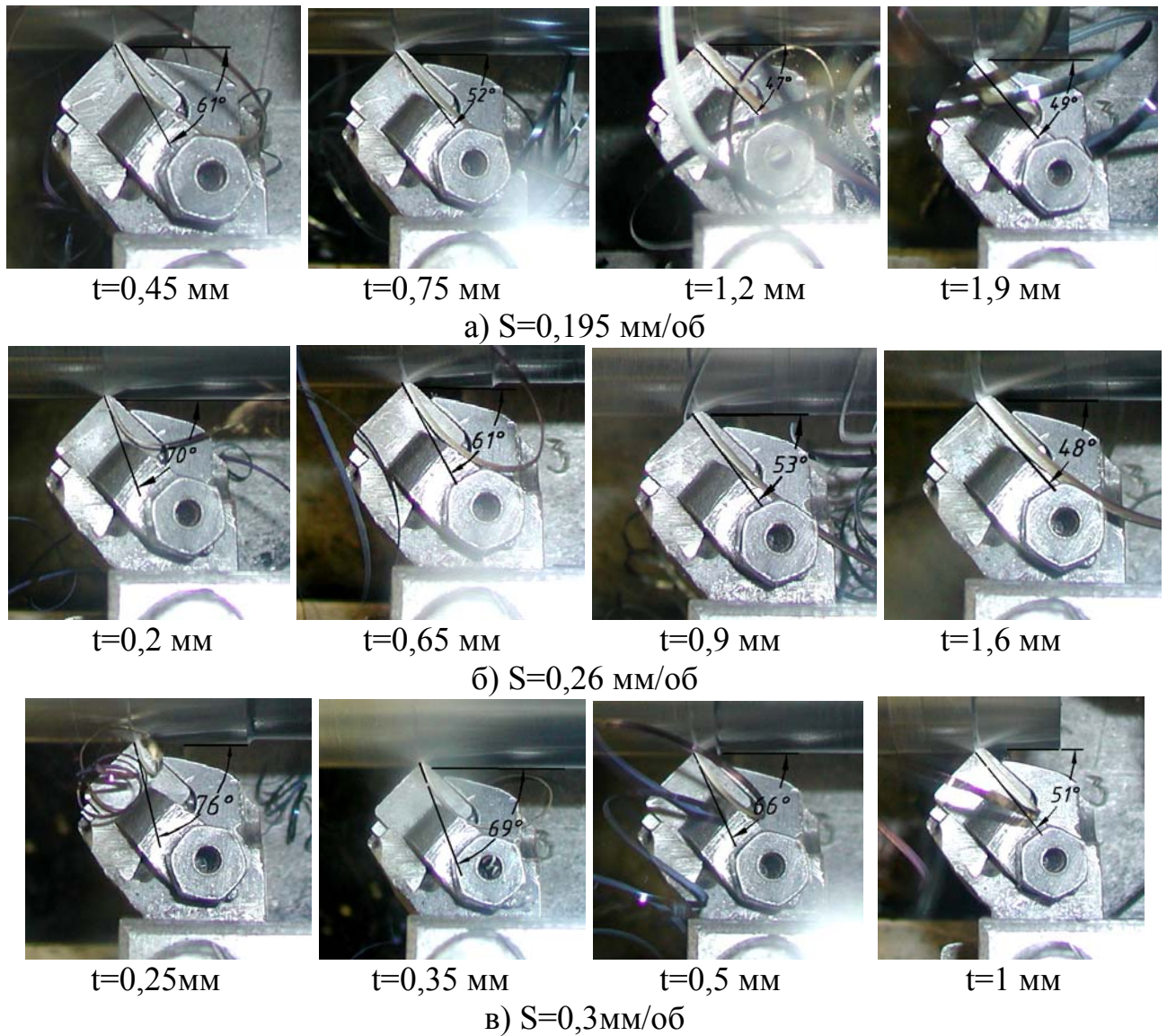


Рис 4.9 Направление схода стружки при продольном точении Стали 45 для различных режимов резания  $\varphi=45^\circ$ ,  $r=0,8$  мм

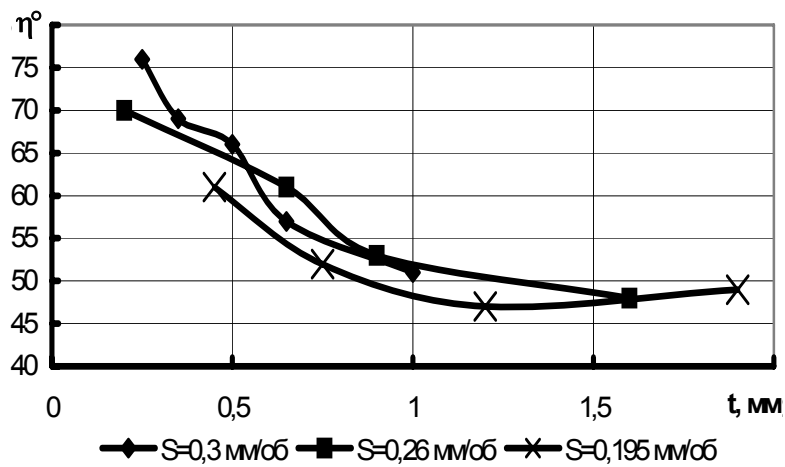


Рис. 4.10 Влияние угла схода стружки от глубины резания при различной величине подачи при точении Стали 45:  $\gamma_x=0^\circ$ ,  $\gamma_y=0^\circ$ ,  $\varphi=45^\circ$ ,  $r=0,8$  мм.

Аналогично производилось эксперименты при условиях несвободного косоугольного точения с геометрией:  $\gamma_x = 0^\circ$  – фронтальным углом,  $\gamma_y = 25^\circ$  – профильным. Результаты экспериментов показаны рис.4.11 – 4.12.

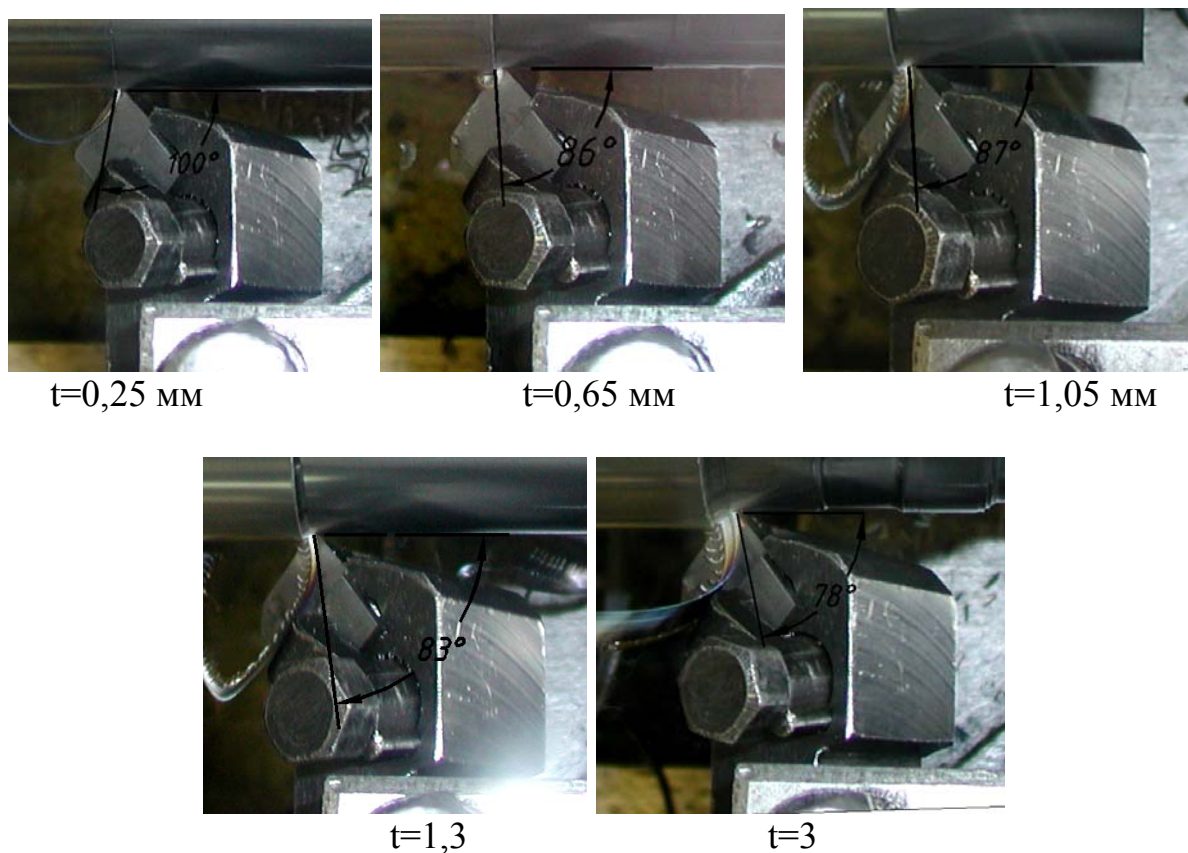


Рис 4.11 Направление схода стружки для продольного косоугольного точения Стали 45 ( $\gamma_x = 0^\circ$  – фронтальный угол,  $\gamma_y = 25^\circ$  – профильный) при различной глубине резания,  $S=0,26\text{мм/об}$ ,  $\varphi=45^\circ$ ,  $r=0,8\text{мм}$ ,

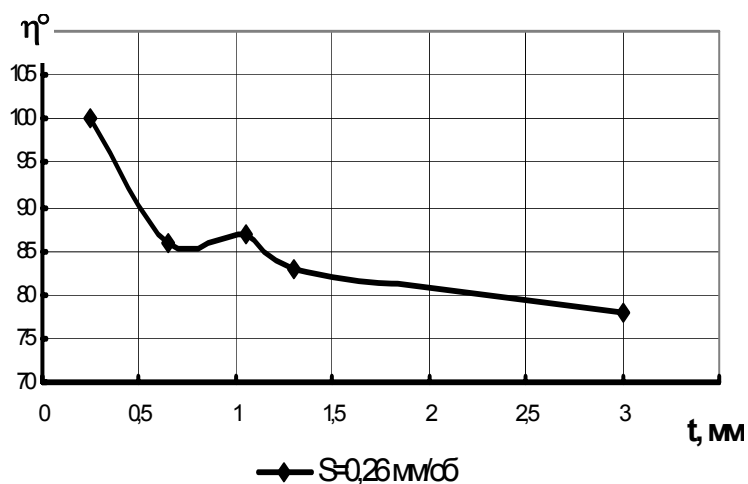


Рис. 4.12 Влияние угла схода стружки от глубины резания при различной величине подачи при точении Стали 45:  $\gamma_x = 0^\circ$  – фронтальный угол,  $\gamma_y = 25^\circ$  – профильный,  $\varphi=45^\circ$ ,  $r=0,8\text{мм}$ .

#### 4.4 Определение температурных полей с помощью термоиндикаторных красок

Определение зоны температурного перехода производилось путем фотографирования зоны контакта. Фотографии обрабатывались на компьютере, где фиксировались зоны цветового перехода, пятно силового контакта на передней и задней поверхностях пластинки. Также под микроскопом фотографировалось поперечное сечение стружки.

Измерение полной длины контакта производилось по отпечатку на контактных поверхностях.

В каждом сечении определялась величина поперечной усадки стружки с учетом масштабного коэффициента.

Для проведения экспериментов были выбраны режимы резания, которые позволили максимально использовать возможности термоиндикаторных красок. При проведении экспериментов использовались термоиндикаторные краски пяти цветовых переходов 570, 510, 456, 230°С. Поэтому средняя температура резания не должна превышать 600°С.

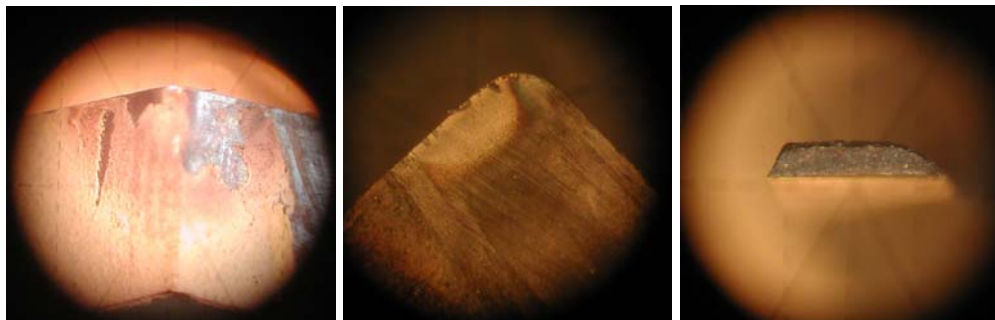
Измерение температурных полей на сменной многогранной пластине производилось в несколько этапов.

На первом этапе для каждого цветового перехода проводилась серия из четырех экспериментов при одинаковом режиме резания. Затем все образцы сменных многогранных пластин фотографировались под микроскопом.

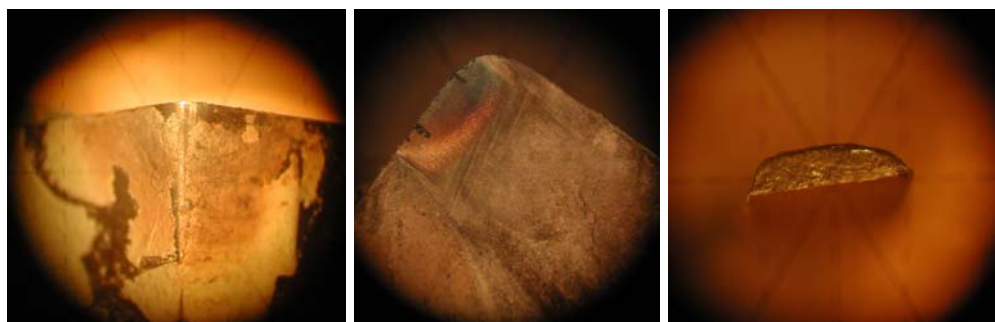
Режимы резания  $V=160$  м/мин;  $t=1,3$  мм;  $S=0,39$  мм/об.

На рис. 4.13 – 4.14 показаны фотографии задних и передних поверхностей СМП с нанесенной термоиндикаторной краской, полученной после цветового перехода, а также поперечное сечение стружки, необходимое для последующих расчетов исходных данных, используемых при аналитическом расчете температуры.

## Эксперимент №1



## Эксперимент №2



## Эксперимент № 3



## Эксперимент №4

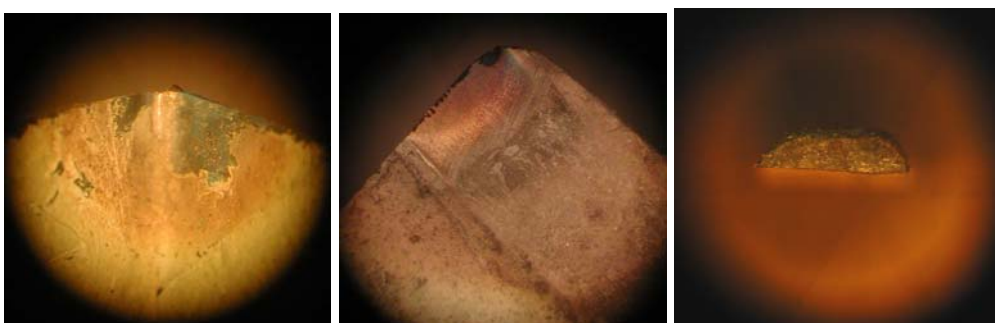
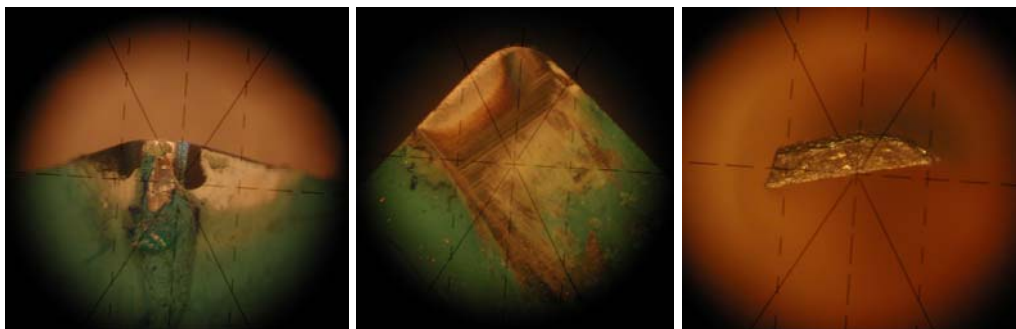
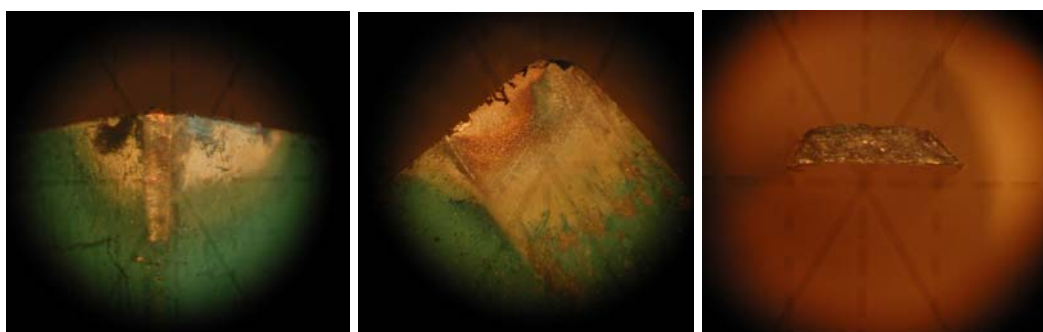


Рис.4.13 Результаты цветового перехода термокраски ТИК №7 ТУ 6-09-79-76  $T_{пер}=230^{\circ}C$  и поперечное сечение стружки при точении стали 45 обрабатываемый материал Т5К10, геометрия  $\varphi=45^{\circ}\gamma=0^{\circ}$ ,  $\alpha=10^{\circ}$ ,  $r=0,8mm$  при условиях  $V=160$  м/мин;  $t=1,3$  мм;  $S=0,39$  мм/об.

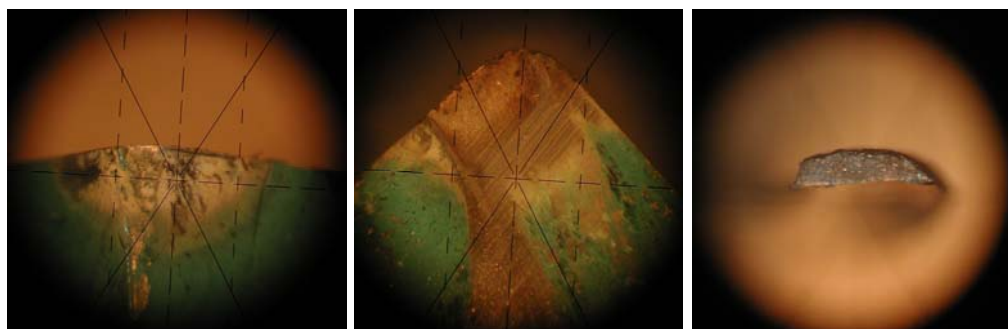
## Эксперимент №1



## Эксперимент №2



## Эксперимент №3



## Эксперимент №4

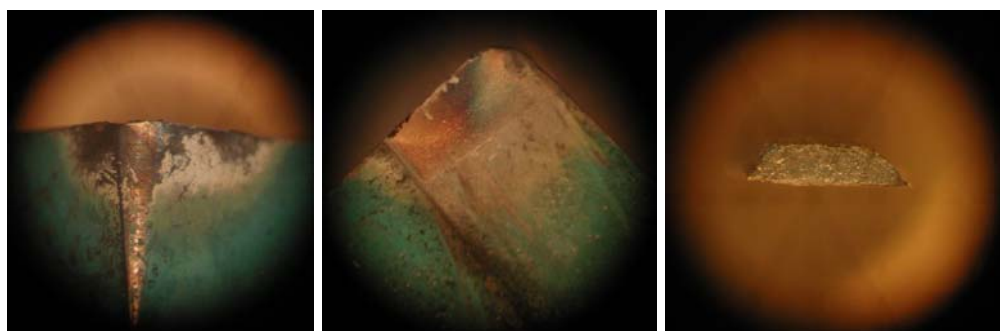
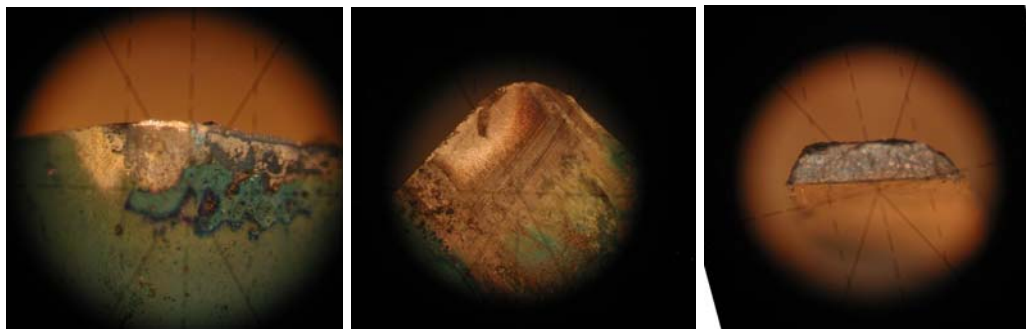


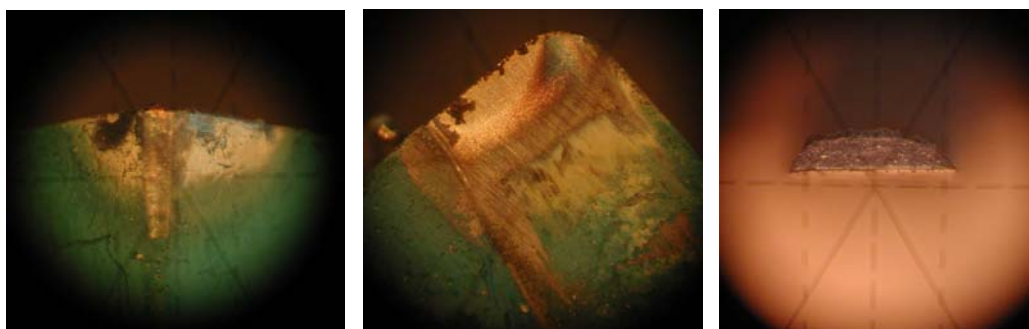
Рис.4.14 Результаты цветового перехода термокраски ТИК №470 ТУ 6-09-79-76  $T_{пер}=456^{\circ}\text{C}$  и поперечное сечение стружки при точении стали 45 обрабатываемый материал Т5К10, геометрия  $\varphi=45^{\circ}\gamma=0^{\circ}$ ,  $\alpha=10^{\circ}$ ,  $r=0,8\text{мм}$  при условиях  $V=160\text{ м/мин}$ ;  $t=1,3\text{ мм}$ ;  $S=0,39\text{ мм/об}$ .



