



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»**

Институт
Направление

Кибернетики
«Технология, оборудование и автоматизация
машиностроительных производств»

Кафедра

«Технология автоматизированного
машиностроительного производства»

Расчёт на прочность изделий сложной формы методом

(Тема выпускной квалификационной работы)

конечных элементов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(на соискание степени магистр техники и технологии)

ВКР ТАМП 150900 ПЗ

(Обозначение документа)

Студент гр. 4М300
(номер группы)

Эгемен Эфе Тамтюрк
(И О Фамилия)

Руководитель

Козлов Виктор Николаевич

Консультанты:

по

по

по

по

по

Допустить к защите:

Заведующий кафедрой «ТАМП»

К.Т.Н.

Арляпов А.Ю.

(Фамилия И.О.)



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»**

Кафедра «Технология автоматизированного
машиностроительного
производства»

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой _____ Арляпов А.Ю.

« _____ » _____ 2012 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

Студенту _____ Эгемен Эфе Тамтюрк

1. Тема выпускной квалификационной работы _____

Расчёт на прочность изделий сложной формы методом

конечных элементов

(утверждена приказом ректора (распоряжением декана) от 11.04.2012 г. № 1770/с

2. Срок сдачи студентом готовой работы _____

3. Исходные данные к работе _____

4. Содержание расчётно-пояснительной записки (перечень вопросов, подлежащих
разработке)

5.Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

5.1.

5.2.

5.3.

5.4.

5.5.

5.6.

6.Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)

6.1.

6.2.

6.3.

6.4.

7.Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы

Руководитель

Козлов Виктор Николаевич

(подпись, дата, Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению (студент)

Эгемен Эфе Тамтюрк

(подпись, дата, Ф.И.О.)

СОДЕРЖАНИЕ

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ.....	1
1.1. ОБЪЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ.....	1
1.2. ВИДЫ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ.....	1
1.3. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К МАТЕМАТИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ.....	2
1.4. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К МАТЕМАТИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ.....	2
1.5. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ.....	12
1.6. МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КАК СРЕДСТВО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ.....	22
2. ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ.....	26
2.1. ЗАДАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ.....	26
2.2. СОЗДАНИЕ ГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА.....	27
2.3.СОЗДАНИЕ ГЕОМЕТРИИ ЗАГОТОВКИ И ЭЛЕМЕНТА СТРУЖКИ.....	30
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЗОК, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ.....	31
4. РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	37
4.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ РЕЖУЩЕГО КЛИНА ПРИ ОБРАБОТКЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТЗ-1.....	38
4.2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНЫХ НАГРУЗОК НА ЗАДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ИНСТРУМЕНТА.....	39
4.3. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В СТРУЖКЕ.....	50
ВЫВОДЫ.....	53
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	54

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ

1.1. ОБЪЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Объектами моделирования (ОМ) в машиностроительном производстве могут быть:

- технологические системы (ТС) – участки из универсальных станков, автоматические линии, гибкие производственные системы (ГПС);
- технологические процессы (ТП);
- физические процессы (ФП) – процессы, протекающие при резании металлов, при функционировании технологического оборудования в упругой системе станок–приспособление–инструмент–деталь (СПИД) и т.д.

1.2. ВИДЫ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Математическая модель (ММ) объекта моделирования – это система математических элементов (чисел, переменных, уравнений, неравенств, множеств, матриц, графов и т.д.) и отношений между ними, адекватно отражающая некоторые свойства объекта, его состояние в реальных условиях, созданная для решения той или иной задачи. ММ разрабатываются для описания и исследования ФП, ТП, ТС, проектирования и оптимизации ТП, ТС, организации работы ТС и построения САПР.

Различают аналитическое (решение задач оптимизации процессов в ТС и оптимизация самих ТС) и имитационное моделирование (изучение характеристик процесса, протекающего в ходе эксперимента).

Аналитическое моделирование основано на косвенном описании ОМ (ММ на основе аппарата математического программирования, корреляционного и регрессионного анализа). Как правило, модель состоит из целевой функции (характеристика объекта (системы), которую требуется вычислить или оптимизировать), варьируемых переменных и системы ограничений на переменные.

Имитационное моделирование основано на прямом описании ОМ с законами функционирования каждого элемента объекта и связей между ними. Пересчёт системного времени в модели осуществляется двумя способами: шаг по времени выбирается с некоторым постоянным интервалом или от события к событию, при этом считается, что в промежутках времени между событиями в модели изменений не происходит.

Виды ММ определяются по различным признакам классификации (табл. 1.1).

1.1. Классификация математических моделей

Признаки классификации	Виды математических моделей	Назначение
1. Принадлежность к иерархическому уровню	Модели микроуровня	Отражают физические процессы, протекающие, например, при резании металлов, описывают процессы на уровне перехода (прохода)
	Модели макроуровня	Описывают технологические процессы
	Модели метауровня	Описывают технологические системы (участки, цехи, предприятие в целом)
2. Характер отображаемых свойств объекта	Структурные	Предназначены для отображения структурных свойств объектов (в САПР ТП для представления структуры технологического процесса, расчерковки изделий (используются структурно-логические модели))
	Функциональные	Предназначены для отображения информационных, физических, временных процессов, протекающих в работающем оборудовании, в ходе выполнения технологических процессов и т.д.
3. Способ	Аналитические	Представляют собой явные математические выражения

представления свойств объекта		выходных параметров как функций от параметров входных и внутренних (выражения для сил резания)
	Алгоритмические	Выражают связи между выходными параметрами и параметрами входными и внутренними в виде алгоритма
	Имитационные	Отражают развитие процесса (поведение исследуемого объекта) во времени при задании внешних воздействий на процесс (объект)
4. Способ получения модели	Теоретические	Создаются в результате исследования объектов (процессов) на теоретическом уровне (выражения для сил резания, полученные на основе обобщения физических законов)
	Эмпирические	Создаются в результате проведения экспериментов (изучения внешних проявлений свойств объекта с помощью измерения его параметров на входе и выходе) и обработки их результатов методами математической статистики
5. Особенности поведения объекта	Детерминированные	Описывают поведение объекта с позиций полной определённости в настоящем и будущем (формулы физических законов, технологические процессы обработки деталей и т.д.)
	Вероятностные	Учитывают влияние случайных факторов на поведение объекта, т.е. оценивают его будущее с позиций вероятности тех или иных событий (описание точности размеров в партии деталей с учётом явления рассеяния и т.д.)

1.3. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К МАТЕМАТИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ

К математическим моделям предъявляются следующие основные требования.

- универсальности (характеризует полноту отражения в ней свойств реального объекта);
- точности (оценивается степень совпадения значений выходных параметров реального объекта и значений тех же параметров, рассчитанных с помощью модели);
 - адекватности (способность модели отражать заданные свойства объекта с погрешностью, не выше заданной);
 - экономичности (характеризуется затратами вычислительных ресурсов на ее реализацию);
 - вычислимости (возможность ручного или с помощью ЭВМ исследования качественных и количественных закономерностей функционирования объекта (системы));
 - модульности (соответствие конструкций модели структурным составляющим объекта (системы));
 - алгоритмируемости (возможность разработки соответствующих алгоритма и программы, реализующей математическую модель на ЭВМ);
 - наглядности (удобное визуальное восприятие модели).

1.4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИЛОВЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РЕЗАНИИ МАТЕРИАЛОВ

1.4.1. ТОЧЕНИЕ

Физическая модель процесса точения. Рассмотрим процесс несвободного резания, при котором снятие припуска осуществляется радиусной и прямолинейной частями главной режущей кромки. Сечение остаточного выступа (неровности) на обработанной поверхности оформляется радиусными боковыми сторонами (рис. 1.1, а). Данный случай имеет место при соблюдении следующих соотношений: $t \geq r(1 - \cos \varphi)$, $s \leq 2r \sin \varphi$ [1].

На переднюю поверхность инструмента действуют сила трения F_n и нормальная сила N . Эти силы определяют силу стружкообразования R (рис. 1.2). Силы R_z и R_y являются соответственно горизонтальной (тангенциальной) и вертикальной (радиальной) составляющими силы R . Так как сила

сдвига R_c является проекцией равнодействующей силы R на условную плоскость сдвига AB , то угол между силами R_z и R_c равен углу наклона условной плоскости сдвига β_1 .