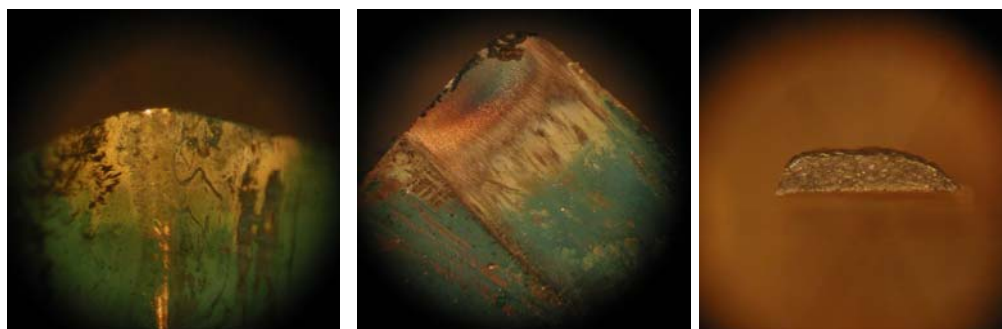
## Эксперимент №1



## Эксперимент №2



## Эксперимент №3



## Эксперимент №4

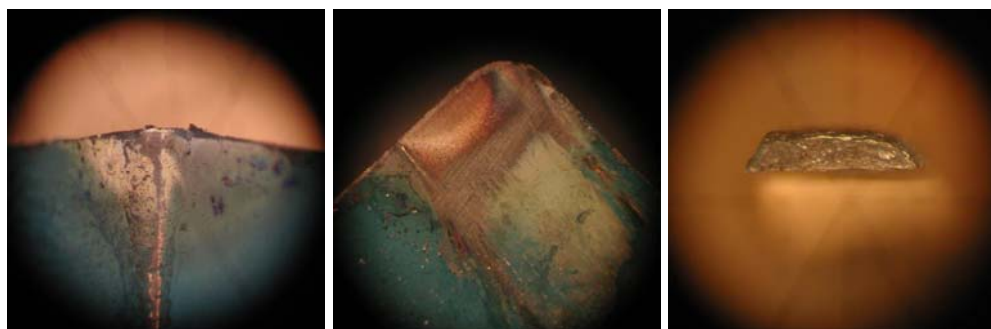
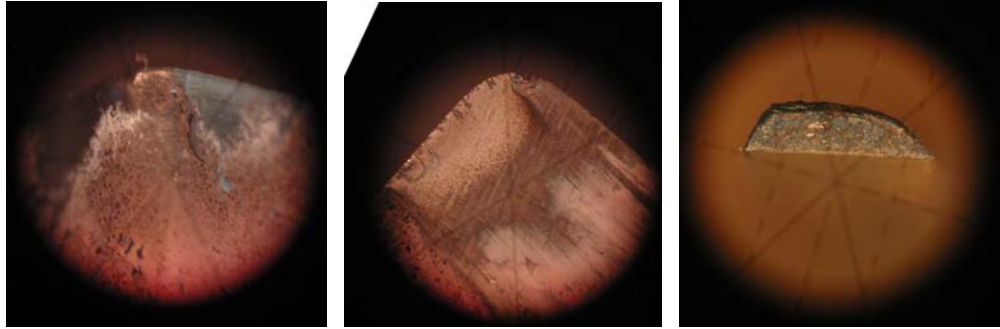
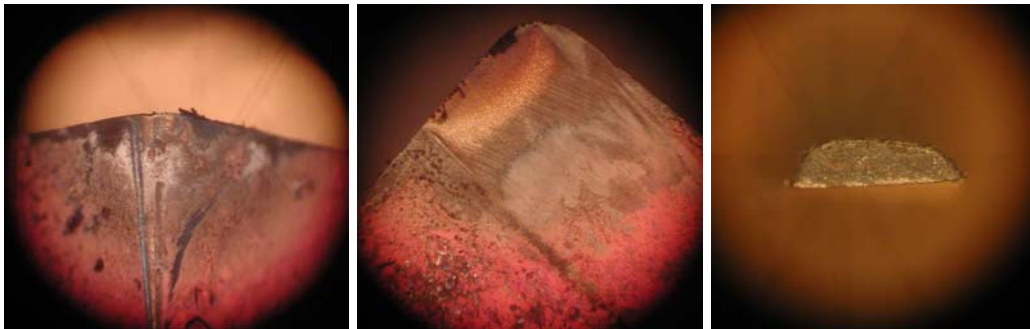


Рис.4.15 Результаты цветового перехода термомокраски ТИК №490 ТУ 6-09-79-76  $T_{пер} = 510^{\circ}\text{C}$  и поперечное сечение стружки при точении стали 45 обрабатываемый материал Т5К10, геометрия  $\varphi=45^{\circ}\gamma=0^{\circ}$ ,  $\alpha=10^{\circ}$ ,  $r=0,8\text{мм}$  при условиях  $V=160\text{ м/мин}$ ;  $t=1,3\text{ мм}$ ;  $S=0,39\text{ мм/об}$ .

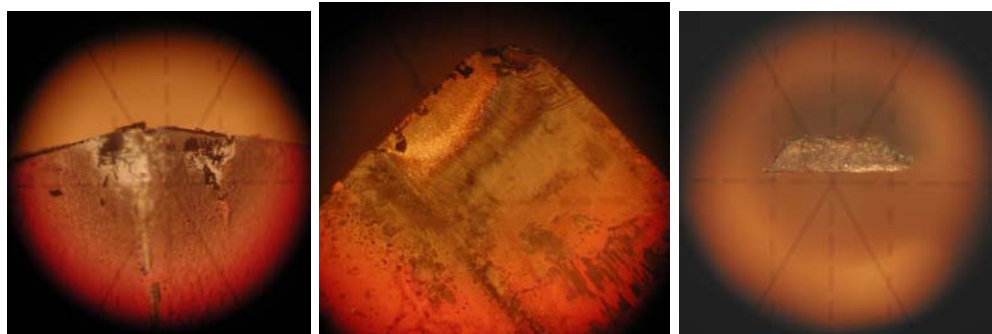
## Эксперимент №1



## Эксперимент №2



## Эксперимент №3



## Эксперимент №4



Рис.4.16 Результаты цветового перехода термокраски ТИК №14 ТУ 6-09-79-76  $T_{пер} = 570^{\circ}C$  и поперечное сечение стружки при точении стали 45 обрабатываемый материал Т5К10, геометрия  $\varphi=45^{\circ} \gamma=0^{\circ}$ ,  $\alpha=10^{\circ}$ ,  $r=0,8mm$  при условиях  $V=160$  м/мин;  $t=1,3$  мм;  $S=0,39$  мм/об.

Для каждого проведенного эксперимента снимались показания динамометра и термопары. Результаты представлены на рис. 4.17 - 4.20

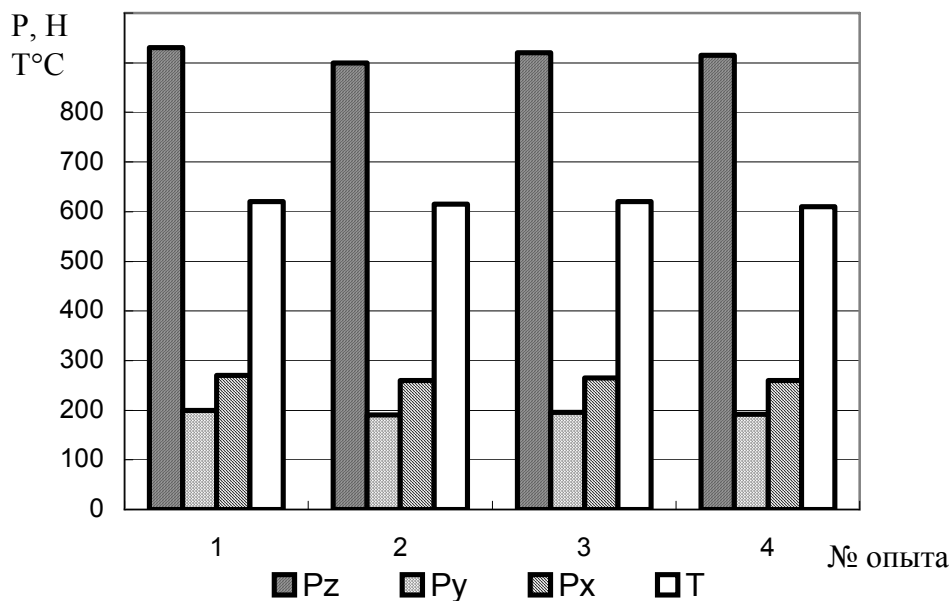


Рис.4.17 Гистограммы составляющих силы резания для серии экспериментов  
ТИК №7 ТУ 6-09-79-76  $T_{пер} = 230^{\circ}\text{C}$

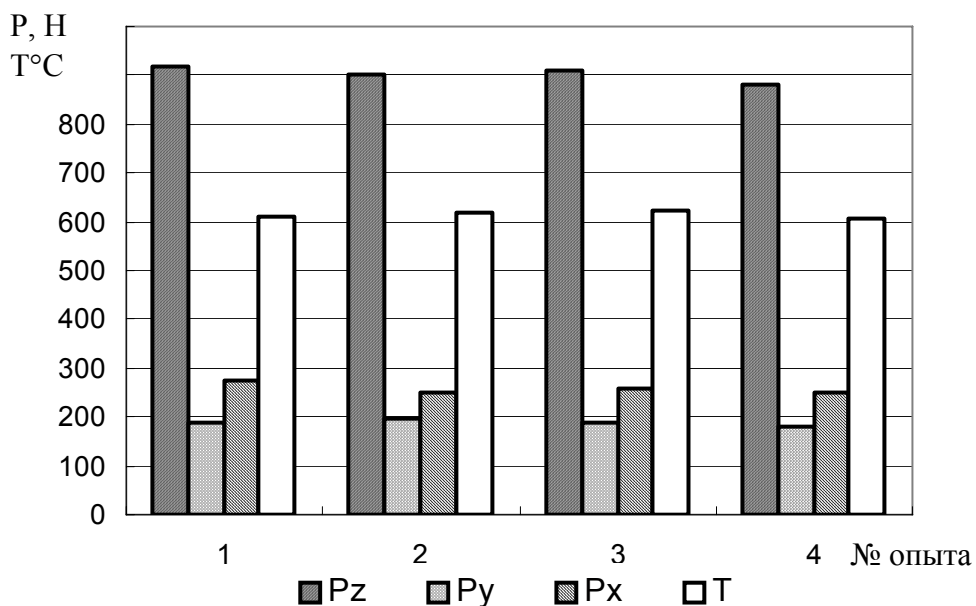


Рис.4.18 Гистограммы составляющих силы резания для серии экспериментов  
ТИК №470 ТУ 6-09-79-76  $T_{пер} = 456^{\circ}\text{C}$

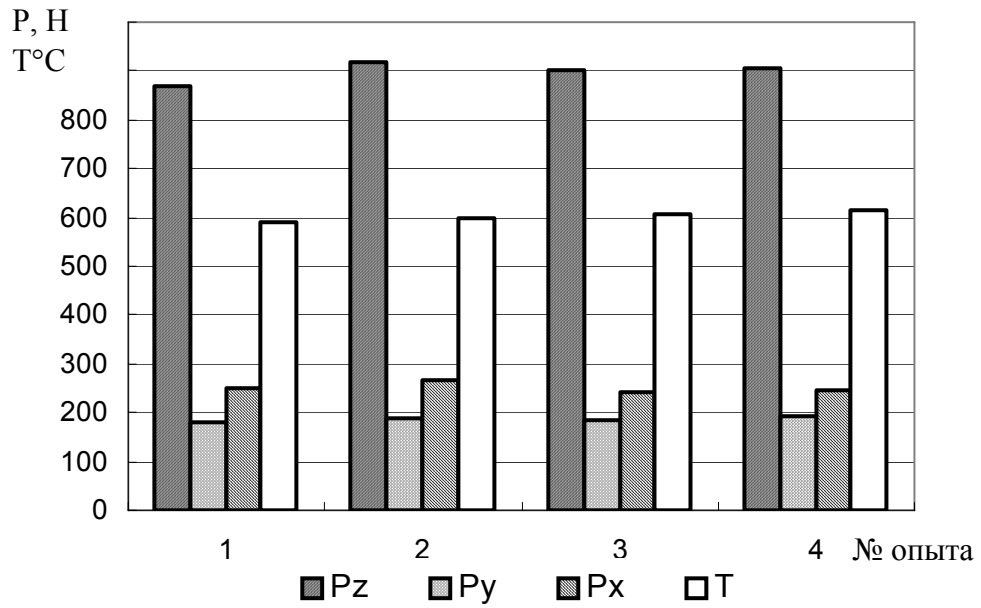


Рис.4.19 Гистограммы составляющих силы резания для серии экспериментов  
ТИК №490 ТУ 6-09-79-76  $T_{пер} = 510^{\circ}\text{C}$

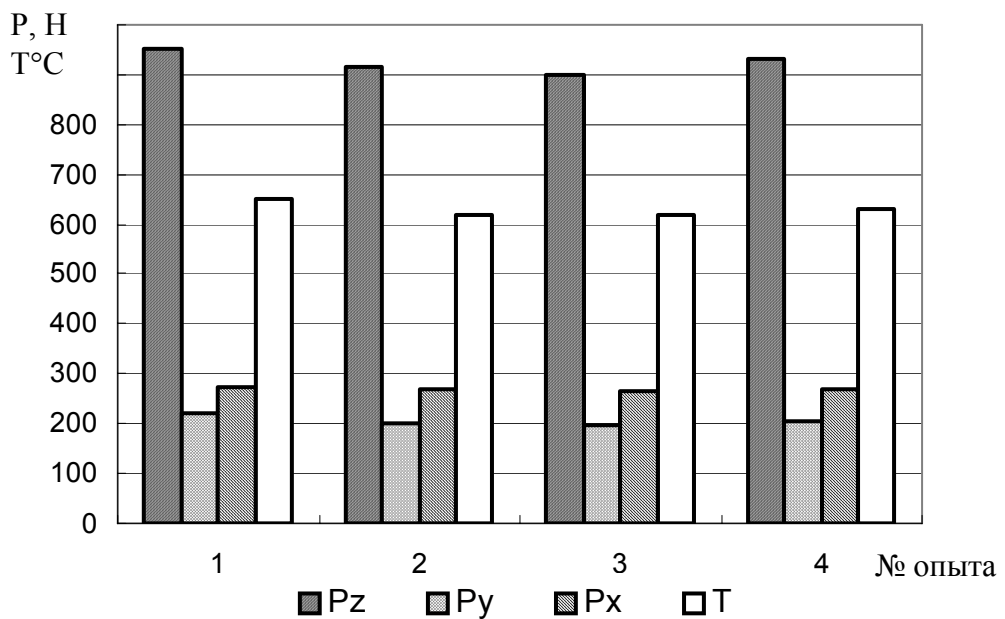


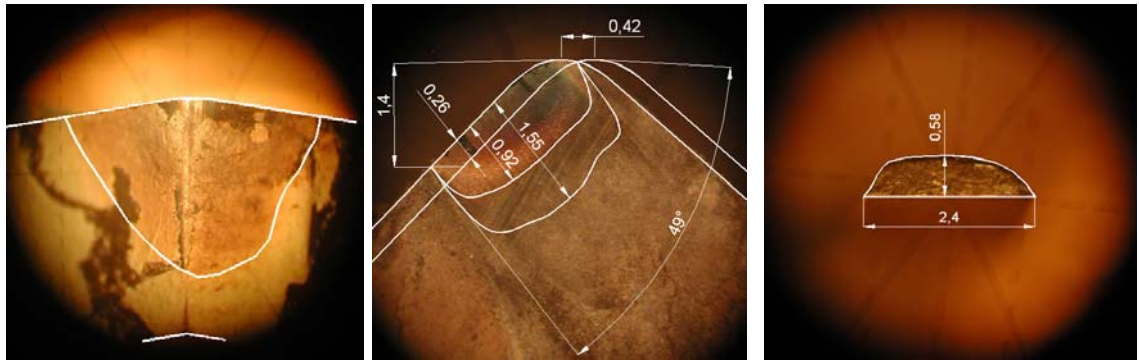
Рис.4.20 Гистограммы составляющих силы резания для серии экспериментов  
Серия ТИК №14 ТУ 6-09-79-76  $T_{пер} = 570^{\circ}\text{C}$

В результате обработки экспериментов по характеристикам силы резания, взятой с показаний динамометра и средней температуры резания, определенной естественной термопарой, брались представители каждого цветового перехода с одинаковыми условиями резания. В каждой из проведенной серии выбран номер эксперимента для использования его в качестве представителя цветового перехода термоиндикаторной краски. Так из рис. 4.17 - 4.20 видно, что одинаковые составляющие силы резания и среднюю температуру резания имели: в первой серии №2; во второй №3; в третьей №2; в четвертой №3.

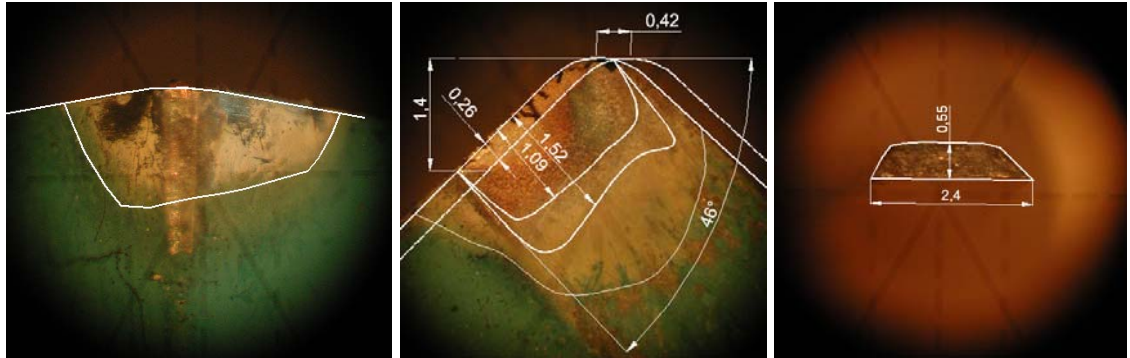
Для дальнейшего анализа были взяты фотографии соответствующих экспериментов. После обработки в САД программе на полученных экспериментальных фотографиях (Рис.4.21) обведены контуры цветового перехода термоиндикаторной краски, проекции режущей кромки, полной и пластической площадок контакта. Для определения толщины срезаемого в направлении срезаемого слоя, было произведено смещение проекции режущей кромки на величину подачи.

Из полученных экспериментальных фотографий видно, что с увеличением температуры перехода термоиндикаторной краски площадь поверхности после цветового перехода уменьшается. Также установлено, с уменьшением температуры цветового перехода кривая, описывающая границу данного температурного перехода, более плавная. Особенно резко выраженная криволинейная площадка образовалась после температурного перехода 570 °С, где цветовой переход термокраски на задних поверхностях расположен у вершины и в середине главной режущей кромки(см. рис. 4.21 г).

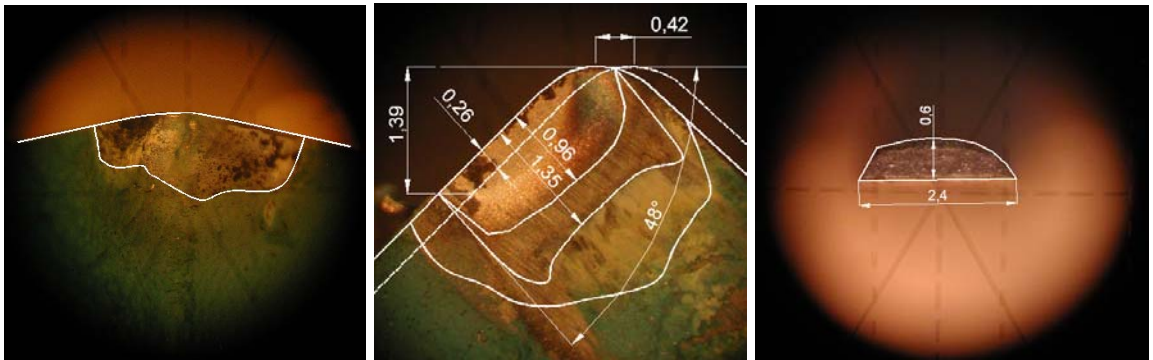
Таким образом, в результате проведенных экспериментов по определению тепловых полей на задних поверхностях можно сделать вывод, что температура вдоль режущей кромки имеет переменное значение. Этот факт подтверждает сделанное ранее предположение о неравномерности температуры при несвободном резании и проведенные в главе 3 аналитические расчеты.