На заднюю поверхность инструмента действуют сила трения F_1 и нормальная сила N_1 (рис. 1.3).

При резании материалов средней пластичности на средних скоростях резания образуются *стружки скалывания*, при резании мягких пластичных материалов или тех же, но на больших скоростях резания образуются *сливные стружки*.

Процесс образования *стружек скалывания* происходит в описанной ниже последовательности (рис. 1.4) [2].

Под действием силы P резец внедряется в обрабатываемый материал и производит его смятие. По мере перемещения резца длина площадки смятия $l_{см}$ увеличивается и на элемент будущей стружки действует возрастающая сила. Увеличение этой силы идёт до тех пор, пока не произойдёт скалывание элемента по плоскости 1-1 под углом β_1 . Эта плоскость называется *плоскостью скалывания*, а угол – *углом скалывания*.

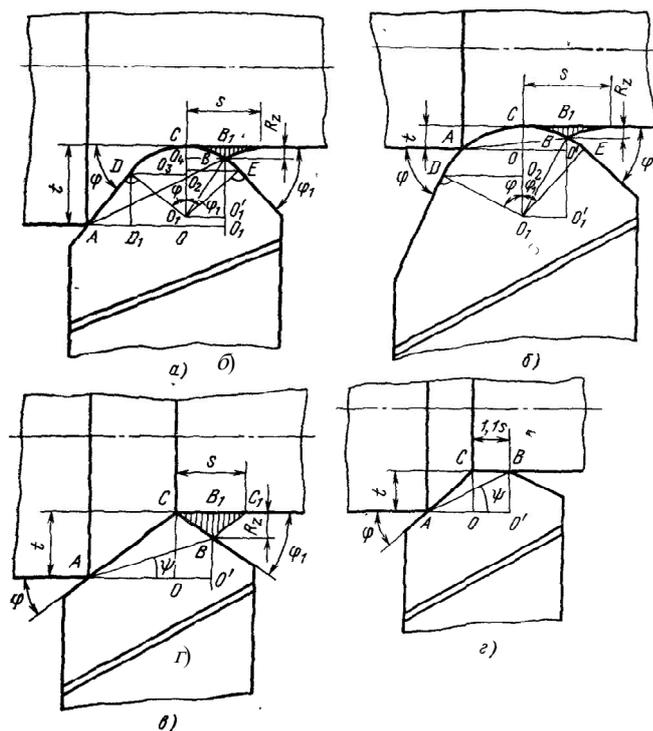


Рис. 1.1. Расчётная схема процесса резания:

а – снятие припуска радиусной и прямолинейной частями главной режущей кромки; *б* – снятие припуска радиусной частью главной режущей кромки; *в* – работа проходным резцом; *г* – работа проходным резцом с режущей кромкой, параллельной оси детали (резцы Колесова для работы с большими подачами)

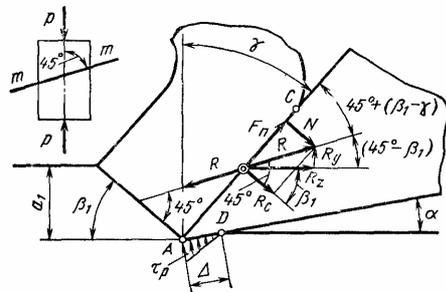


Рис. 1.2. Схема действия сил на передней поверхности инструмента

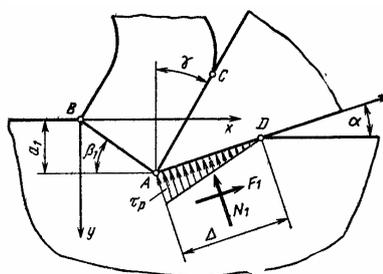


Рис. 1.3. Схема действия сил на задней поверхности инструмента

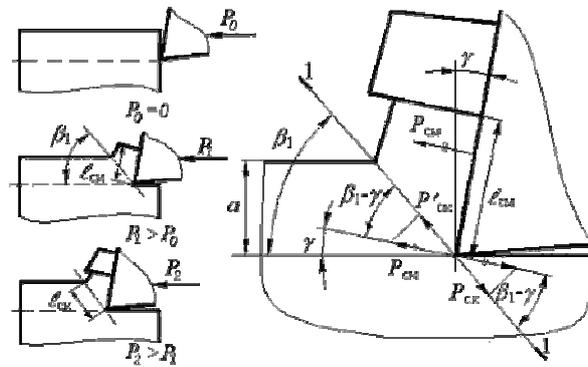


Рис. 1.4. Схема образования стружек скалывания

Со стороны реза на элемент стружки действует сила смятия P_{CM} :

$$P_{CM} = \sigma_{CM} f_{CM} = \sigma_{CM} l_{CM} b, \quad (1.1)$$

где σ_{CM} – предел прочности обрабатываемого материала на смятие; b – ширина среза; l_{CM} – длина площадки смятия.