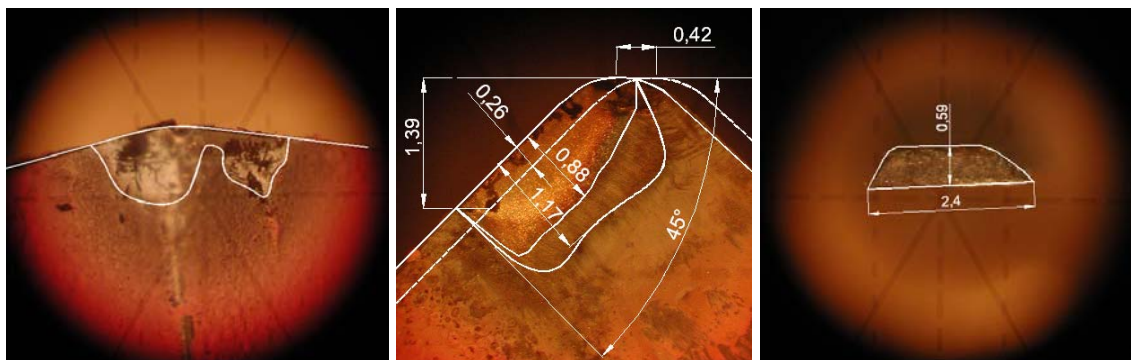
а) Серия ТИК №7 ТУ 6-09-79-76  $T_{пер}=230^{\circ}\text{C}$ , эксперимент №2



б) Серия ТИК №470 ТУ 6-09-79-76  $T_{пер}=456^{\circ}\text{C}$ , эксперимент №3



в) Серия ТИК №490 ТУ 6-09-79-76  $T_{пер}=510^{\circ}\text{C}$ , эксперимент №3



г) Серия ТИК №14 ТУ 6-09-79-76  $T_{пер}=570^{\circ}\text{C}$ , эксперимент №3

Рис. 4.21 Представители температурных переходов с одинаковыми условиями резания

Для более полного сравнительного представления температурных полей на поверхностях СМП производилось объединение всех представителей температурных цветовых переходов на одной модели. Была построена модель многогранной пластины в реальном масштабе, на которой путем ее поворота вокруг осей координат добивались совмещения обведенного контура режущей кромки и линии границы температурного перехода с проекцией граней модели.

Замкнутый контур изотермы выдавливался до пересечения с поверхностью модели, определялась криволинейная линия пересечения двух твердых тел, которая и являлась изотермой температуры перехода термоиндикаторной краски.

Таким образом, были построены изолинии температур  $230^{\circ}$ ,  $456^{\circ}$ ,  $510^{\circ}$ ,  $570^{\circ}$  на одной модели (рис.4.22). Из рисунка также видно, что с уменьшением температуры перехода, линия границ площадок становится более плавной.

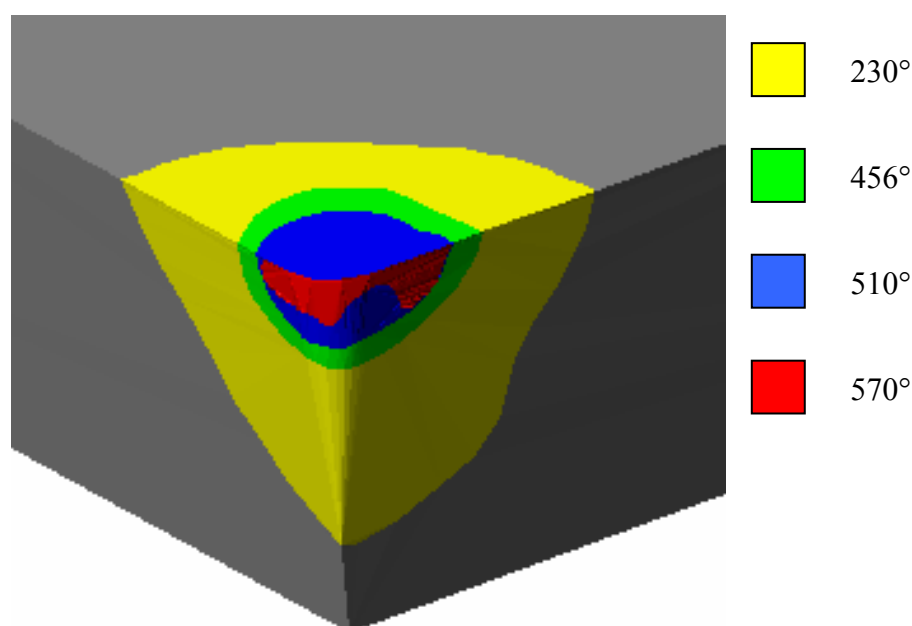


Рис. 4.22 Распределение температурных полей на поверхности СМП

## 4.5 Выводы по главе 4

В результате проведения экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Полученные экспериментальные данные по определению схода стружки подтверждают достоверность предлагаемой методики расчета направления схода стружки при несвободном косоугольном резании.

2. При определении направления схода двумя способами, в первом случае фотографировалось направление схода стружки в процессе резания, во втором – пятно контакта стружки с передней поверхностью, установлено, что большую степень сходимости с теоретическим расчетом имеет первый способ.

3. В результате проведения эксперимента по определению температурных полей с помощью термоиндикаторных красок, имеющих разные температурные цветовые переходы, установлено, что температура вдоль режущей кромки имеет переменное значение.

4. Установлено что на выбранных режимах резания цветовые переходы термокраски 570°C расположены на задних поверхностях СМП, прилегающих к вспомогательной режущей кромке, а также в середине главной режущей кромки. Повышенная температура на вспомогательной режущей кромке обусловлена близким расположением источника теплоты на передней поверхности и отсутствием стока теплоты на нерабочем участке вспомогательной режущей кромки. В середине главной режущей кромки более высокая температура объясняется наибольшим удалением этой зоны от краев площадок контакта.



## Глава 5 ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЕ СМП С РАВНОМЕРНЫМ ИЗНАШИВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В результате проведенных теоретических расчетов и экспериментов по определению распределения температурных полей на задних поверхностях СМП установлено, что при несвободном течении температура режущей кромки со стороны задней поверхности имеет переменное значение. В соответствии с полученным распределением температуры на участках режущей кромки наблюдается неравномерное изнашивание задних поверхностей. Поэтому для выравнивания фаски износа по задней поверхности нужно выровнять температуру вдоль режущей кромки или, по крайней мере, снизить диапазон ее изменения. Анализ литературных источников показал, что наиболее эффективным способом регулирования температуры вдоль режущей кромки, в данном случае, является изменение геометрических параметров режущего клина. Т.е. необходимо придать СМП, такую форму, при которой угол заострения в каждом сечении, сделанном в направлении предполагаемого схода стружки был переменный.

### 5.1 Конструирование СМП с уменьшенным диапазоном температуры вдоль режущей кромки путем управления формой задней поверхности

В основе управления формой задней поверхности лежит принцип постоянства угла заострения режущего клина в параллельных направлению схода стружки сечениях.

В качестве исходной была взята стандартная четырехгранная СМП (обозначение по ГОСТ19044-80 SPGN 16 05 08) с плоской передней поверхностью, с задним углом  $\alpha=11^\circ$  диаметром описанной окружности 16 мм, толщиной 4,9 мм и радиусом при вершине  $r=0,8$  мм.

В точке, лежащей на прямолинейном участке режущей кромки производилось сечение пластины в направлении предполагаемого схода стружки.

Полученное сечение является исходным контуром (рис. 5.1).

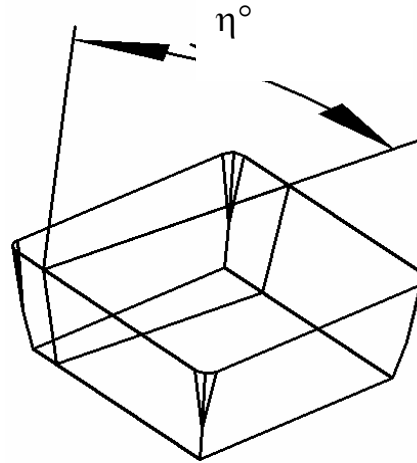


Рис. 5.1 Сечение пластины в направлении схода

Следующий этап проектирования заключался в копировании и параллельном смещении исходного контура вдоль радиусного участка режущей кромки. В результате получен ряд линий задней поверхности, которые будут являться образующими для новой задней поверхности.

После этого создается поверхность, где в качестве образующих линий используются линии задней грани исходного контура, верхней направляющей линией является режущая кромка, а нижней – контур, состоящий из нескольких элементов (рис. 5.2): 1- прямолинейный участок, параллельный главной режущей кромке, 2 – радиусный участок, полученный при смещении исходного контура и 3 - прямолинейный участок, соединяющий участки 1 и 2. Полученную поверхность копируем и поворачиваем так, чтобы получилась четырехгранная пластина.

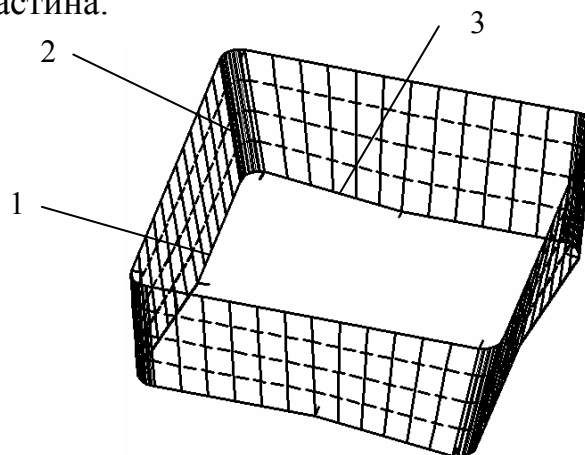


Рис. 5.2 Сетчатый каркас модели СМП

Для создания твердотельной модели необходимо построить твердотельную заготовку, габаритные размеры по длине и ширине которой превышают размеры сконструированного сетчатого каркаса пластины и высотой равной высоте пластины. Затем совместить заготовку с сетчатой поверхностью (рис. 5.3 а) и произвести вычитание выступающих за поверхность элементов заготовки.

По вышеописанной методике была сконструирована сменная многогранная режущая пластина (рис. 5.3 б). На СМП был получен Патент на полезную модель №52752, у которой задняя поверхность образована параллельными прямолинейными образующими, наклоненными под одним и тем же углом и размещенными вдоль режущей кромки на радиусном участке.

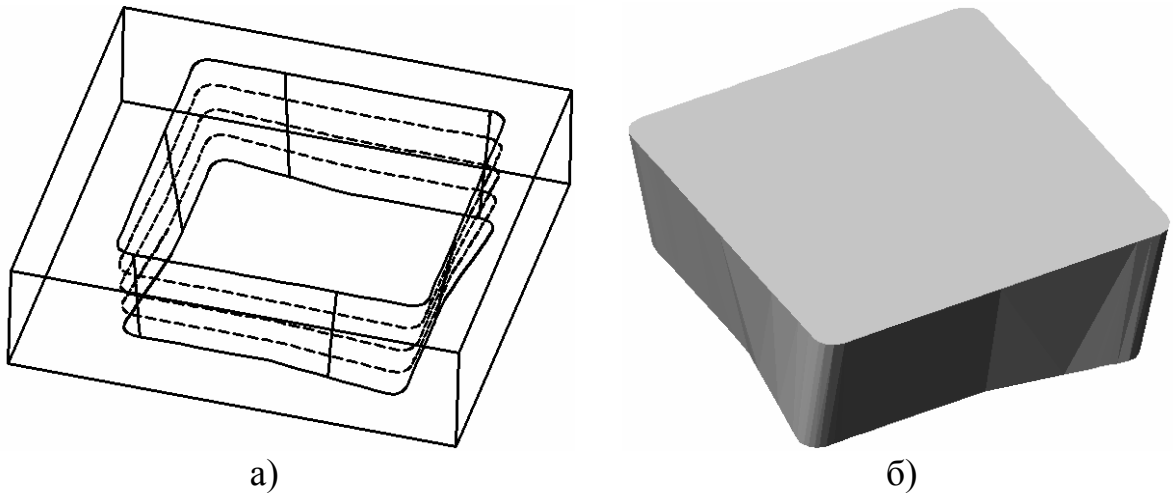


Рис. 5.3 Твердотельная модель сменной многогранной пластины  
а) поверхностный каркас проектируемой пластины; б) твердотельная модель проектируемой пластины

Анализ геометрии сконструированной пластины показал, что за счет параллельного смещения исходного контура задний угол  $\alpha^\circ$  в пластине в зависимости от угла ее поворота вокруг оси  $\omega$  (см. рис. 5.4) изменяется в следующей закономерности. На участке поворота  $\omega$  от  $0^\circ$  до  $43^\circ$  задний угол постоянен и равен  $11^\circ$ . Затем при дальнейшем повороте пластины задний угол уменьшается, что ведет к увеличению угла режущего клина. При пово-

после поворота  $\omega$  от  $53^\circ$  до  $90^\circ$  угол снова увеличивается до исходного значения  $11^\circ$  (см. рис. 5.5).

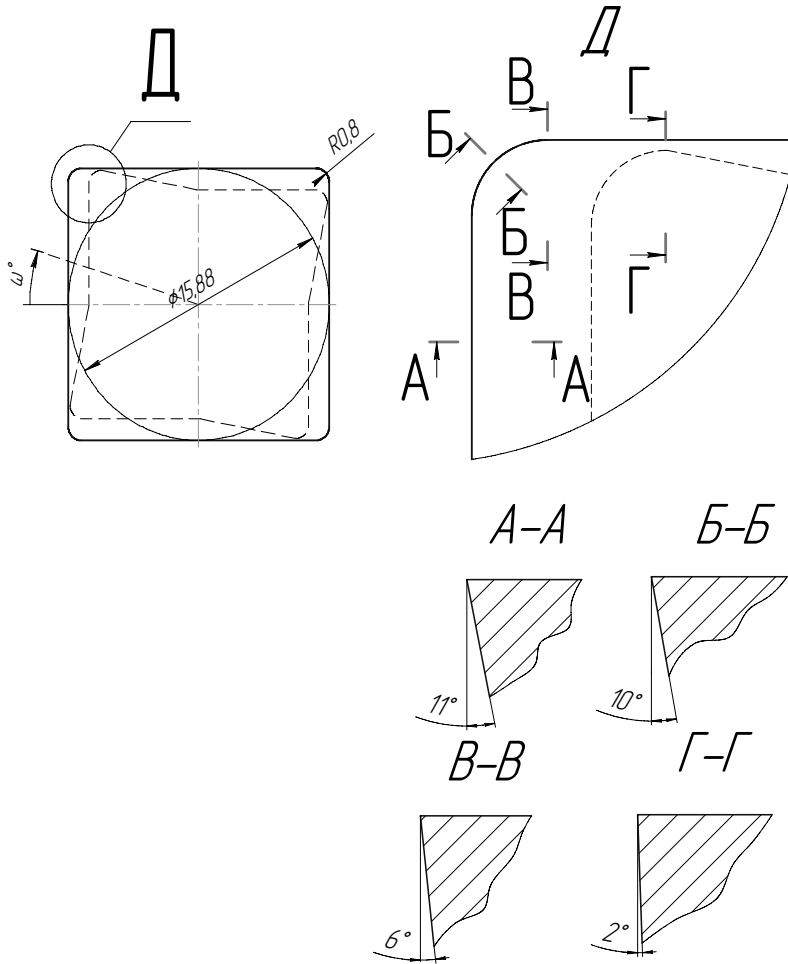


Рис. 5.4 Сменная многогранная режущая пластина с одинаковым исходным контуром.

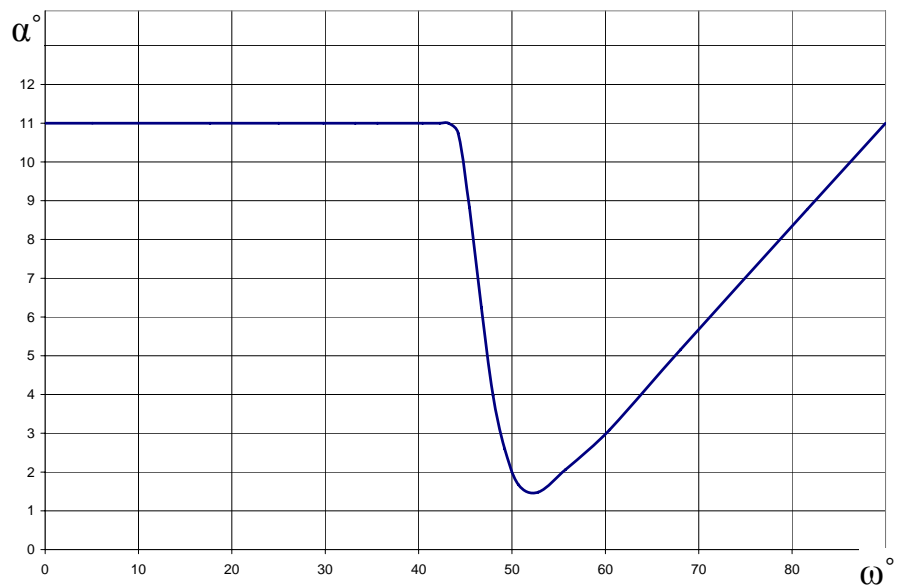


Рис. 5.5 Зависимость изменения заднего угла  $\alpha$  от угла поворота пластины  $\omega$

Предлагаемую форму задней поверхности пластины можно получить прессованием и последующим спеканием порошка твердого сплава и невозможностью. Затачивание задней поверхности на заточном оборудовании, сопряжено с некоторыми сложностями, поэтому разработан аналог СМП, у которой также обеспечивается переменный задний угол на выбранном участке. Задняя поверхность в данном случае получается за счет того, что опорная поверхность пластины повернута относительно рабочей (передней поверхности) на угол  $3-5^\circ$  вправо (рис. 5.6), что обеспечивает возрастание заднего угла на прямолинейном участке режущей кромки, затем его уменьшение на радиусном участке (рис. 5.7).

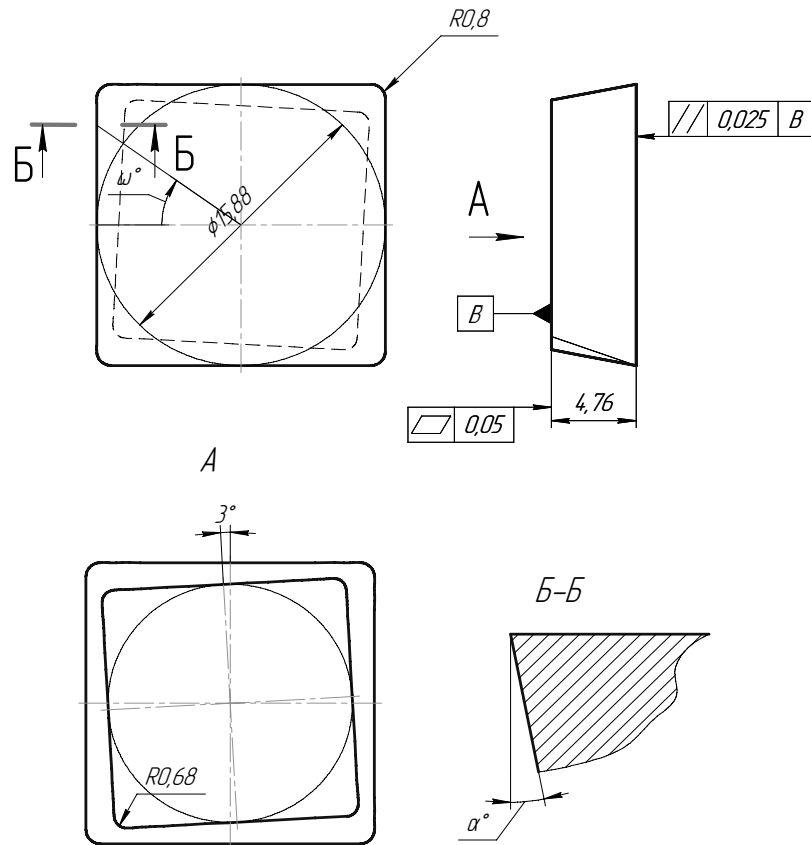


Рис. 5.6 Сменная многогранная режущая пластина с повернутым нижним основанием относительно верхнего

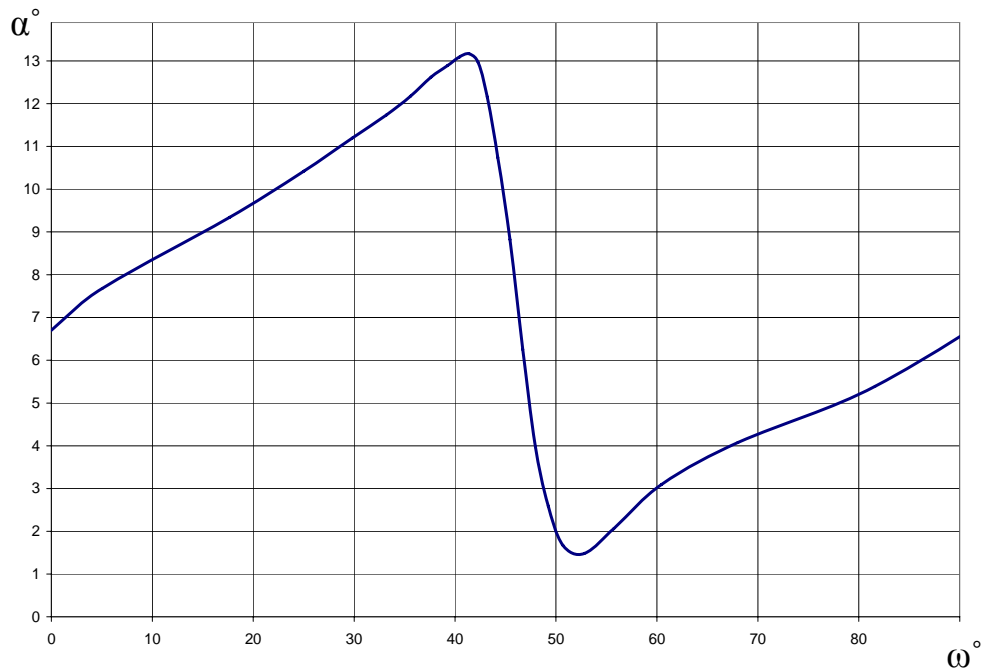


Рис. 5.7 Зависимость изменения заднего угла от поворота пластины

## 5.2 Конструирование СМП с равномерным распределением температуры вдоль режущей кромки путем создания дополнительных элементов на передней поверхности

Еще одним способом выравнивания температуры вдоль режущей кромки является создание на передней поверхности режущей пластины дополнительных теплоотводящих элементов.

Одним из вариантов конструирования является создание на передней поверхности так называемого выступающего «носика» у вершины рабочей части режущей кромки. По всему периметру на передней поверхности вдоль режущей кромки выполняется канавка переменного радиуса (рис. 5.8). Выступающая часть увеличивает угол заострения режущего клина у вершины, что и способствует снижению и перераспределению тепловых потоков.

Другим вариантом является создание на нерабочей части вспомогательной режущей кромки «порожка» (рис. 5.9), который при работе должен забирать долю теплоты, тем самым снижать температуру у вершины.

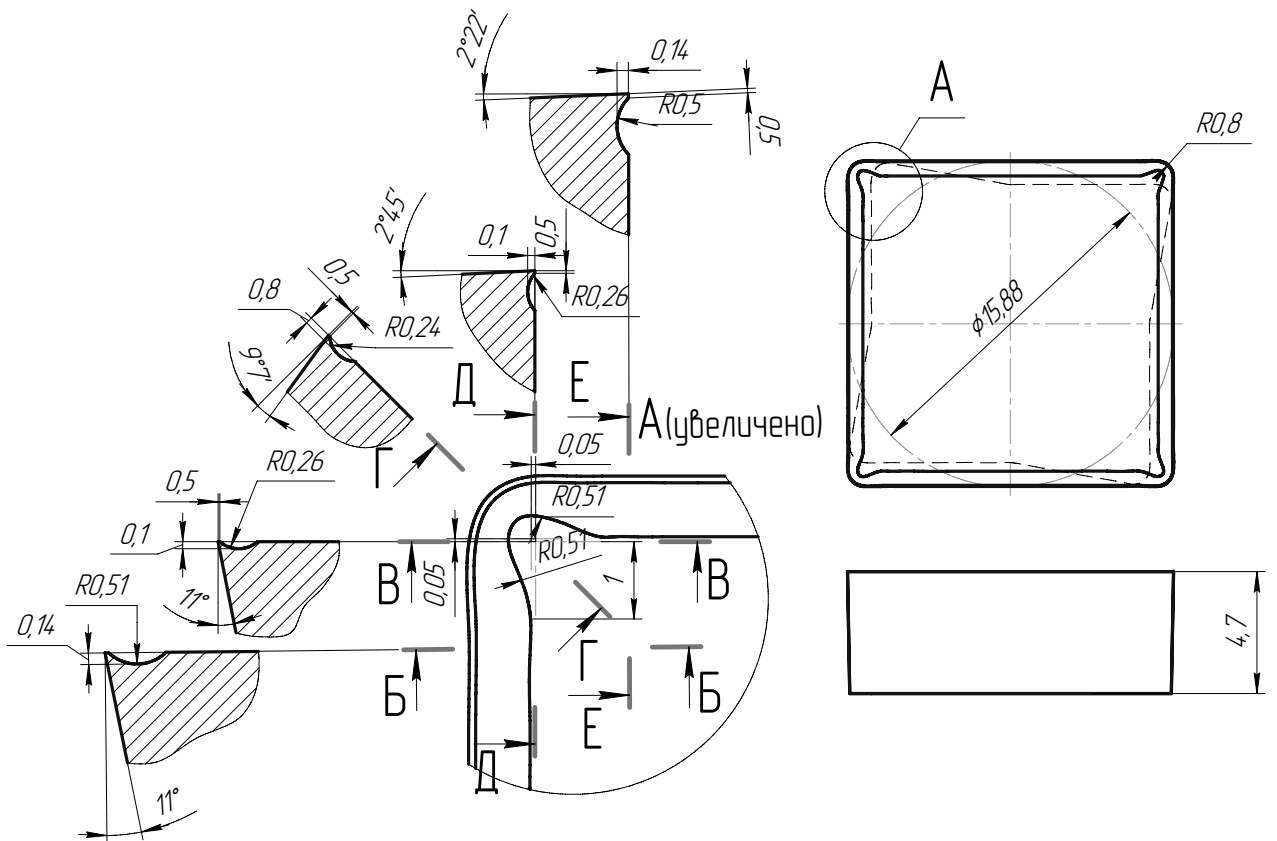


Рис. 5.8 СМП с выполненной канавкой на передней поверхности переменного радиуса

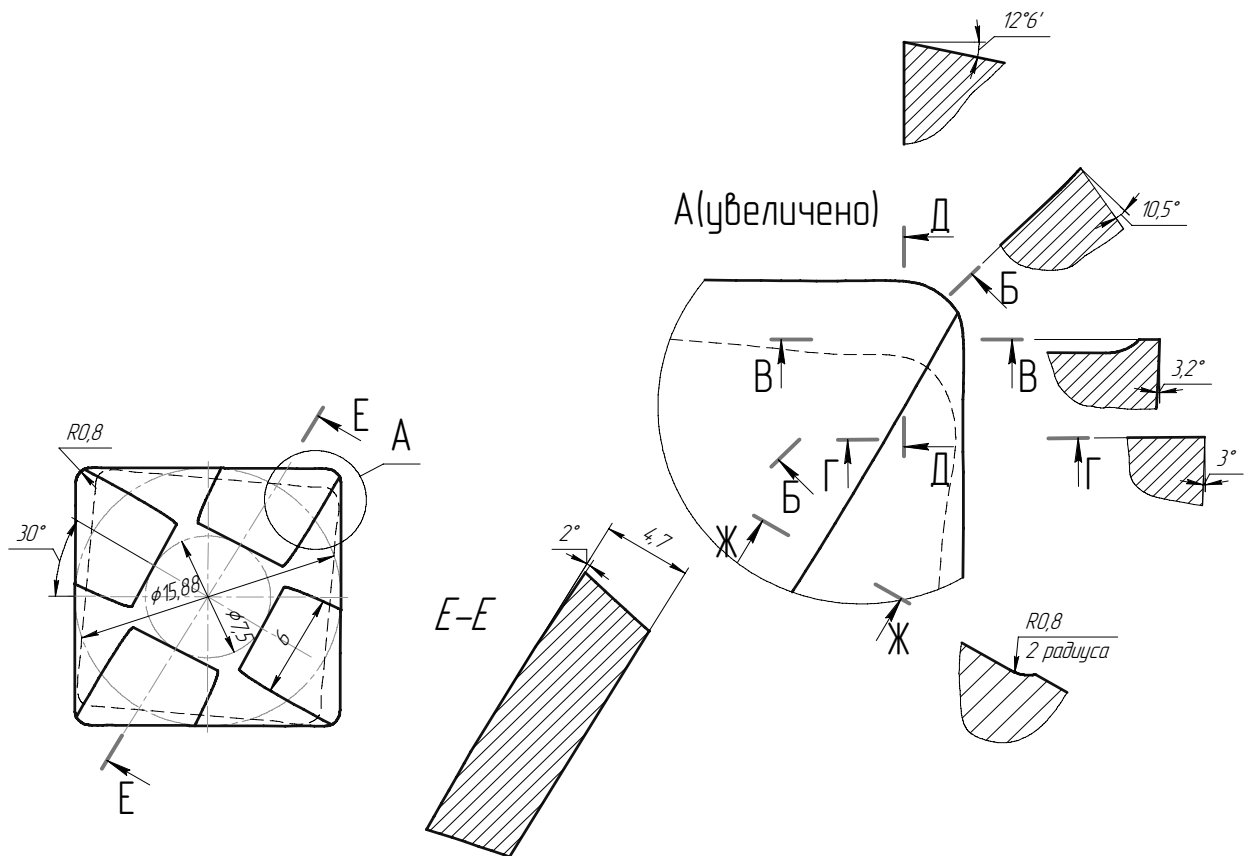


Рис. 5.9 СМП с повернутым основанием и выполненной поперечной плоской канавкой на передней поверхности

На рис. 5.10 показаны модели предлагаемых конструкций СМП, с дополнительными элементами на передней поверхности и переменным задним углом

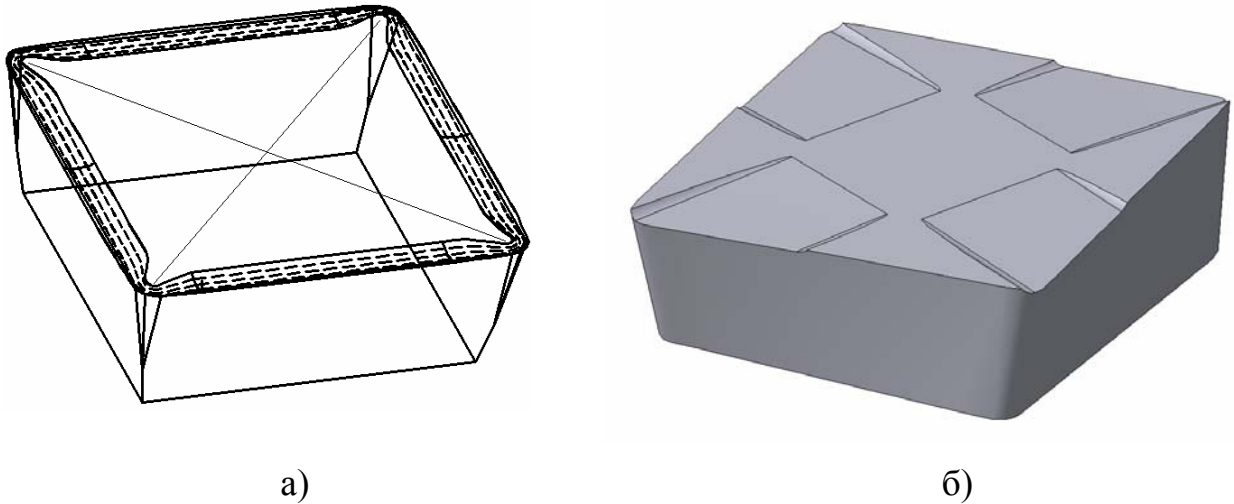


Рис. 5.10 Модели предлагаемых сменных многогранных пластин

### 5.3 Сравнение распределений температуры вдоль режущей кромки сконструированных пластин

Для оценки предлагаемых конструкций пластин по критерию изменения температуры вдоль режущей кромки были построены их твердотельные модели и произведены расчеты температуры методом конечных элементов с одинаковыми исходными данными для каждой предлагаемой пластины: Сталь 45 - Т5К10,  $V=100\text{м/мин}$ ,  $S=0,26\text{ мм/об}$ ,  $t=1,2\text{мм}$ .

Таким образом, были произведены расчеты температуры вдоль режущей кромки всех предлагаемых конструкций СМП (рис.5.11-5.14).

Оценка производилась по диапазону температур вдоль всего рабочего участка режущей кромки. Кроме того, за счет улучшенного теплоотвода наблюдалось общее снижение средней температуры, что также является положительным показателем.



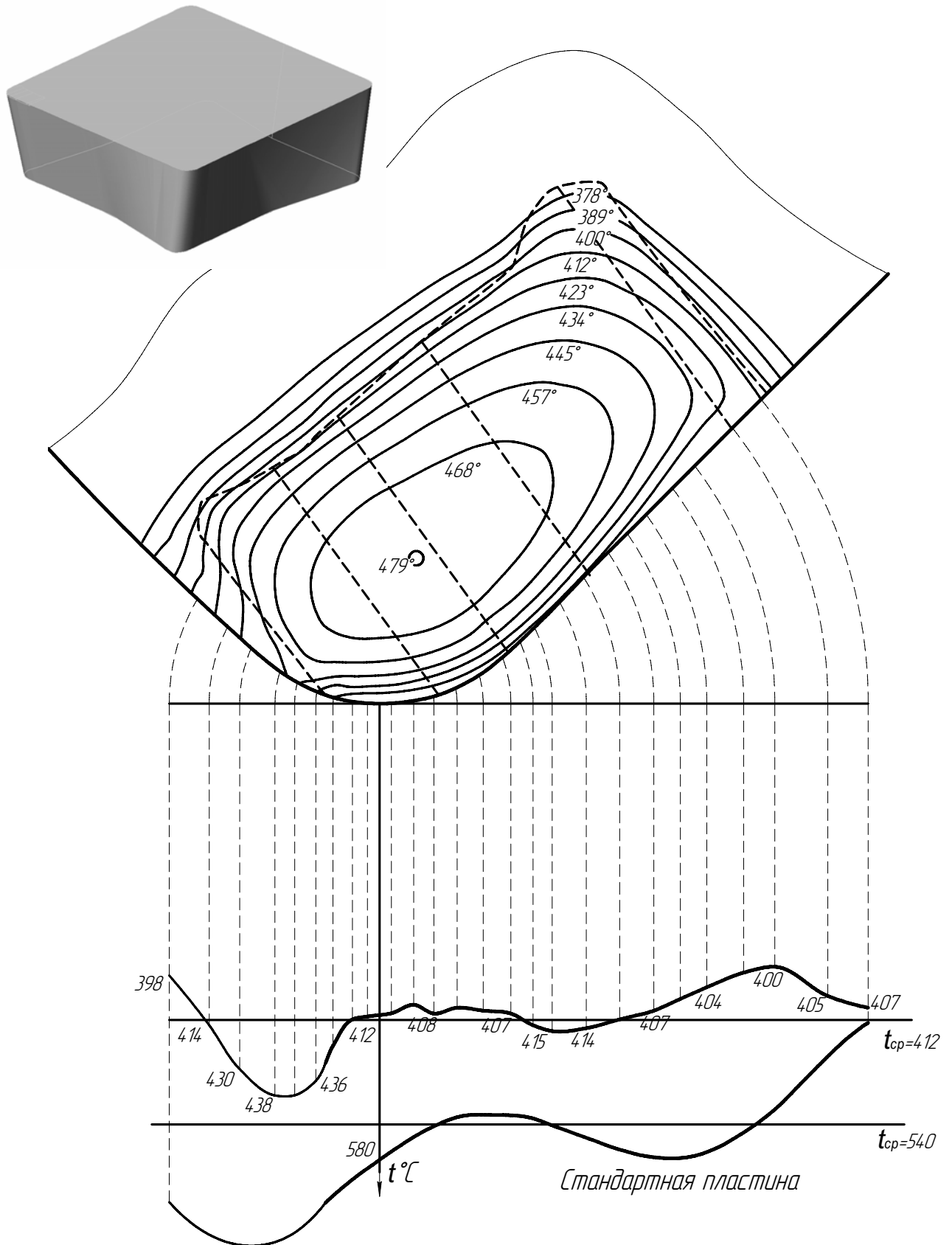


Рис. 5.11 Распределение температуры вдоль режущей кромки СМП с параллельными образующими по задней поверхности: Сталь 45 - Т5К10,  $V=100$  м/мин,  $S=0,26$  мм/об,  $t=1,2$  мм

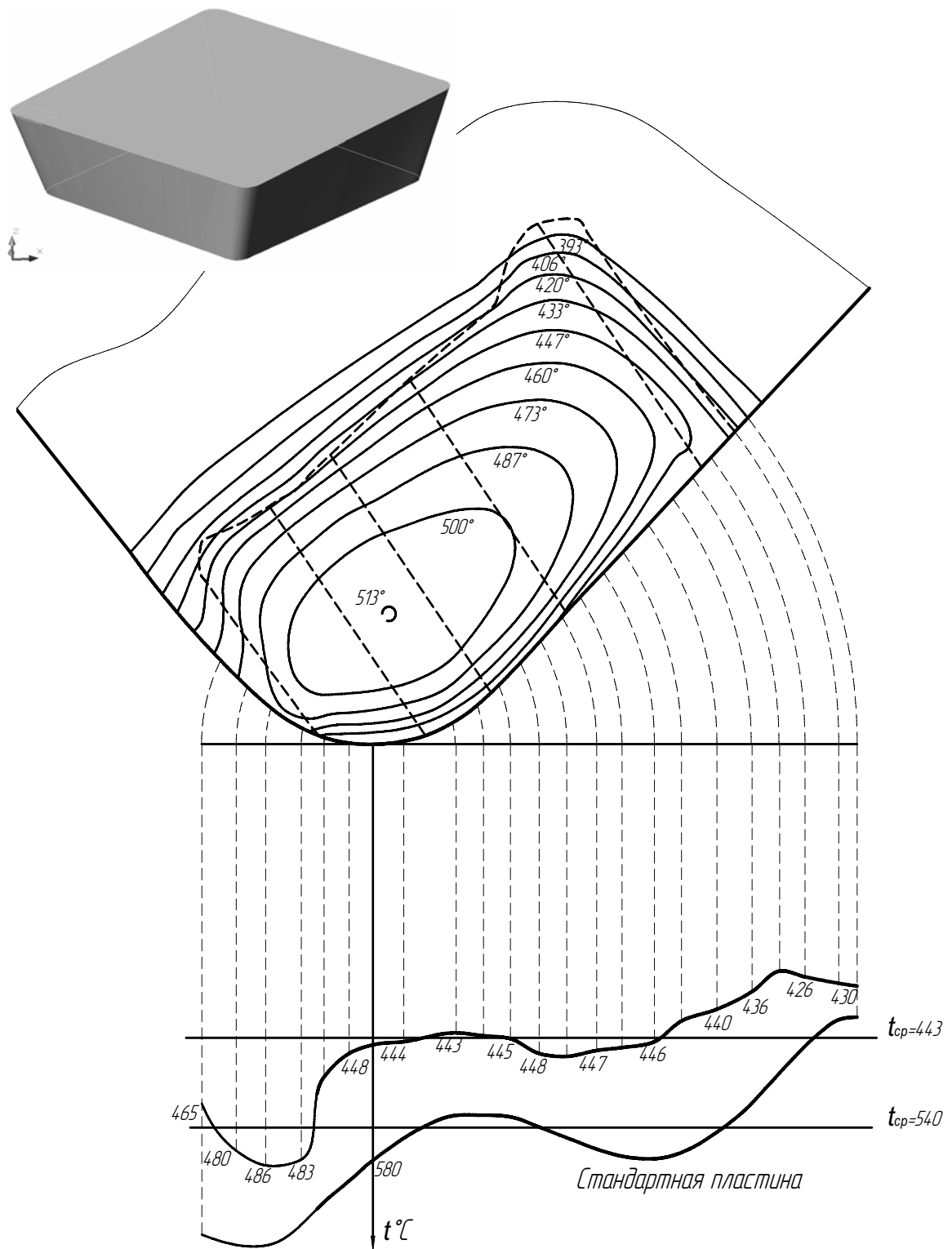


Рис. 5.12 Распределение температуры вдоль режущей кромки СМП с повернутым нижним основанием относительно верхнего: Сталь 45 - Т5К10,  $V=100\text{м/мин}$ ,  $S=0,26\text{ мм/об}$ ,  $t=1,2\text{мм}$

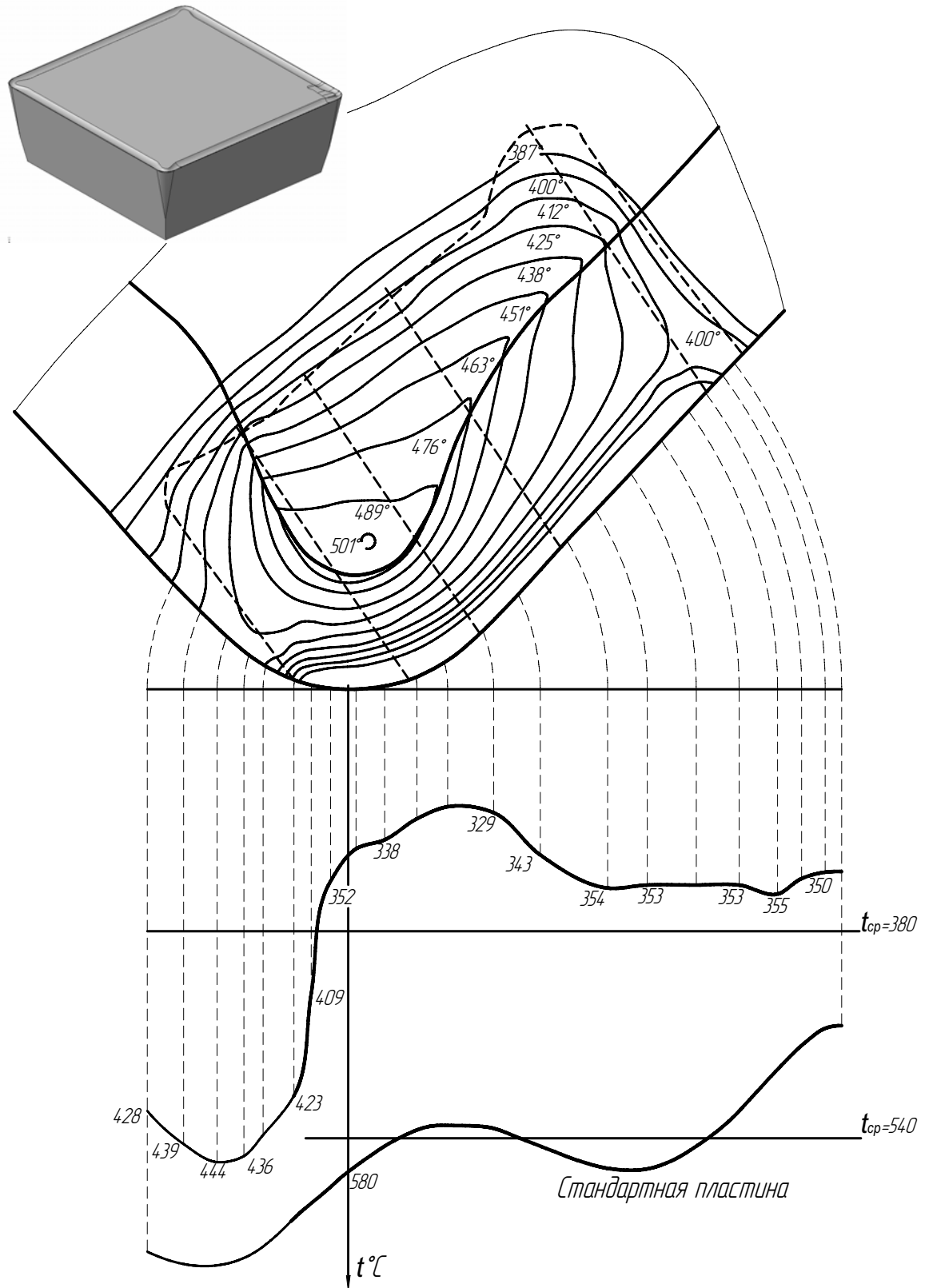


Рис. 5.13 Распределение температуры вдоль режущей кромки СМП с канавкой на передней поверхности переменного радиуса: Сталь 45 - Т5К10,  $V=100\text{м/мин}$ ,  $S=0,26\text{ мм/об}$ ,  $t=1,2\text{мм}$