Элемент удерживается силой P_{CK} :

$$P_{CK} = \tau_{CK} f_{CK} = \tau_{CK} l_{CK} b, \quad l_{CK} = \frac{a}{\sin \beta_1}, \quad (1.2)$$

где τ_{CK} – предел прочности обрабатываемого материала на сдвиг (скалывание).

Для скалывания элемента необходимо, чтобы:

$$P'_{CM} = P_{CM} \cos(\beta_1 - \gamma) \geq P_{CK}. \quad (1.3)$$

Периодический характер образования стружки вызывает колебания силы резания, что делает процесс резания динамически неустойчивым.

В *сливных стружках* деформация смятия происходит одновременно со сдвигом элементов. Как только произойдет его сдвиг, на плоскости сдвига металл упрочнится и прекратит своё движение по плоскости скалывания. При остановке он снова сминается движущимся инструментом, площадка смятия у основания элемента увеличивается, сила P_{CM} становится больше P_{CK} и элемент вновь сдвигается. При образовании сливных стружек процесс формирования их продолжается в течение всего времени движения по передней поверхности режущего инструмента.

При резании хрупких металлов образуются *стружки надлома*. Резец, внедряясь в металл, не сдвигает его, а сжимает и вырывает сжатый надломленный элемент. Разрушение идёт по поверхности, произвольно охватывающей напряжённую зону, поэтому обработанная поверхность получается неровной.

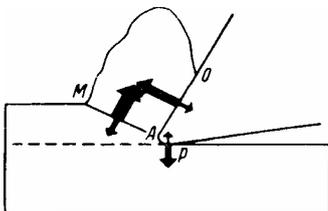
Тепловые явления при точении. Теплота Q (ккал/мин) в процессе резания образуется в результате [3]:

- внутреннего трения между частицами обрабатываемого металла в процессе деформации $Q_{деф}$;
- внешнего трения стружки о переднюю поверхность резца $Q_{п.тр}$;
- внешнего трения поверхности резания и обработанной поверхности о задние поверхности резца $Q_{з.тр}$;
- отрыва стружки, диспергирования $Q_{дисп}$ (образования новых поверхностей)

$$Q = Q_{деф} + Q_{п.тр} + Q_{з.тр} + Q_{дисп} = \alpha_0 \frac{P_z \nu}{427},$$

где $R = P_z \nu$ – работа резания, кгсж/мин; ν – скорость резания, м/мин;

$E = 427$ кгсж/ккал – механический эквивалент теплоты; α_0 – коэффициент, учитывающий переход работы резания в потенциальную энергию искажённой кристаллической решётки, указанные потери незначительны по величине и в обычных расчётах этой потерей пренебрегают).



В процессе образования сливной стружки теплота концентрируется в трёх основных зонах (рис. 1.5): в зоне сдвига элементов стружки AM , где происходит пластическая деформация; на площади контакта стружки по передней поверхности инструмента AO ; на площади контакта задней грани инструмента с обрабатываемой деталью.

Наиболее высокая температура (температура резания) наблюдается в

Рис. 1.5. Зоны концентрации теплоты в системе резец-стружка

стружке в зоне контакта её с передней поверхностью инструмента, так как наибольшее количество теплоты, образующейся вследствие деформации (на поверхности AM), остаётся в стружке и частично поглощается обрабатываемой деталью. Теплота трения стружки (на поверхности AO) остаётся в основном в стружке и частично (3...5 %) направляется в инструмент. Теплота трения по задним граням инструмента (поверхность AP) направляется в деталь и резец. При обработке металлов с низкой теплопроводностью, например жаропрочных и титановых сплавов, в резец отводится до 20...40 % всей теплоты.

Потери теплоты от конвекции и радиации в процессе резания ничтожно малы; невелико количество теплоты, уходящей в деталь, так как стружка быстро формируется в зоне резания и быстро проходит зону контакта с резцом. Однако теплота, поглощаемая изделием из жаропрочных сталей и сплавов, резко возрастает и при малых скоростях может достичь 35...45 % всей теплоты резания.

Средняя температура стружки, когда последняя покидает зону деформации, °C:

$$\theta_{\text{деф.ср}} = \frac{\alpha_0 p \left[(1 - \beta_0) - (\sin \gamma + \mu_0 \cos \gamma) \frac{1}{\xi} \right]}{E c_{\text{стр}}},$$

где $p = \frac{P_z}{ba}$ – удельная сила резания, кгс/мм²; α_0 – коэффициент, учитывающий потерю теплоты на скрытую энергию деформации (принимается $\alpha_0 = 0,95$); β_0 – коэффициент, учитывающий переход части тепла в изделие (по Вейнеру: $\beta_0 = 0,1$ при $v = 100$ м/мин, $\beta_0 = 0,05$ при $v = 300$ м/мин); μ_0 – коэффициент трения стружки; ξ – коэффициент усадки стружки; c – теплоёмкость нагретой стружки, ккал/кгс·°C; $\rho_{\text{стр}}$ – плотность стружки, кгс/мм³; b – ширина среза, мм; a – толщина среза, мм; E – модуль упругости материала стружки, кгс/мм².

Покидая зону деформации, нагретая до температуры $\theta_{\text{деф.ср}}$ стружка трётся по передней поверхности резца со скоростью $\frac{v}{\xi}$ на площади контакта шириной b и длиной l . Теплота работы силы трения по передней грани в единицу времени $Q_{\text{тр.п}} = \frac{F_{\text{п}} v}{E \xi}$.

Температура на передней поверхности резца, полученная в результате трения стружки:

$$\theta_{\text{тр.п}} = \frac{F_{\text{п}} \sqrt{v \frac{1}{\xi} \pi}}{2 E b \sqrt{\lambda_p c_p \rho_p} l},$$

где $F_{\text{п}}$ – площадь передней поверхности резца; λ_p – коэффициент теплопроводности резца; c_p – теплоёмкость резца; ρ_p – плотность материала резца.

Суммируя температуры деформации стружки и трения её по передней поверхности инструмента, получим температуру резания (среднюю температуру на площади контакта стружки и инструмента):

$$\theta_{\text{рез}} = \theta_{\text{деф.ср}} + \theta_{\text{тр.п}} = \frac{\alpha_0 p \left[(1 - \beta_0) - (\sin \gamma + \mu_0 \cos \gamma) \frac{1}{\xi} \right]}{E c_p \rho_p} + \frac{F_{\text{п}} \sqrt{\frac{v}{\xi} \frac{\sqrt{\pi}}{2}}}{E b \sqrt{\lambda_p c_p \rho_p} l}.$$

Температура резания в действительности должна быть более высокой, чем получается расчётом по этой формуле, так как в ней не учтена теплота трения по задней поверхности резца. Последняя будет проявляться с увеличением скорости резания по мере затупления резца; при этом особенно заметно будет повышаться температура обрабатываемой детали.

Обрабатываемая деталь нагревается в основном теплотой деформации. Температура детали уменьшается с увеличением скорости резания, поскольку при этом уменьшается $\theta_{\text{деф.ср}}$. Подобный вывод подтверждается на практике при работе острым резцом в нормальных условиях. По мере затупления резца и значительного уменьшения заднего угла α и угла в плане ϕ положение меняется. С

увеличением силы трения растут работа и теплота трения по задней поверхности резца, и поэтому температура детали повышается с увеличением скорости резания v .

Рассмотрим температурное поле резца (рис. 1.6) [3]. Линии постоянных температур $t \dots t$ (изотермы) в стружке ориентировочно расположены параллельно поверхности сдвига, а у резца – почти концентрично вокруг режущей кромки. В этом случае согласно теории теплопроводности тепловые потоки должны быть направлены нормально изотермам; в схеме они показаны соответствующими кривыми со стрелками: l – в деталь; l' – в стружку; k – в резец. Наиболее высокие температуры наблюдаются вблизи режущей кромки и в зоне нароста.