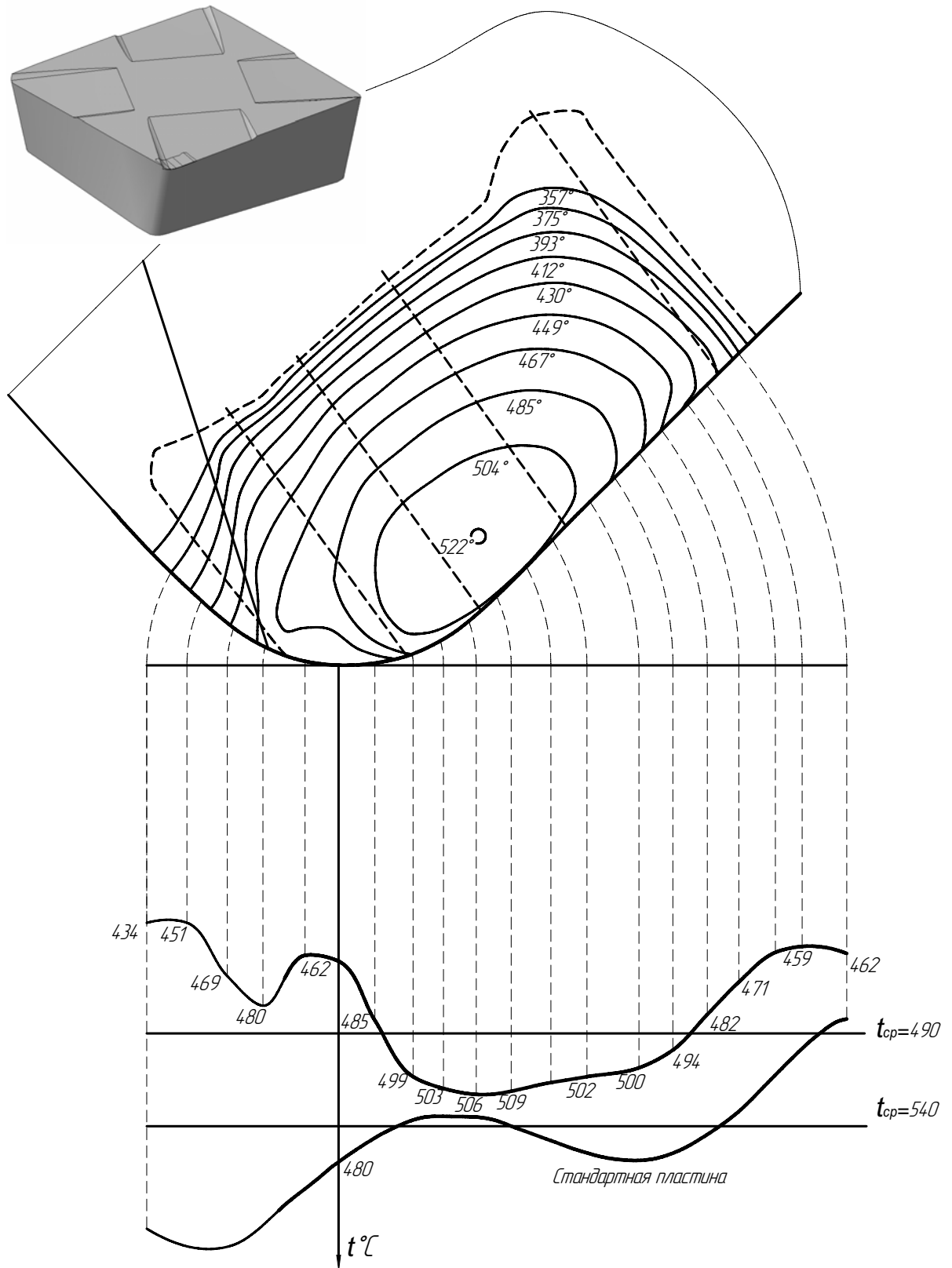


Рис. 5.14 Распределение температуры вдоль режущей кромки СМП с плоской канавкой на передней поверхности и повернутым нижним основанием относительно верхнего: Сталь 45 - Т5К10,  $V=100\text{м/мин}$ ,  $S=0,26\text{ мм/об}$ ,  $t=1,2\text{мм}$

Результаты расчета температуры режущей кромки

Таблица 5.1

Предлагаемая конструкция СМП	Диапазон температуры вдоль режущей кромки $\Delta t^\circ$	Средняя температура режущей кромки, $t_{cp}^\circ\text{C}$
1. С параллельными образующими по задней поверхности	30	412
2. С повернутым нижним основанием относительно верхнего	26	443
3. С канавкой на передней поверхности переменного радиуса	95	380
4. С плоской канавкой на передней поверхности	44	490

В табл. 5.1 представлены результаты расчетов температуры режущей кромки, из которых видно, что у всех предлагаемых конструкций за счет улучшенной геометрии СМП снижена средняя температура по сравнению со стандартной формой. Наименьший диапазон температуры  $26^\circ$  наблюдается у пластины с повернутым нижним основанием, поэтому предполагаем, что износ задней поверхности будет более равномерным, чем у других конструкций.

У пластины с канавкой на передней поверхности переменного радиуса диапазон температуры вдоль рабочего участка наибольший  $95^\circ$ , но с другой стороны уровень средней температуры наименьший, поэтому данная конструкция имеет положительный эффект. Для снижения диапазона температуры на вспомогательной режущей кромке необходимо изменить участок передней поверхности вблизи вспомогательной режущей кромки.

## 5.5 Сравнительное экспериментальное исследование эксплуатационных свойств предлагаемых СМП

Для подтверждения справедливости методики конструирования сменных многогранных пластин с улучшенным температурным режимом вдоль режущей кромки была изготовлена партия твердосплавных сменных многогранных пластин и проведена серия сравнительных стойкостных экспериментов. Описание оборудования и приспособления, применяющегося при проведении экспериментов, рассмотрено в главе 4.

В качестве исходных экспериментальных образцов были взяты стандартные четырехгранные пластины SPGN 16 05 08 ГОСТ19044-80 с плоской передней поверхностью и задним углом  $11^\circ$  из твердого сплава Т5К10. Партия стандартных пластин была разделена на две части (рис. 5.15). Одна часть затачивалась по задней поверхности, а вторая оставлялась без изменений. Заточка по периметру задних поверхностей пластин с повернутым на  $3^\circ$  по часовой стрелке нижним основанием относительно верхнего. Пластины затачивались в фирме «Меон» г. Томск на заточном станке с ЧПУ для шлифовки пластин по периметру модели WAM 300/35 фирмы «Wendt» алмазным кругом  $250 \times 200 \times 8$  6A2×AC6×80/63. При заточке пластины на станке, прямолинейную грань аппроксимировали участком дуги радиуса  $R=700$  мм и, в зависимости от угла поворота пластины, задавали нужное значение заднего угла.

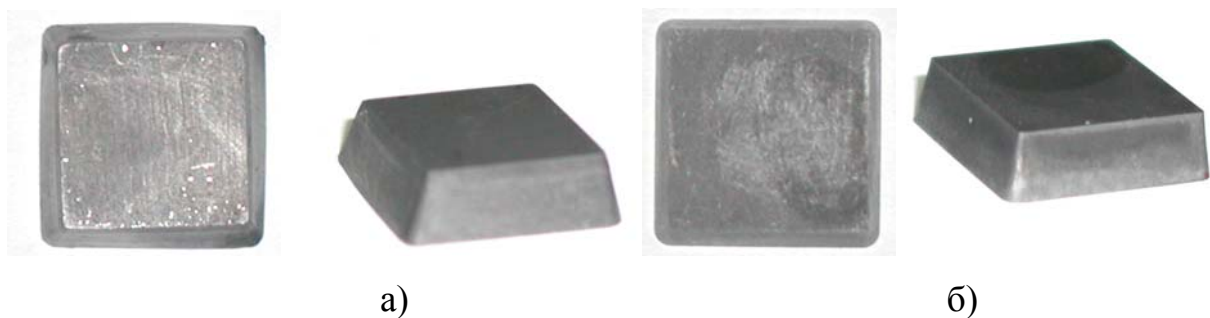


Рис. 5.15 Фотографии образцов сменных многогранных режущих пластин: а) проектная, б) стандартная

Производилось продольное точение стали 45 на токарном станке 1К62 стандартным и предлагаемым вариантами пластин со следующими режимами: скорость резания  $V=150$  м/мин, глубина  $t=1,5$  мм, величина подачи  $S=0,39$  мм/об. Ориентация пластины в корпусе державки параллельно основной плоскости с главным углом в плане  $\varphi=45^\circ$ .

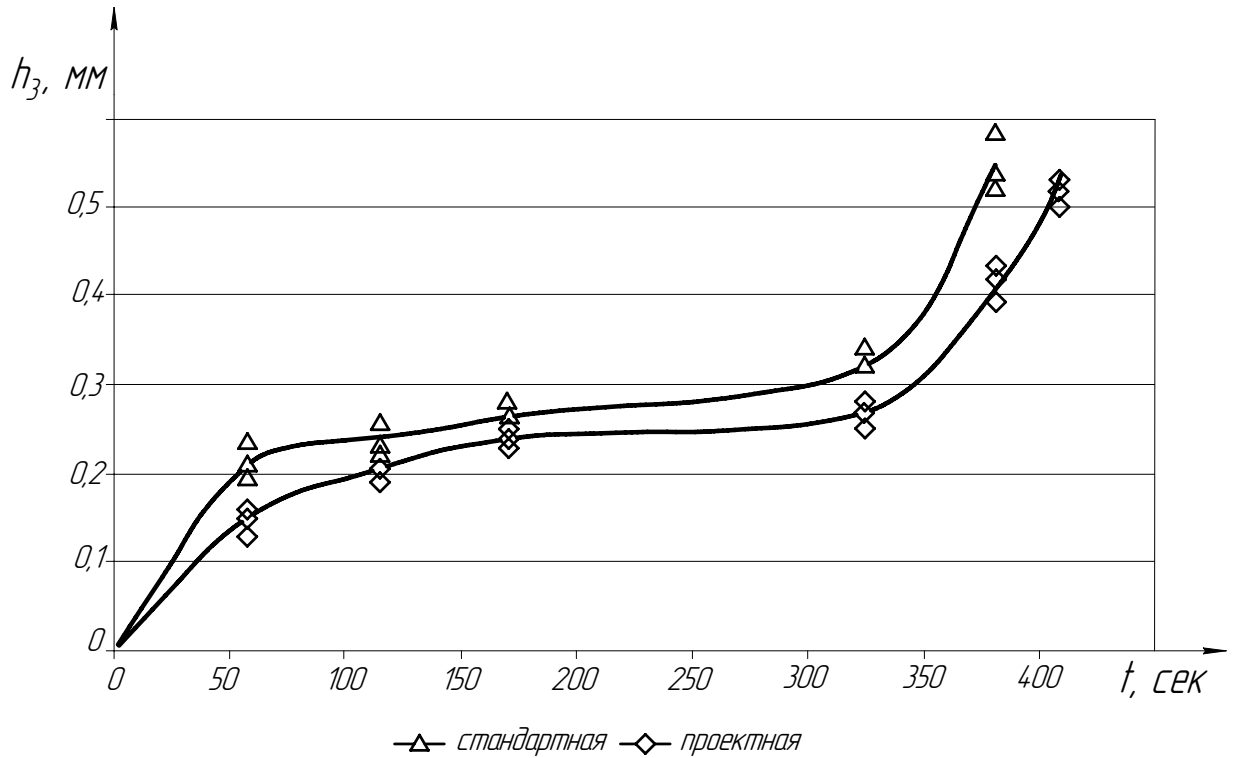


Рис. 5.16 Кривые изнашивания  $h_{3 \max}$  задних поверхностей: Сталь 45, Т5К10,  $r=0,8$  мм,  $\gamma=0^\circ$ ,  $V=150$  м/мин,  $S=0,39$  мм/об,  $t=1,5$  мм

Кривая износа проектной пластины имеет более пологий вид, что является положительным моментом. Также из построенных кривых фаски износа задней поверхности, видно, что катастрофический износ стандартной пластины начинается раньше по времени, чем у предлагаемой пластины, а, следовательно, стойкость предлагаемой пластины выше стандартной.

При критерии максимальной фаски износа по задней поверхности  $h_{3 \max}=0,5$  мм разница по времени будет 32 сек. Если принять время работы стандартной пластины 371 сек за 100% , то разница будет соответствовать 9% .

### 5.5 Оценка эксплуатационных свойств предлагаемых СМП с помощью коэффициента равномерности изнашивания

В условиях несвободного резания при оценке ресурса металлорежущего инструмента можно использовать коэффициент равномерности изнашивания вдоль режущей кромки  $k_{pu}$ , который может определяться отношением площади фаски износа к площадке, измеряемой максимальной величиной фаски износа по задней поверхности.

$$k_{pu} = \frac{\int_0^b h_3 \cdot x dx}{h_{3 \max} \cdot b}, \quad (5.1)$$

Для условия максимальной работоспособности инструмента необходимо, чтобы площадь прямоугольника по максимальному значению фаски износа приближалась к реальной изношенной площадке. Т.е. коэффициент  $k_{pu}$  должен стремиться к единице.

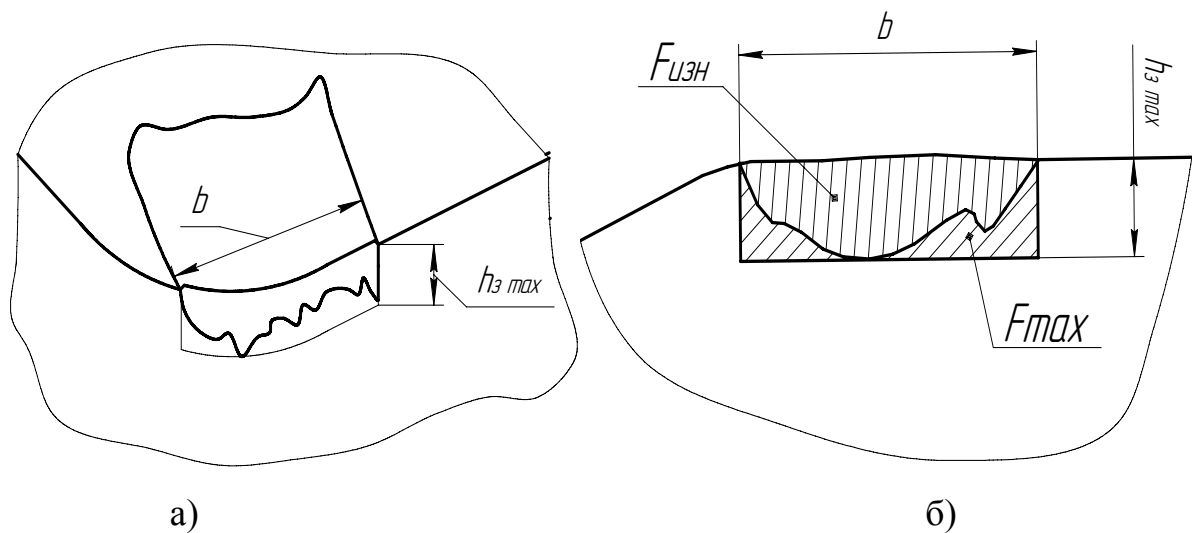


Рис 5.17 Схема к определению коэффициента равномерного изнашивания

Применим коэффициент равномерности изнашивания  $k_{pu}$ , который определяется отношением суммарной площадки износа задней поверхности  $F_{изн}$  к площади описываемой по максимальному значению фаски износа ( $F_{изн} + F_{max}$ ) при оценке стойкостных экспериментов.



$$k_{\text{ри}} = \frac{F_{\text{изн}}}{F_{\text{max}} + F_{\text{изн}}} \quad (5.2)$$

При проведении стойкостных экспериментов при каждом измерении максимальной фаски износа определялся коэффициент равномерности износа задней поверхности. Производилась остановка процесса резания для фотографирования контактных площадок для обеих пластин через одинаковые интервалы времени (рис.5.19-5.22). Затем фотографии заносились в компьютер, где обводились и обмерялись изношенные задние поверхности.

В результате обработки полученных данных, были рассчитаны коэффициенты равномерности износа задних поверхностей для стандартной и проектной пластин при различных интервалах времени (рис.5.18).

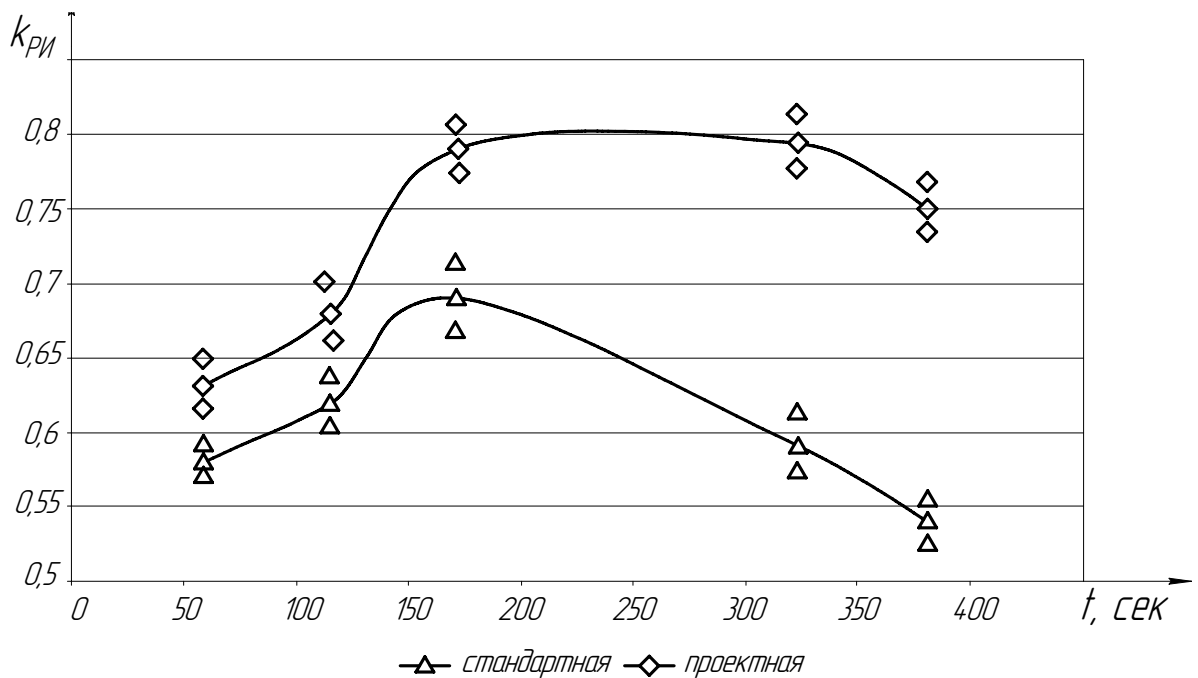
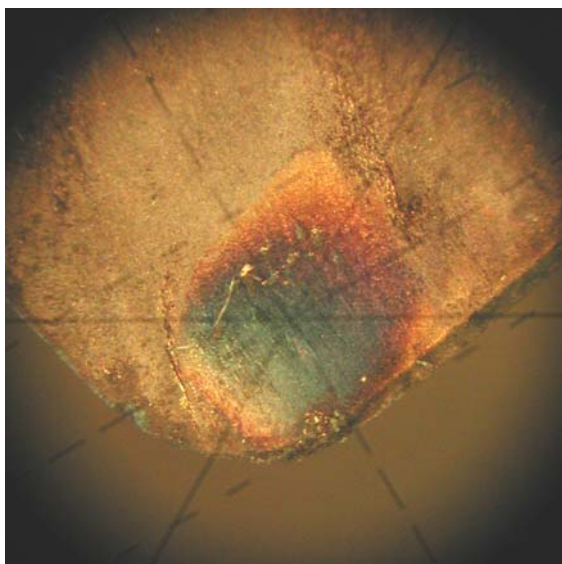


Рис. 5.18 Коэффициенты равномерности изнашивания задних поверхностей  $k_{\text{ри}}$ , в зависимости от времени работы пластины: Сталь 45, Т5К10,  $r=0,8\text{мм}$ ,  $\gamma=0^\circ$ ,  $V=150\text{ м/мин}$ ,  $S=0,39\text{ мм/об}$ ,  $t=1,5\text{мм}$

Из графика видно, что характер изменения кривых одинаков как для стандартной пластины, так и для проектной пластины. Здесь видно, что по мере увеличения времени резания, наблюдается увеличение коэффициента

равномерности, но при пути резания соответствующего 170 сек, кривая коэффициента стандартной пластины резко уменьшается, в то время как у проектной пластины остается постоянной и лишь во время катастрофического износа появляется ее снижение.