В действительности температура резания зависит и от длины контакта поверхности резания и стружки по задней и передней поверхностям инструмента. Чем меньше длина контакта на задней поверхности, тем ниже

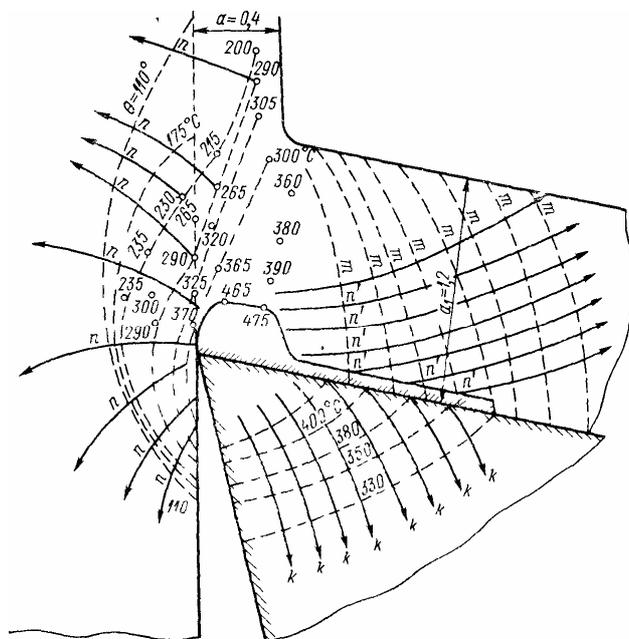


Рис. 1.6. Температурное поле в зоне резания и резца

среднее значение температуры резания и тем ближе к режущей кромке располагается её максимум. С уменьшением длины контакта стружки с передней поверхностью средняя температура также снижается, но максимум температуры удаляется от режущей кромки. При скоростной обработке температура в зоне резания доходит до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, а на поверхности трения по передней грани достигает более $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3]. Низкая теплопроводность твердых сплавов и особенно минералокерамики является причиной того, что теплота резания сосредоточивается в передней части резца, прилегающей к его вершине, что способствует её пластической деформации. При этом режущие способности инструмента сохраняются ввиду его значительной красностойкости. Однако очень высокий температурный градиент, свойственный минералокерамическому резцу, способствует тепловому удару, разрушающему режущую кромку инструмента.

При весьма низкой температуре всего изделия и больших скоростях резания тонкий слой его обработанной поверхности может иметь достаточно высокую температуру, способную изменить структуру этого слоя. Поэтому, назначая режим резания, необходимо учитывать последующую чистовую обработку, при которой будет удалён повреждённый слой детали.

Теоретический расчёт температуры резания встречает значительные трудности, так как в расчётных формулах переменные являются взаимозависимыми параметрами. Так, теплоёмкость c увеличивается, а теплопроводность λ уменьшается с возрастанием температуры. Длина контакта стружки и резца уменьшается с увеличением скорости резания, но заметно растёт по мере износа резца и образования лунки на передней поверхности резца.

Значения постоянных коэффициентов (α_0 , β_0 , μ_0) также изменяются в зависимости от различных факторов.

Температура резания зависит и от вида процесса резания: при несвободном резании резец нагревается больше, чем при свободном резании. Поэтому для расчёта температуры резания чаще

пользуются эмпирическими формулами, показывающими закономерности изменения температуры резания в зависимости от различных факторов и справедливыми в определённых границах и условиях.

Влияние конструктивных параметров резца и режимных параметров процесса резания на температуру резания. Температура резания повышается с увеличением подачи s , но в меньшей степени, чем при повышении скорости v .

Ещё меньше влияет на температуру резания глубина резания t , так как нагрузка на единицу длины режущей кромки не изменяется.

По мере нагрева резца разность температур стружки и резца падает, а поэтому интенсивность передачи теплоты от стружки резцу уменьшается. Следовательно, с увеличением скорости резания v температура резца значительно поднимается, но в меньшей степени, чем скорость.

При резании хрупких металлов, например чугуна, когда работа пластической деформации весьма мала и удельные силы резания незначительны, температура резания заметно ниже, чем при обработке стали. Давление чугунной стружки сосредотачивается непосредственно на режущей кромке или вблизи нее, но это неблагоприятное обстоятельство влияет больше на абразивно-механический износ режущей кромки, чем на температуру резания.

При обработке цветных металлов температура резания сравнительно низкая из-за малой нагрузки и вследствие их большой теплопроводности. При резании жаропрочных сталей и сплавов, обладающих низкой теплопроводностью, температура резания значительно повышается (в 2–3 раза) по сравнению с конструкционными сталями.

С увеличением площади поперечного сечения резца температура резания уменьшается.

С увеличением угла резания δ увеличивается сила резания и повышаются количество образующейся теплоты и температура резания.

С уменьшением угла в плане ϕ несколько увеличивается нагрузка на резец, удлиняется режущая кромка, увеличивается угол при вершине ϵ и, как следствие, значительно улучшается теплоотвод, снижающий температуру резания.

Применение смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) снижает температуру резания, что вызвано как охлаждающим эффектом, так и уменьшением трения в процессе резания.

Математическая модель процесса точения. Силы резания определяются по формулам [1]:

$$R_z = \tau_p a_1 h_1 \left(1 + \frac{1}{B}\right); \quad (1.4)$$

$$R_y = \tau_p a_1 h_1 \left(\frac{1}{B} - 1\right); \quad (1.5)$$

$$F_n = \tau_p a_1 h_1 \left(\frac{\cos \gamma + \sin \gamma}{B} - \cos \gamma + \sin \gamma\right); \quad (1.6)$$

$$N = \tau_p a_1 h_1 \left(\frac{\cos \gamma - \sin \gamma}{B} + \cos \gamma + \sin \gamma\right); \quad (1.7)$$

$$F_1 = 0,625 \tau_p \rho_1 b \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}}; \quad (1.8)$$

$$N_1 = 0,625 \frac{\tau_p \rho_1 b}{\mu_1} \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}}, \quad (1.9)$$

где τ_p – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, Н/м²;

$a_1 = \frac{s}{c'} \sin \arctg \frac{c'}{[1 - a'(1 - \cos \phi)] \operatorname{ctg} \phi + a'(\sin \phi + b')}$ – толщина среза, м; $h_1 = \frac{c' t}{\sin \arctg \frac{c'}{[1 - a'(1 - \cos \phi)] \operatorname{ctg} \phi + a'(\sin \phi + b')}} -$

ширина среза, м; $a' = r/t$; $c' = 1 - a' \sqrt{1 - b'^2}$;

$$B = \frac{(\operatorname{Pe} B - 2) \operatorname{erf}(0,5 \sqrt{\operatorname{Pe} B}) + 1,125 \sqrt{\operatorname{Pe} B} \exp(-0,25 \operatorname{Pe} B)}{\sqrt{\operatorname{Pe} B} [\sqrt{\operatorname{Pe}} + 0,325 F D^{0,3} (1 - \sin \gamma)^{0,25}]}$$

$$+ \frac{0,665 \operatorname{erf}(0,5\sqrt{\operatorname{Pe}B})}{\sqrt{\operatorname{Pe}B}} + \frac{0,145 F^{0,8} D^{0,25} \operatorname{erf}^{0,25}(0,5\sqrt{\operatorname{Pe}B})}{\operatorname{Pe}^{0,5} B^{0,2}(1-\sin\gamma)^{0,95}} + \frac{\operatorname{Pe}B(1-\sin\gamma)^{0,4} [\cos\gamma + \sin\gamma - B(\cos\gamma - \sin\gamma)]}{(\cos\gamma + B\sin\gamma) [\operatorname{Pe}(1-\sin\gamma)^{0,4} + 0,225FD^{0,3}]} - 1;$$

$\operatorname{Pe} = \frac{va_1}{a}$ – критерий Пекле, характеризующий степень влияния режимных условий процесса va_1 по

сравнению с влиянием теплофизических свойств обрабатываемого материала a ; $F = \frac{\lambda_p}{\lambda} \beta \epsilon$ – критерий, отражающий влияние геометрии инструмента и отношения теплопроводностей инструментального и обрабатываемого материалов; $D = a_1 / b_1$ – критерий, характеризующий геометрию сечения среза;

$\operatorname{erf}x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx$ – интеграл вероятности; μ_1 – коэффициент трения на задней контактной площадке.