Проектная



Стандартная

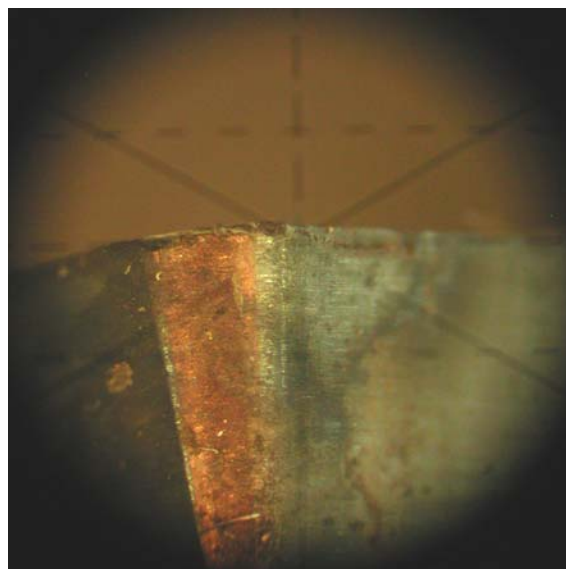
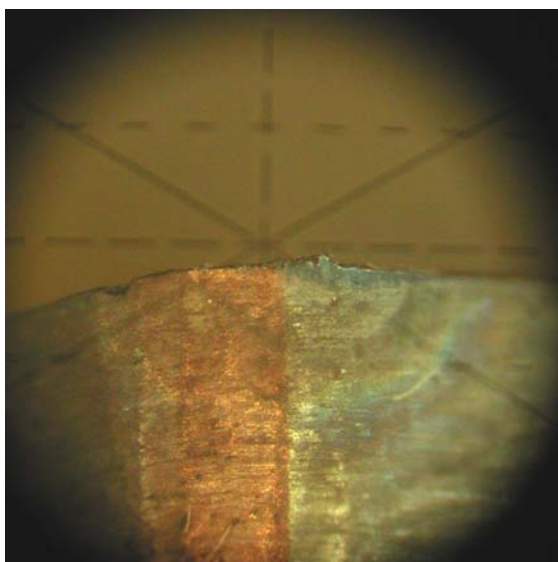
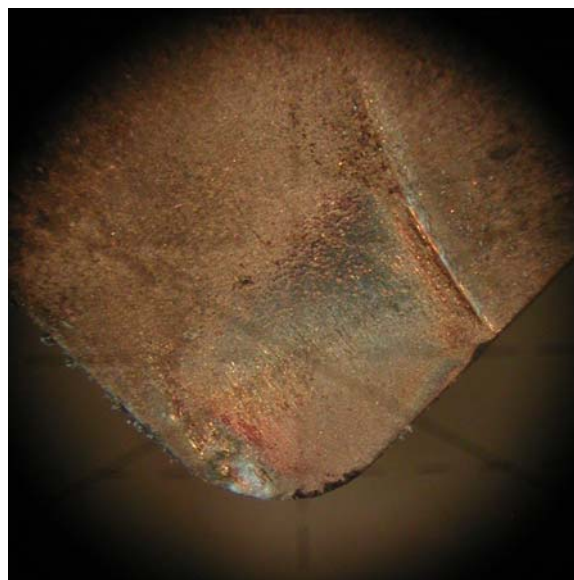
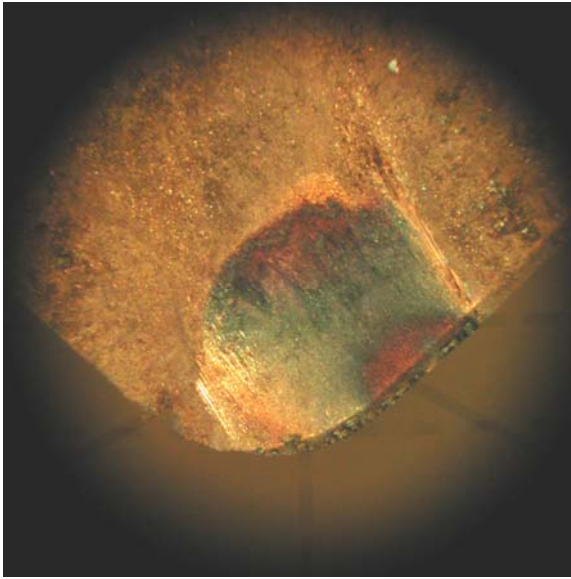


Рис. 5.19 Фотографии износа после 58 сек резания: Сталь 45, Т5К10,  $r=0,8\text{мм}$ ,  $\gamma=0^\circ$ ,  $V=150\text{ м/мин}$ ,  $S=0,39\text{ мм/об}$ ,  $t=1,5\text{мм}$

$$k_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{изн}}}{F_{\text{max}} + F_{\text{изн}}} = 0,58$$

$$k_{\text{ст}} = \frac{F_{\text{изн}}}{F_{\text{max}} + F_{\text{изн}}} = 0,63$$

Проектная



Стандартная

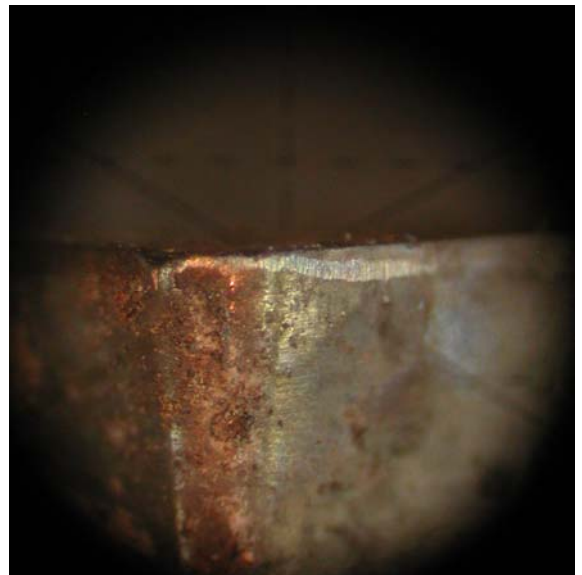
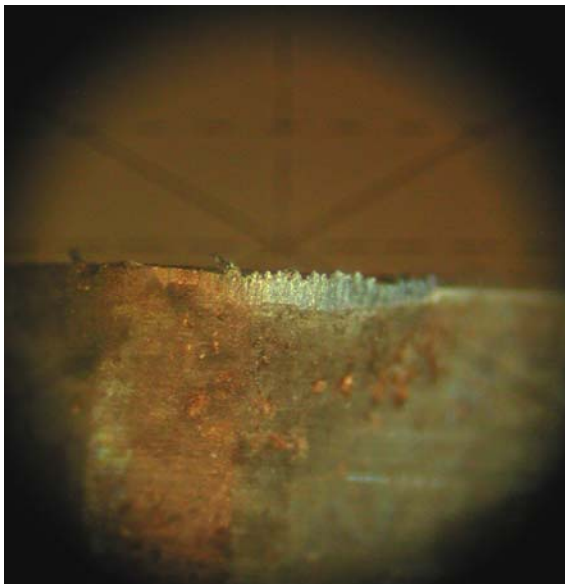
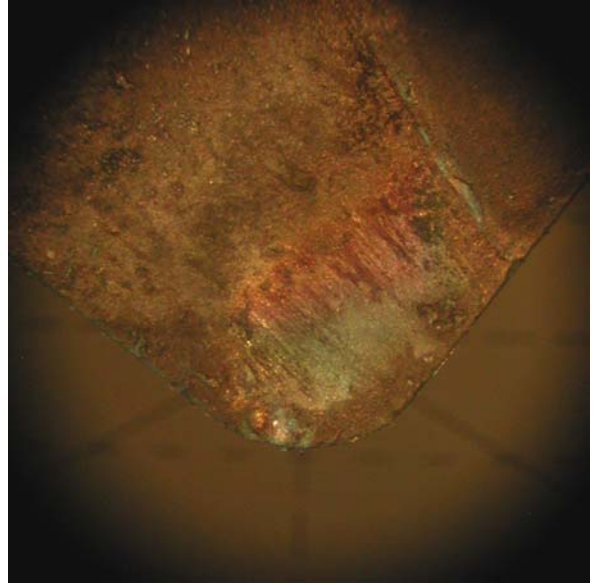
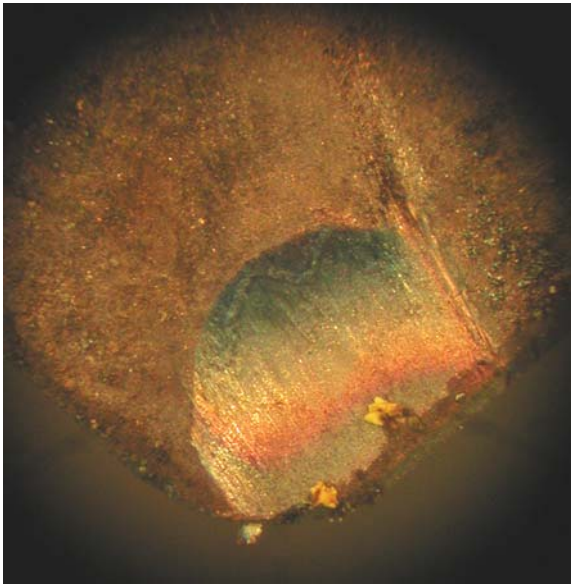


Рис. 5.20 Фотографии износа после  $t=1$  мин 53сек резания: Сталь 45,  
Т5К10,  $r=0,8\text{мм}$ ,  $\gamma=0^\circ$ ,  $V=150$  м/мин,  $S=0,39$  мм/об,  $t=1,5\text{мм}$

$$k_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{изн}}}{F_{\text{max}} + F_{\text{изн}}} = 0,68$$

$$k_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{изн}}}{F_{\text{max}} + F_{\text{изн}}} = 0,69$$

Проектная



Стандартная

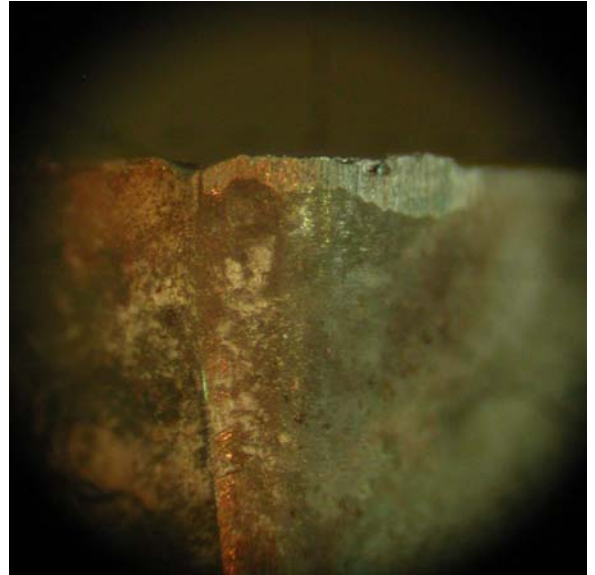
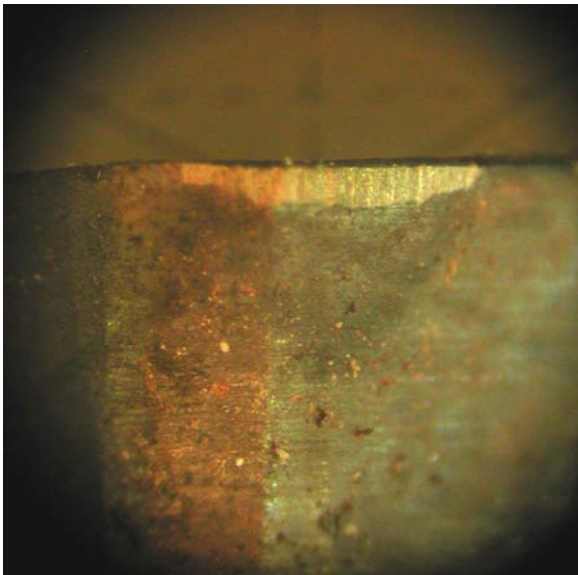
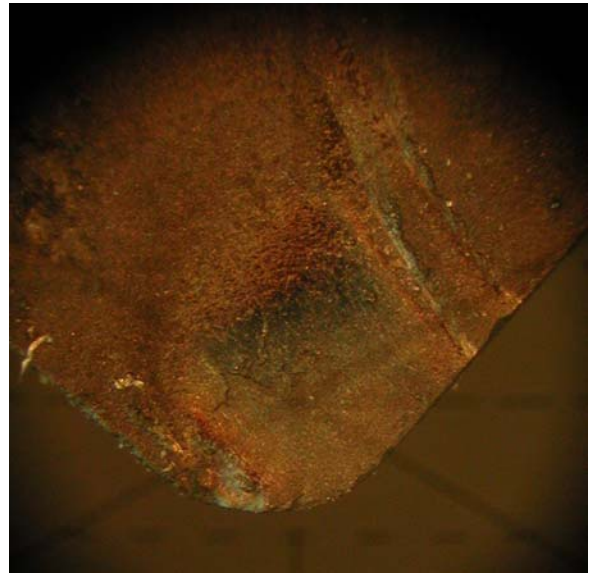
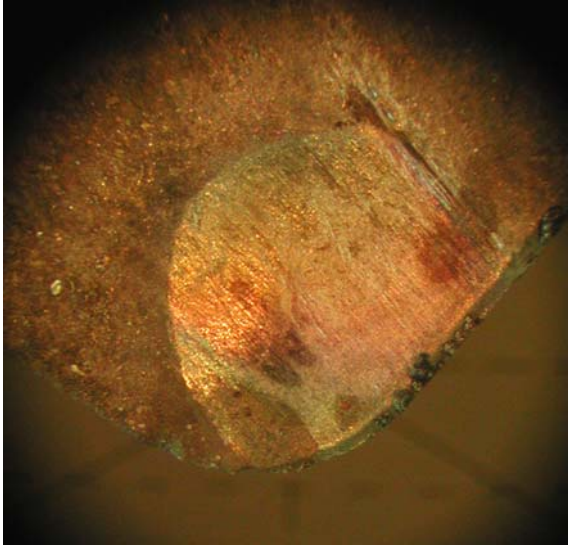


Рис. 5.21 Фотографии износа после  $t=3$  мин 50 сек резания: Сталь 45, Т5К10,  $r=0,8$  мм,  $\gamma=0^\circ$ ,  $V=150$  м/мин,  $S=0,39$  мм/об,  $t=1,5$  мм

$$k_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{изн}}}{F_{\text{max}} + F_{\text{изн}}} = 0,79$$

$$k_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{изн}}}{F_{\text{max}} + F_{\text{изн}}} = 0,59$$

Проектная



Стандартная

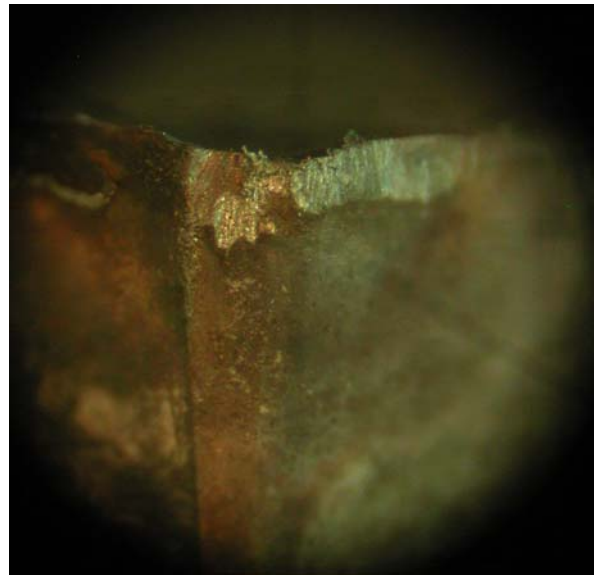
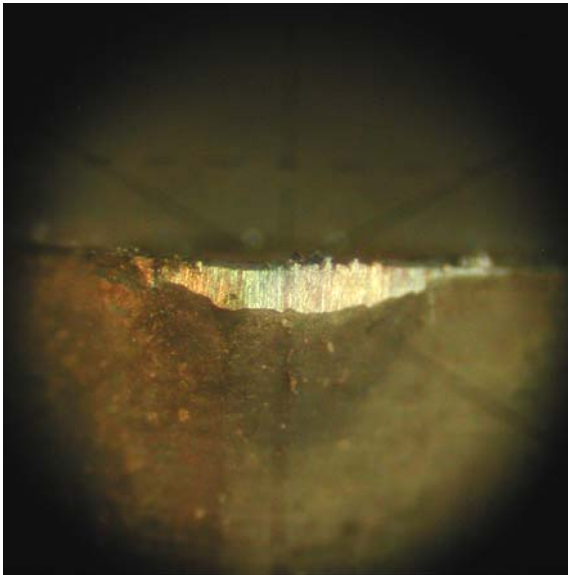
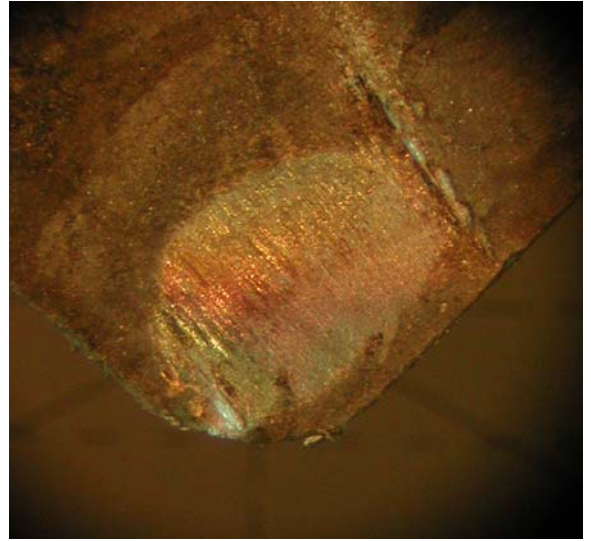


Рис. 5.22 Фотографии износа после  $t=7$  мин резания: Сталь 45, Т5К10,  
 $r=0,8\text{мм}$ ,  $\gamma=0^\circ$ ,  $V=150$  м/мин,  $S=0,39$  мм/об,  $t=1,5\text{мм}$

$$k_{\text{ри}} = \frac{F_{\text{изн}}}{F_{\text{max}} + F_{\text{изн}}} = 0,75$$

$$k_{\text{ри}} = \frac{F_{\text{изн}}}{F_{\text{max}} + F_{\text{изн}}} = 0,54$$

## 5.5 Выводы по главе 5

1. Равномерное изнашивание задней поверхности СМП при несвободном резании обеспечивается за счет равномерности температуры вдоль режущей кромки.

2. На основе температурных расчетов и теплового анализа получены новые формы задних поверхностей СМП. Разработаны новые сменные многогранные режущие пластины, с уменьшенным диапазоном температуры вдоль режущей кромки, предназначенные для чистового продольного точения: 1 - сменная многогранная режущая пластина с одинаковым исходным контуром, размещенным вдоль режущей кромки; 2 - сменная многогранная режущая пластина с повернутым нижним основанием относительно верхнего; 3 - сменная многогранная режущая пластина с одинаковым исходным контуром с выполненной канавкой на передней поверхности переменного радиуса; 4 - сменная многогранная режущая пластина с повернутым нижним основанием относительно верхнего и выполненной поперечной плоской канавкой на передней поверхности.

7. Выравнивание износа по задней поверхности вдоль режущей кромки можно обеспечить путем изменения геометрических параметров режущего клина: угла заострения, переднего и заднего углов. А также для отвода теплоты из зоны нагрева можно создавать на рабочих поверхностях дополнительные элементы.

3. Проведенные стойкостные эксперименты на сконструированной и изготовленной режущих пластинах с повернутым нижним основанием относительно верхнего показали, что стойкость СМП с предложенной формой задней поверхности при скорости резания  $V=150$  м/мин, глубине  $t=1,5$  мм и подаче  $S=0,39$  мм/об, превосходит стойкость стандартной пластины в среднем на 8,5%.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

По результатам, полученным в представленной работе, можно сделать следующие выводы:

1. Определяющим фактором переменного износа задней поверхности при несвободном резании является неравномерное распределение температуры на площадках контакта режущего инструмента со стружкой и с обрабатываемой заготовкой, которая меняет интенсивность изнашивания при нагреве. Одним из путей повышения стойкости инструмента является обеспечение равномерности изнашивания задних поверхностей за счет рациональной формы режущего клина, изменяющей величины и направления тепловых потоков.

2. Разработана следующая методика расчета температуры при несвободном резании: а) определение направления схода стружки; б) расчет и построение зон пластических деформаций в каждом сечении, параллельно сходу стружки; в) определение компонент напряжений вдоль граничных линий зон стружкообразования; г) расчет в каждом сечении контактных напряжений; д) расчет итоговых плотностей тепловых потоков; е) расчет температурных полей на поверхностях СМП методом конечных элементов.

3. Картины изотерм, полученных как из экспериментальных исследований, так и с помощью числового расчета показали, что температура вдоль режущей кромки прилегающих задних поверхностей имеет переменное значение. Причем, теплофизические характеристики на вид кривой распределения температуры влияния не оказывают. Большой нагрев задней поверхности вследствие близкого расположения источника нагрева на передней поверхности и отсутствия стока теплоты в заготовку наблюдается на вспомогательной режущей кромке.

4. Предложено управлять тепловыми потоками путём изменения геометрических параметров режущего клина в сечениях по направлению схода стружки. Разработаны формы СМП: 1 - с одинаковым исходным контуром,

размещенным вдоль режущей кромки; 2 - с повернутым нижним основанием относительно верхнего; 3 - с одинаковым исходным контуром и канавкой на передней поверхности переменного радиуса; 4 - с повернутым нижним основанием относительно верхнего и с плоской канавкой, выполненной в направлении схода стружки. Эти формы позволяют снизить как среднюю температуру на поверхностях, так и диапазон ее колебания вдоль режущей кромки.

5. Сравнительные экспериментальные исследования эксплуатационных свойств сменных многогранных пластин с разработанной формой №2 и стандартной пластиной показали, что стойкость пластины с предлагаемой формой задней поверхности выше, чем пластин со стандартной формой.

6. В качестве критерия оценки показателя работоспособности СМП предложен коэффициент равномерности изнашивания задних поверхностей. Стойкостные испытания показали, что у проектной режущей пластины он имеет большие значения на протяжении всего пути резания.

7. Основные результаты работы внедрены на ООО «Юрга-гидравлика» и ООО «ЮТА». На этих предприятиях была применена СМП с повернутым нижним основанием относительно верхнего, которая использовалась при обработке штоков гидроцилиндров шахтных крепей. Подтверждено повышение стойкости по сравнению с ранее применяемыми пластинами до 10%.

8. На одну из разработанных форм пластин получен патент РФ на полезную модель №52752.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматическое управление процессом резания/ С.С. Силин, В. В. Трусов, В. Я. Яхонтов и др.//Станки и инструмент. 1971. №1. С. 13 – 14.
2. Аверьянова И.Э. Комплексное влияние переднего угла и угла наклона режущей кромки на главную составляющую силы резания// СТИН. – 2003. - № 12. – С.8 – 10.
3. Андреев Г. С. Методика и средства определения температуры контактных поверхностей инструмента при периодическом прерывистом резании//СТИН. – 1974. – № 11. – С. 34 – 36.
4. Андреев Г.С. Контактные напряжения при периодическом резании.// Вестник машиностроения. – 1969. – № 8. – С. 63 – 66.
5. Армареги И. Дж. А., Браун Р.Х. Обработка металлов резанием. М.: Машиностроение. –1977. –325с.
6. Безъязычный В.Ф., Михайлов С.В. Формообразование стружки при резании металлов. // Инженерный журнал. –2005. –№2 –С.26–32
7. Берлинер Э.М. Расчет сил резания и среднего коэффициента трения при свободном прямоугольном точении// Известие вуз, Машиностроение. - №3. – 1975. – С.158 – 162.
8. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. –М.: Машиностроение, 1975. –344с.
9. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. –М.: МИР, 1987. -524с.
- 10.Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. –М: Наука, 1986. –544с.
- 11.Бурков П.В. Износостойкость композиционного материала на основе карбида титана// Обработка металлов. – 2005. - № 1. – С.27 – 29.
- 12.Васильев С.В. ЭДС и температура резания//Станки и инструмент. – 1980. - №10. – С.20 – 22.
- 13.Васильев С.В. Измерение ЭДС резания//Станки и инструмент. – 1983. - №6. – С.23.

14. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. –М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. –448с.
15. Верещака А. С., Провоторов М. В., Кузин В. В., Тимощук Е. А., Майер А. А. Исследование теплового состояния режущих инструментов с помощью многопозиционных термоиндикаторов// Вестник машиностроения. – 1986. – № 1. – С. 45 – 49.
16. Воробьев А.В., Проскоков А.В., Моховиков А.А. Обеспечение равномерного изнашивания сменных многогранных пластин путем измерения топографии передней поверхности// Современная техника и технологии: Труды восьмой международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. -Томск: Изд. ТПУ, 2001. –Т1.- С.171-172
17. Воронцов А.Л. Сопоставление применения метода конечных элементов и аналитических методов решения задач обработки давлением.// Вестник машиностроения. – 2003. – № 1. – С. 67 – 71.
18. Гольдшмидт М.Г. Деформации и напряжения при резании металлов. – Томск: СТТ, 2001 –180с.
19. Гордон М.Б. Распределение сил трения на передней грани резца в зоне контакта со стружкой// Вестник машиностроения. - 1953. -№ 5. -С. 53-59.
20. Грановский Г.И. Кинематика резания. – М.: Машгиз, 1948. – 200с.
21. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985. –304с.
22. Грубый С.В. Расчетные параметры процесса резания и стружкообразования при точении конструкционных сталей и сплавов//Вестник машиностроения. – 2006. - № 1. – С.63 – 72.
23. Даниелян А.М. Теплота и износ инструментов в процессе резания металлов. М: 1954 –276с.
24. Дель Г.Д. Технологическая механика. –М: Машиностроение, 1978. - 174с.

25. Дель Г.Д., Новиков Метод делительных сеток. –М: Машиностроение, 1979. -144с.
26. Ефимович И.А. Циклический характер напряженно-деформированного состояния режущей части инструмента в процессе резания//Вестник машиностроения. – 2003. - №7 – С.48 – 52.
27. Железнов Г.С. Оценка сил, действующих на фаске износа инструмента по задней поверхности//СТИН. – 2003. - №6. – С.27 – 30.
28. Замашиков Ю.И. Сплошность материала при формировании сливной стружки//Вестник машиностроения. – 2003. - №12. – С.57 – 59.
29. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956. -368с.
30. Зорев Н.Н. О взаимозависимости процессов в зоне стружкообразования и в зоне контакта передней поверхности инструмента// Вестник машиностроения.–1963. –№12. –С.42 – 50
31. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. –М.: Энергия, 1969. –440с.
32. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420с.
33. Кацев П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1968. –156с.
34. Коробов Ю.М. Исследование сил резания при чистовом точении//Труды Ленинградского политехнического института.– 1966. - №267. – С.89 – 91
35. Корчуганова М.А., Проскоков А.В. Описание компьютерной программы для расчета условий завивания стружки в секущей плоскости схода.// Труды научно-практической конференции, посвященной 100-летию начала учебных занятий в ТПУ. – Юрга: Изд. ТПУ, 2000.-С.104–105
36. Корчуганова М.А., Проскоков А.В. Создание сменных многогранных пластин с улучшенными стружколомающими свойствами // Современная техника и технологии: Труды седьмой международной научно- практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. -Томск: Изд. ТПУ, 2001. –Т1.-С.135-136

37. Корчуганова М.А., Проскоков А.В. Создание компьютерной программы для моделирования пятна контакта стружки с передней поверхностью СМП// Современная техника и технологии: Труды седьмой международной научно- практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых.- Томск: Изд. ТПУ, 2001. –Т1.-352с.
38. Корчуганова М.А., Проскоков А.В. Проектирование и производство сменных многогранных пластин с улучшенными стружколомающими свойствами.// Обработка металлов № 3 (20) 2003-С.34 – 35.
39. Корчуганова М.А., Проскоков А.В. Проектирование и производство сменных многогранных пластин с улучшенными стружколомающими свойствами.// Ресурсосберегающие технологии в машиностроении: Материалы 2-ой межрегиональной научно-практической конференции с международным участием. Алт. Гос. Техн. Ун-т, БТИ. –Бийск: Изд. Алт. Техн. Ун-та, 2002. –С.135–136.
40. Кудинов В.А. Схема стружкообразования (динамическая модель процесса резания)//Станки и инструмент. – 1992. - №10. – С.14 – 17
41. Кунву Ли Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – СПб.: Питер, 2004. – 560с.
42. Куфарев Г.Л., Окенов К.Б., Говорухин В.Д. Стружкообразование и качество обработанной поверхности при несвободном резании. –Фрунзе: Мектеп, 1970. –169с.
43. Куфарев Г.Л., Наумов В.А. Износ твердосплавного резца по задней грани и его влияние на силу резания// Известие ТПИ, т.157. – 1970. – С.147 – 153.
44. Куфарев Г.Л., Гольтшмидт М.Г., Говорухин В.А. Экспериментальная проверка основных гипотез о напряжениях в зоне резания//Известия ТПИ, т.224 – 1976. – С.90 – 93.
45. Кушнер В.С. Изнашивание режущих инструментов и рациональные режимы резания. –Омск: Изд-во ОмГТУ, 1998. –138с.
46. Кушнер В.С. Основы теории стружкообразования. В2-х кн. Кн.1: Механика резания. –Омск: Изд-во ОмГТУ, –1996. -103с.

47. Кушнер В.С. Основы теории стружкообразования. В2-х кн. Кн.2: Теплофизика и термомеханика резания. –Омск: Изд-во ОмГТУ, –1996, -136с.
48. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
49. Лоладзе Т. Н. Износ режущего инструмента. – М.: Машгиз, 1958. – 356 с.
50. Лоладзе Т. Н. Стружкообразование при резании металлов. – М.: Машгиз, 1952. – 200 с.
51. Математика и САПР//Шенен П., Коснар М., Гардан И., в 2-х кн. Кн. 1. – М.: Мир, 1988. – 204с., ил.
52. Мигранов М.Ш. Пути повышения эффективности механической обработки резанием//Технология машиностроения. – 2004.- №5. – С.19 – 22.
53. Михайлов С.В. Исследование динамики изменения длины пластического контакта стружки с инструментом при резании металлов // Инженерный журнал. –2005. –№1. –С.13–16
54. Михайлов С.В. Формообразование стружки при резании металлов // Инженерный журнал. –2005. –№2. –С.26–32
55. Обработка металлов резанием с плазменным нагревом/А. Н. Резников, М. А. Шатерин, В. С. Кунин, Л. А. Резников. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.
56. Ольхов В.Е. Моделирование температурных полей в режущем инструменте при высокоскоростном резании// Известия вуз, №3. – 1990. – С.140 – 142.
57. Орлов Б.М. Температура и усадка стружки при резании с применением смазочно-охлаждающих жидкостей// Научные доклады высшей школы. Машиностроение и приборостроение. – 1958. - №1. – С.135 – 140
58. Основы технологии машиностроения. Учебник для вузов. М., «Высш. школа», 1974. – 336с. с ил.
59. Остафьев В. А. Современные методы расчета температурных полей в зоне резания//Физика и химия обработки металлов. – 1986. – № 2. – С. 134 – 136.

60. Остафьев В.А., Антонюк В.С., Тымчик Г.С. Диагностика процесса металлообработки // К.: Техника, –1991. 152 с.
61. Патент на полезную модель 99123099 РФ, МПК7 В23В27/00 Резец для контроля износа режущих кромок в процессе резания/ В.И. Александров, А.Г. Бородаев, А.И. Гализдров – Заявка №99123099/02; Заявл. 2.11.1999; Оpubл. 20.09.2001
62. Патент на полезную модель 2149079 РФ, МПК7 В23В27/02 Безвершинный резец/ Е.С. Сидоренко – Заявка №96118628/02; Заявл. 18.09.1996; Оpubл. 20.05.2000
63. Патент на полезную модель 97112558 РФ, МПК6 В23В27/00 Универсально-сборный многолезвийный токарный резец с криволинейными лезвиями/ В.Я. Левин, Н.В. Макарова, Е.С. Сидоренко, А.К. Зайцев, С.Ю. Заботкин, А.В. Карпов, И.Н. Давыдов, С.М. Сидоренко, В.С. Сидоренко, Ш.Н. Магдеев – Заявка № 97112558/02; Заявл. 10.07.1997; Оpubл. 10.06.1999
64. Патент на полезную модель 97112557 РФ, МПК6 В23В27/00 Универсально-сборный многолезвийный токарный безвершинный резец с прямолинейными лезвиями/ В.Я. Левин, Н.В. Макарова, Е.С. Сидоренко, А.К. Зайцев, С.Ю. Заботкин, А.В. Карпов, И.Н. Давыдов, С.М. Сидоренко, В.С. Сидоренко, Р.А. Мартынов – Заявка №97112557/02; Заявл. 10.07.1997; Оpubл. 10.06.1999
65. Патент на полезную модель 2024361 РФ, МПК5 В23В27/10 Охлаждаемый резец/ В.Г. Васильев – Заявка №5041843/08; Заявл. 13.05.1992; Оpubл. 15.12.1994
66. Патент на полезную модель 2028865 РФ, МПК6 В23В1/00 Способ обработки резанием вращающимся резцом/ Ф.Я. Якубов, И.К. Кушназаров – Заявка №4941580/08; Заявл. 4.06.1991; Оpubл. 20.02.1995
67. Патент на полезную модель 96118628 РФ, МПК6 В23В27/00 Безвершинный резец/ Е.С. Сидоренко – Заявка №96118628/02; Заявл. 18.09.1996; Оpubл. 20.11.1998

68. Патент на полезную модель 2070480 РФ, МПК6 В23В27/16 Резец/ Ю.И. Конча – Заявка №95101562/08; Заявл. 1.02.1995; Оpubл. 20.12.1996
69. Патент на полезную модель 94011319 РФ, МПК6 В23В27/16 Резец/ Г.В. Лебедев, В.В. Калинин, А.И. Скрипицын – Заявка №94011319/08; Заявл. 11.04.1994; Оpubл. 27.02.1996
70. Патент на полезную модель 48842 РФ, МПК7 В23В 27/16 Резец/ С.И. Петрушин, М.А. Корчуганова, А.В. Проскоков – Заявка №2004115525; Заявл. 24.05.2004; Оpubл. 10.11.2005, Бюл. №31
71. Патент на полезную модель 52752 РФ, МПК7 В23В 27/18 Сменная многогранная режущая пластина/ А.В. Проскоков – Заявка №2005126313/22; Заявл. 18.08.2005; Оpubл. 27.04.2006, Бюл. №12.
72. Пашацкий Н. В., Прохоров А. В., Закураев В. В., Шивырев А. А. Нагрев лезвия проходного резца//СТИН. – 2003. – № 4. – С. 21 – 23.
73. Пашацкий Н.В., Родионов Б.В., Зимин Д.В., Булаев А.В. Теплофизическое исследование отрезного резца//СТИН. – 2001. - №4. – С.21 – 23.
74. Петрушин С.И. Теоретические основы оптимизации режущей части лезвийных инструментов: Дисс. докт. техн. наук: 05.03.01. Москва, 1995. – 307с.
75. Петрушин С. И. Определение массы изношенной части резцов, оснащенных многогранными пластинами// Вестник машиностроения. –1978. –№11. –С.41-43.
76. Петрушин С. И. Основы формообразования резанием лезвийными инструментами: Учебное пособие. – Томск: Изд-во НТЛ, 2004.– 204 с.
77. Петрушин С.И., Бобрович И.М., Корчуганова М.А. Оптимальное проектирование формы режущей части лезвийных инструментов. – Томск: Изд. ТПУ, 1999. – 91с.
78. Петрушин С. И., Грубый С.В. Обработка чугунов и сталей сборными резцами со сменными многогранными пластинами. –Томск: Изд-во ТПУ, 2000.– 156с.
79. Петрушин С. И., Проскоков А. В. Форма криволинейного лезвия инст-

румента и направление схода стружки при косоугольном резании//СТИН. – 2003. – №12. – С. 26 - 29.

- 80.Петрушин С. И., Проскоков А. В. Напряжения в зоне стружкообразования.// Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: Труды всероссийской научно-практической конференции. Юрга: Изд-во ТПУ, 2004 –С.123-127.
- 81.Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. - М.: Машиностроение, 1969. - 150 с.
- 82.Полетика М.Ф., Мелихов В.В. Контактные нагрузки на задней поверхности инструмента. // Вестник машиностроения. 1967. –№9. –С.78 – 81.
- 83.Полетика М. Ф., Красильников В. А. Напряжения и температура на передней поверхности резца при высоких скоростях резания// Вестник машиностроения. – 1973. – № 10. – С. 76 – 80.
- 84.Полетика М.Ф. О связи между длиной контакта стружки с резцом и усадкой стружки//Известия ТПИ, т.188 – 1974. – С.79 – 83.
- 85.Проблемы развития технологии машиностроения// Под. ред. Сателя Э.А. – М.:Машиностроение, 1967. – 592с.
- 86.Проскоков А.В. Моделирование температуры на длине контакта стружки с передней поверхностью резца // Труды XIV научной конференции, посвященной 300-летию инженерного образования России. –Филиал ТПУ, Юрга: Изд. ТПУ, 2001. –207с.
- 87.Проскоков А.В. Проектирование сменных многогранных пластин с равномерным износом вдоль режущей кромки // Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении. – Тюмень: Феликс, 2005. –С.157-158.
- 88.Проскоков А.В. Расчет температуры в режущем клине на основе напряженно-деформированного состояния в зоне резания// Современные направления теоретических и прикладных исследований. Том.3 Технические науки. –Одесса: Черноморье, 2006. –С.13-16.
- 89.Проскоков А.В. Методика расчета температуры в режущем клине на ос-



нове напряженно-деформированного состояния в зоне резания// Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: Труды всероссийской научно-практической конференции с международным участием Т.1 ЮТИ ТПУ, Юрга: Изд. ТПУ, 2006. –С.38-39.

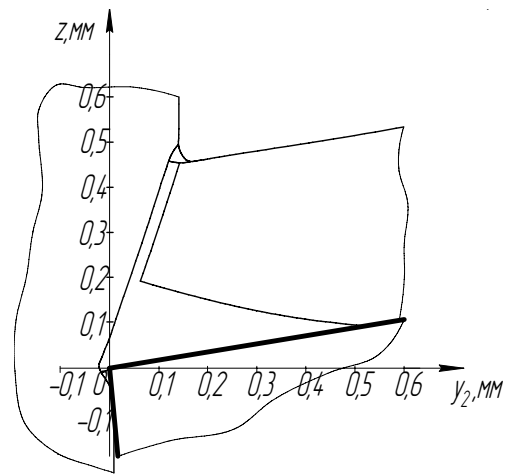
90. Проскоков А.В., Воробьев А.В. Сравнительный анализ методик определения угла схода стружки при прямоугольном резании.// Современные техника и технологии: Труды восьмой международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. - Томск: Изд. ТПУ, 2001. –Т1. –С.177–178.
91. Проскоков А.В., Корчуганова М.А., Моделирование контактной температуры на поверхности трения металлорежущего инструмента.// Ресурсосберегающие технологии в машиностроении: Материалы 2-ой межрегиональной научно-практической конференции с международным участием. Алт. Гос. Техн. Ун-т, БТИ. –Бийск: Изд. Алт. Техн. Ун-та, 2002. – 240с.
92. Проскоков А.В. Определение угла схода стружки при косоугольном резании.// Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: Труды всероссийской научно-практической конференции. Томск: Изд-во ТПУ, 2003 -374с.
93. Проскоков А.В. Экспериментальное определение угла схода стружки.// Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» -Томск: Изд. ТПУ, 2001. –Т1.-С183-184.
94. Проскоков А.В., Бибик В.Л. Расчет температуры в зоне резания.//Труды 2 Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» –Томск: Изд. ТПУ, 2004. –С.485–488
95. Проскоков А.В., Корчуганова М.А. Компьютерное моделирование сменных многогранных пластин.// X Юбилейная Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», посвященная 400-летию г. Том-

- ска. Труды в 2-х т. –Томск: Изд. ТПУ, 2004. –Т.1. С.141-143
96. Резников А.Н. Температуры, действующие на поверхностях режущего инструмента, и износ режущих граней // Инструментальные режущие материалы. М: 1960. –С.49– 62.
97. Резников А.Н. Теплофизика резания. - М.: Машиностроение, 1969. -288с.
98. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 279с.
99. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. -288с.
100. Резников А. Н., Живоглядов Н. И. Резцы с автономной системой охлаждения//Станки и инструмент. 1987. № 2. С. 18.
101. Рогельберг И. Л., Бейлин В. М. Сплавы для термпар: Справочник. – М.: Металлургия, 1983. – 360 с.
102. Розенберг Ю.А. Алгоритм расчета составляющих силы резания при токарной обработке//СТИН. – 2003. - №5. – С.18 – 21.
103. Самсонова Н.Н., Панькова Е.П., Матвеев В.С. Определение длин контакта стружки с металлорежущим инструментом//Труды XII научной конференции, посвященной 50-летию г.Юрги. Юрга: Изд. ТПУ, –1999. – С.124-128.
104. Сегерлинд Л. Применение методов конечных элементов. Изд. Мир, – 1979. – 392 с.
105. Семко М.Ф., Палатник Л.С., Грабченко А.И., Пугачев А.Т., Красильников Е.В. Измерение температуры с помощью тонких пленок чистых металлов//Станки и режущий инструмент. – 1969. – № 11. – С. 8 – 11.
106. Сидоренко Л. С. Определение размеров контактных площадок на рабочих поверхностях инструмента//СТИН. – 2003. – № 10. – С. 25 – 31.
107. Сидоренко Л.С. Расчет параметров лунки износа на передней поверхности инструмента при резании углеродистых сталей//Вестник машиностроения. – 2003. - № 2. – С.39 – 44.
108. Сидоренко Л.С. Формирование лунки износа на передней поверхности

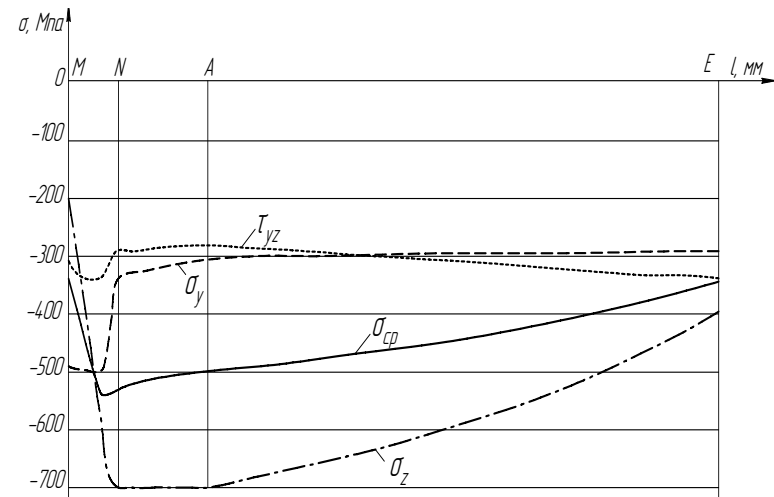
- инструмента при резании пластичных металлов//СТИН. – 2002. - №7. – С.18 – 21.
109. Силин С. С., Масляков Д. В. Аналитическое определение оптимальной температуры резания//СТИН. – 2003. – № 6. – С. 35 – 37.
110. Силин Р.И., Мясищев А.А., Ковальчук С.С. Анализ процесса снятия стружки металла режущим клином//Известия вуз, №2. – 1989. – С.145 – 148.
111. Синопальников В.А., Гурин В.Д. Распределение температур в зоне режущего клина инструмента из быстрорежущей стали // Вестник машиностроения. –1977. –№1. –С.51–54.
112. Справочник металлиста. // Под. ред. Владиславлева В.С., в 5-и томах, Т. 3, Москва, 1960. – 560с.
113. Справочник по машиностроительным материалам//Под. ред. Погодина-Алексеева Г.И., в 4-х т. Т. 1. – М.: –Машгиз, 1959. – 907с.
114. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М., Машиностроение, 1977. –423с.
115. Судариков А.С. Численный метод расчета температурных полей при шлифовании// Известия вузов, №3. – 1975. – С.144 – 146.
116. Таратынов О.В. Влияние режима резания на контактную температуру и стойкость инструмента//СТИН. – 2004. - № 11 – С.30 – 32.
117. Тейлор Ф. Искусство резания металлов. – С-Пб., 1905. – 169с.
118. Телегин А. А., Алехин В. Е. Расчет максимальной температуры токарного резца по температуре в точке его передней поверхности//Станки и режущий инструмент. – 1969. – № 11. – С. 63 – 67.
119. Тепловые явления при обработке металлов резанием//Под. ред. Панкиной Е.А., Москва. – 1959. -222с.
120. Технология машиностроения и проблемы прочности// Томск – 1978. – 190с.
121. Усачев П. А., Пархоменко В. П. Повышение износостойкости и прочности режущих инструментов. – К.: Техника, –1981. 160 с.

122. Усачев П. А., Нощенко А. Н. Расчет температурных полей резания//Станки и инструмент. – 1986. – № 2. – С. 23 – 24.
123. Утешев М.Х. Разработка научных основ расчета прочности режущей части инструмента по контактным напряжениям с целью повышения его работоспособности: Дис. докт. техн. наук: 05.03.01.,01.02.06. –Томск., 1995. –663 с.
124. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике// Справочник.// Под. ред. Неймарк Б.Е. – М. – Л.: Энергия, 1967. – 240с.
125. Филоненко С.Н., Лука В.П. Исследование температурных зависимостей при резании кислотостойкой стали X17H13M3T и сплава хастеллой Д //Станки и режущий инструмент. – 1968. – № 8. – С. 9 – 13.
126. Черменский О.Н., Борисов Е.Д. Методика расчета усилия резания стали на основе теории пластичности// Вестник машиностроения.–2000. –№11. –С.41 – 43.
127. Численные методы в примерах и задачах: Учеб. пособие// Киреев В.И., Пантелеев А.В. – М.: Высш. шк., 2004. – 480 с., ил.
128. Швецов И.В. Определение усадки стружки при различных значениях скорости резания//Вестник машиностроения. – 2005. - № 2. – С.72 - 73
129. Шустер Л. Ш., Постнов В. В. Влияние элементов режима резания на температурно-скоростные условия пластической деформации обрабатываемого материала//Технология машиностроения. – 2003. – № 6. – С. 16 – 20.
130. Щуров И.А., Болдырев И.С. Расчет сил резания методом конечных элементов.// СТИН. –2004. –№1. –С.19 – 21.
131. Юркевич В.В. Точность детали и колебания резца//Вестник машиностроения. – 2002. - №12. – С.36 – 46.
132. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Кориневич М. А.// Теория резания. – Мн.: Новое знание, 2005. – 512с.
133. Coromant Turning Tools 93/94: Cataloge.– Sandviken: AB Sandvik Coromant, 1993. – 576 p.

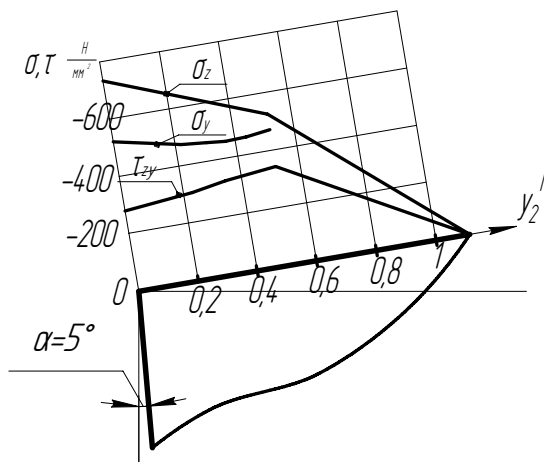
134. Coromant Rotating Tools 94/95: Cataloge.–Sandviken: AB Sandvik Coromant, 1994. – 584 p.
135. Cutting tools // Tool. And Prod. – 1996. – №5. – P.94.
136. HERTEL. Каталог 1900-SU.
137. Hirao M., Determining Temperature Distribution on Flank Face of a Cutting Tool J. Mater. Sharp. Technol. 6, pp.143-148,1989.
138. Gadzinski M. Understanding parting-off operations. Part 1 of 2// Cutting Tool Engineering. – 2001. – v. 53, Nr.2. – P. 34 – 37.
139. Gadzinski M. Understanding parting-off operations. Part 2 of 2// Cutting Tool Engineering. – 2001. – v. 53, Nr.3. – P. 52 – 58.
140. Silva M.B. and Wallbank J. Cutting Temperature: Prediction and Measurement Methods a Review. Journal of Materials Processing Technology 88, pp.195-202, 1999.
141. Komanduri R. and Hou.Z.B. A Review of The Experimental Techniques for The Measurement of Heat and Temperatures Generated in Some Manufacturing Processes and Tribology. Tribology international, 34 (10), pp.653-682, October 2001.
142. Merchant M.E. and Field M. Mechanics of Formation of the Discontinuous Chip in Metal Cutting. Trans ASME 71, pp.4-21,1949.
143. Trent.E.M., “Metal Cutting,2nd ed., Butterworths”, London,1984.



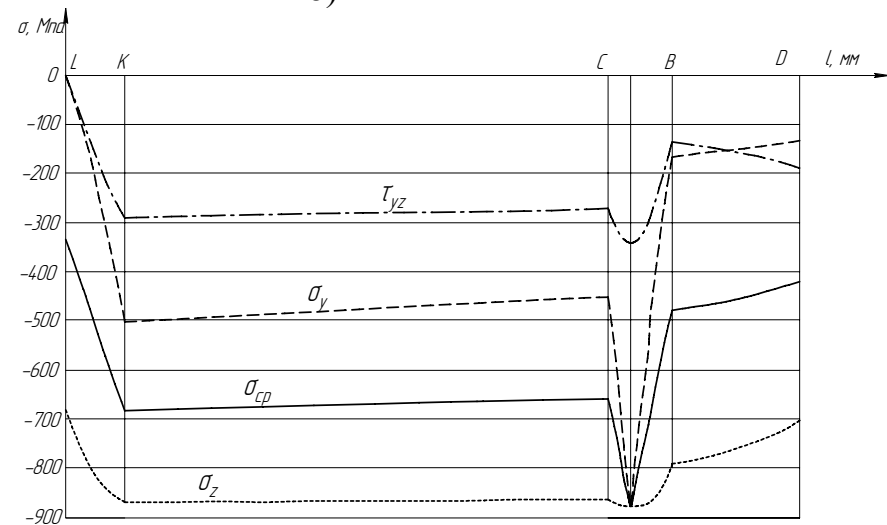
а)



б)



в)



г)

Рис. 2.8 Результаты расчетов при обработке Стали 30X, для условий  $V=100\text{м/мин}$ ,  $a=0,149\text{ мм}$ ,  $b=5\text{ мм}$ ,  $\gamma=-10^\circ$ : а) схема стружкообразования; б) компоненты напряжений вдоль правой границы зоны пластичности; в) распределение контактных напряжений на передней поверхности; г) компоненты напряжений вдоль левой границы зоны пластичности

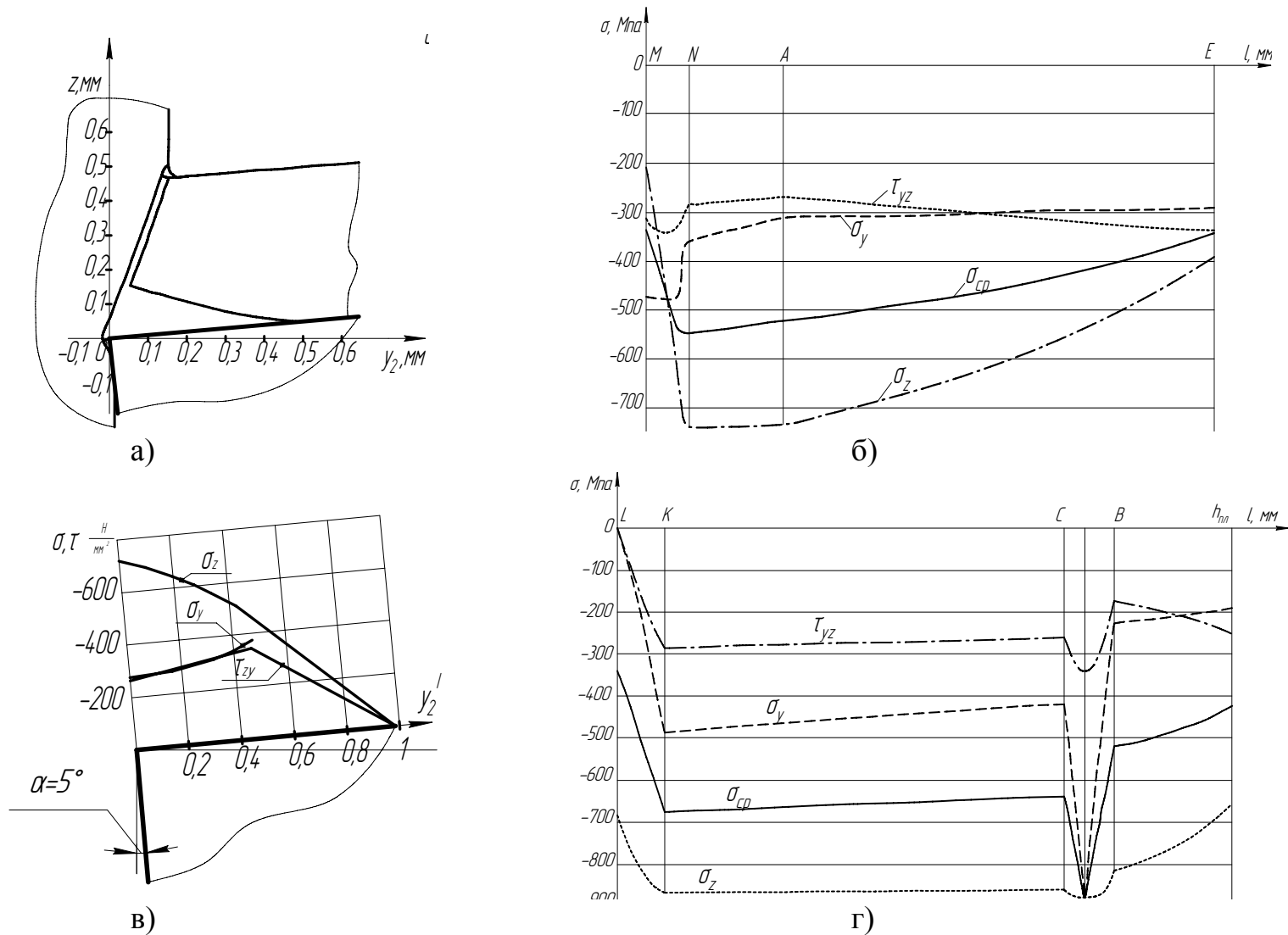


Рис. 2.9 Результаты расчетов при обработке Стали 30X, для условий  $V=100\text{ м/мин}$ ,  $a=0,149\text{ мм}$ ,  $b=5\text{ мм}$ ,  $\gamma=-5^\circ$ : а) схема стружкообразования; б) компоненты напряжений вдоль правой границы зоны пластичности; в) распределение контактных напряжений на передней поверхности; г) компоненты напряжений вдоль левой границы зоны пластичности

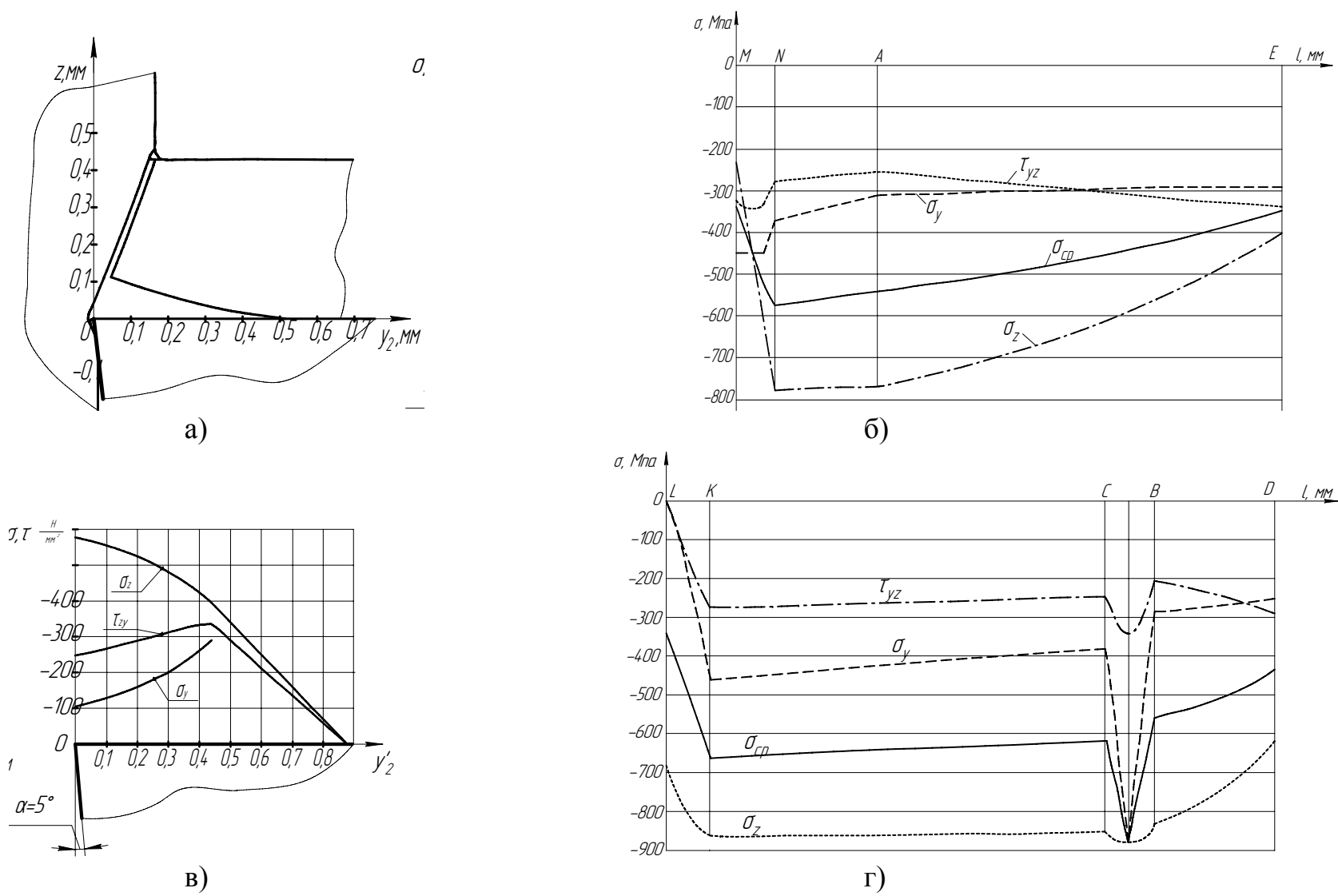


Рис. 2.10 Результаты расчетов при обработке Стали 30X, для условий  $V=100\text{м/мин}$ ,  $a=0,149\text{ мм}$ ,  $b=5\text{ мм}$ ,  $\gamma=0^\circ$ : а) схема стружкообразования; б) компоненты напряжений вдоль правой границы зоны пластичности; в) распределение контактных напряжений на передней поверхности; г) компоненты напряжений вдоль левой границы зоны пластичности



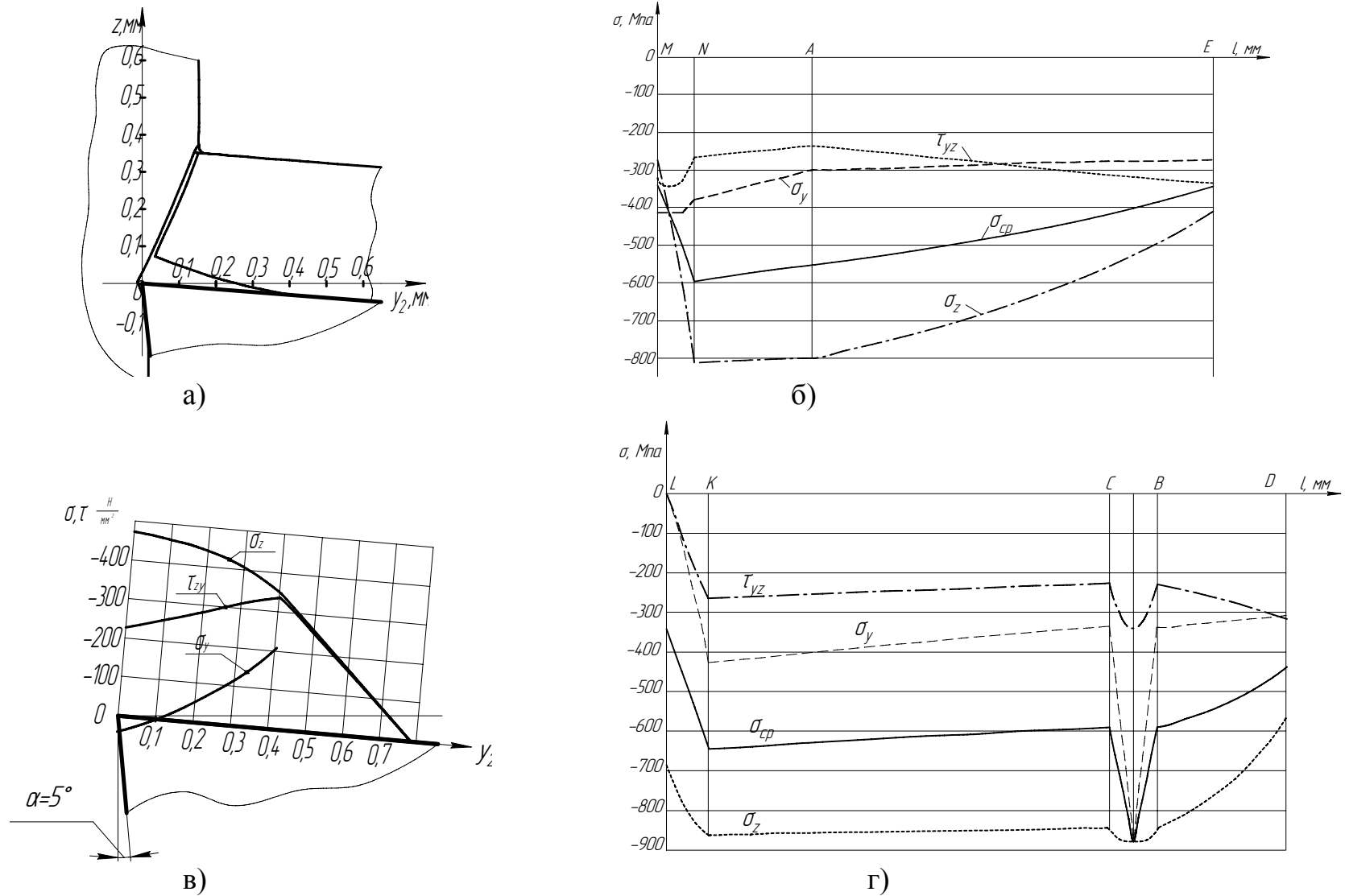


Рис. 2.11 Результаты расчетов при обработке Стали 30X, для условий  $V=100\text{ м/мин}$ ,  $a=0,149\text{ мм}$ ,  $b=5\text{ мм}$ ,  $\gamma=5^\circ$ : а) схема стружкообразования; б) компоненты напряжений вдоль правой границы зоны пластичности; в) распределение контактных напряжений на передней поверхности; г) компоненты напряжений вдоль левой границы зоны пластичности

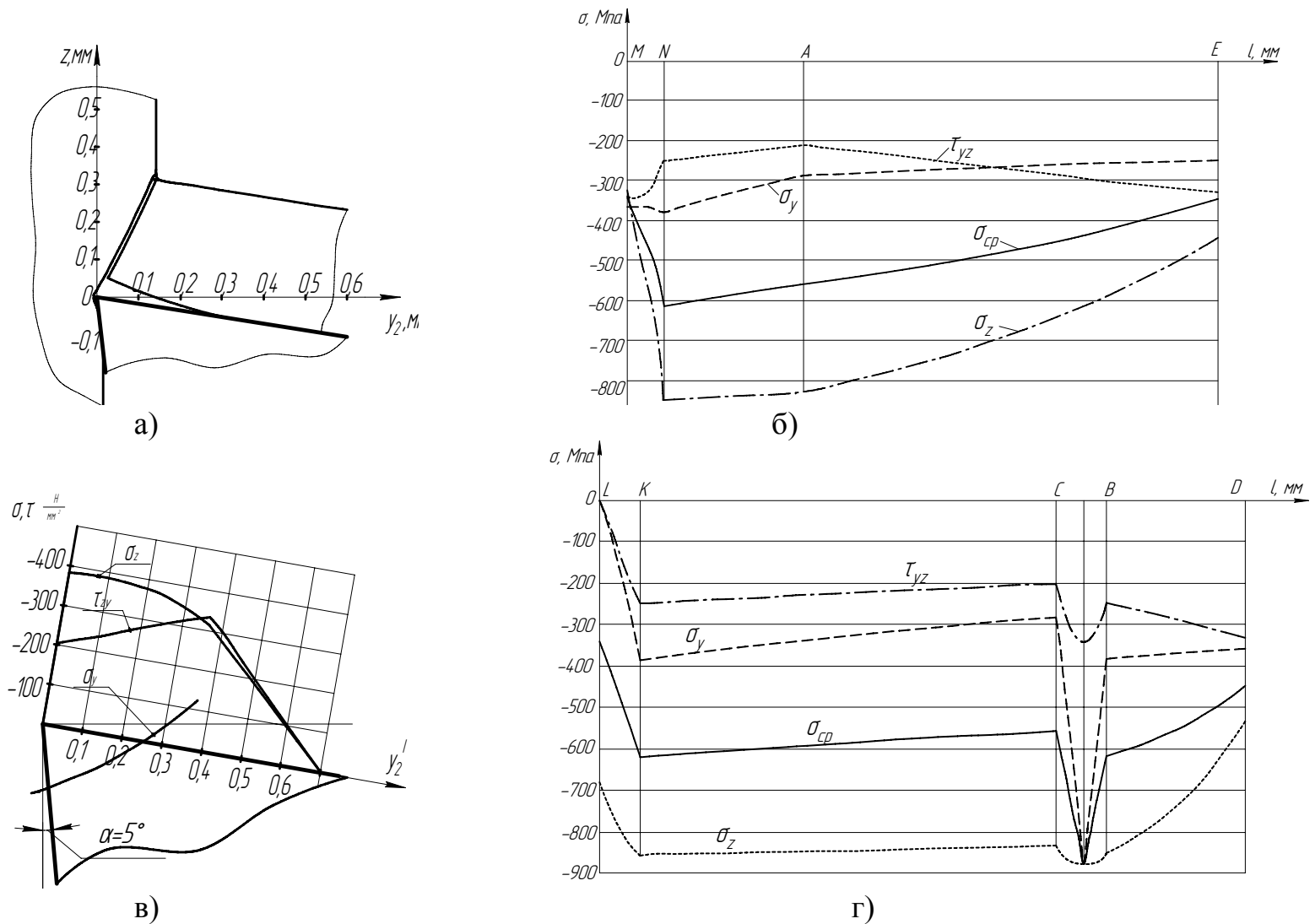


Рис. 2.12 Результаты расчетов при обработке Стали 30Х, для условий  $V=100\text{м/мин}$ ,  $a=0,149\text{ мм}$ ,  $b=5\text{ мм}$ ,  $\gamma=10^\circ$ : а) схема стружкообразования; б) компоненты напряжений вдоль правой границы зоны пластичности; в) распределение контактных напряжений на передней поверхности; г) компоненты напряжений вдоль левой границы зоны пластичности