Величину B можно определить расчётным путем, пользуясь прил. Б. Механические характеристики сталей и сплавов приведены в прил. В.

Для случаев:

– рис. 1.1, б: $t < r(1 - \cos\varphi)$; $s \leq 2r \sin\varphi_1$;

$$a_1 = \frac{s}{c'} \operatorname{sinarctg} \frac{c'}{\sqrt{2a' - 1 + a'B'}}; \quad b_1 = \frac{c't}{\operatorname{sinarctg} \frac{c'}{\sqrt{2a' - 1 + a'B'}}}$$

$$b = r \left[\arccos\left(1 - \frac{1}{a'}\right) + \arccos\sqrt{1 - B^2} \right];$$

– рис. 1.2, в:

$$a_1 = \frac{s}{d'} \operatorname{sinarctg} \frac{d'}{1 + \operatorname{ctg}\varphi - d'}; \quad b_1 = \frac{d't}{\operatorname{sinarctg} \frac{d'}{1 + \operatorname{ctg}\varphi - d'}}$$

$$b = \frac{t}{\sin\varphi} \left[1 + \frac{\sin\varphi}{\sin\varphi_1} (1 - d') \right],$$

где $d' = 1 - \frac{s}{t \operatorname{ctg}\varphi + \operatorname{ctg}\varphi_1}$;

– рис. 1.1, г:

$$a_1 = s \operatorname{sinarctg} \frac{1}{\operatorname{ctg}\varphi + 2,2a'B'}; \quad b_1 = \frac{t}{\operatorname{sinarctg} \frac{1}{\operatorname{ctg}\varphi + 2,2a'B'}}$$

$$b = t \left[\frac{1}{\sin\varphi} + 2,2a'B' \right].$$

При приближённых расчётах средний коэффициент трения можно приравнять к μ_1 . Тогда

$$\mu = \mu_1 = \frac{\cos\gamma + \sin\gamma - B\cos(\cos\gamma - \sin\gamma)}{\cos\gamma - \sin\gamma + B\cos(\cos\gamma + \sin\gamma)}. \quad (1.10)$$

Процессы резания характеризуются наличием трёх основных быстро движущихся по отношению к стружке и детали плоских источников тепла шириной b_1 и длиной $AB = \frac{a_1}{\sin\beta_1}$, $AC = l$ и $AD = \Delta$ (рис. 1.7).

Источники AC и AD по отношению к резу являются неподвижными.

Величину участка $AD = \Delta$ определим по формуле:

$$\Delta = 1,25 \sqrt{\frac{B}{\sin\alpha}} \rho_1, \quad (1.11)$$

где ρ_1 – радиус скругления режущей кромки реза.

Длину контакта стружки с инструментом $AC = l$ вычислим по формуле:

$$l = 1,45 \left(\frac{\cos\gamma + \sin\gamma}{B} - \cos\gamma + \sin\gamma \right) a_1. \quad (1.12)$$

Величины подминаемого слоя металла h и h_γ определяются следующим образом (рис. 1.8):

$$h = \rho_1 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + B^2}} \right); \quad (1.13)$$

$$h_y = \frac{hB}{\cos \gamma + B \sin \gamma}. \quad (1.14)$$

Максимальную температуру трения на передней поверхности (в точке M) найдем как:

$$\theta'_M = 0,9675 \frac{\pi \tau_p \sqrt{Pe}}{c\rho} \sqrt{\frac{\cos \gamma + \sin \gamma - B(\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma + B \sin \gamma}}, \quad (1.15)$$

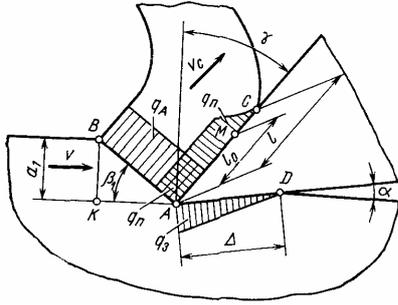


Рис. 1.7. Схема распределения суммарных интенсивностей тепловыделения в плоскости сдвига и на контактных поверхностях инструмента

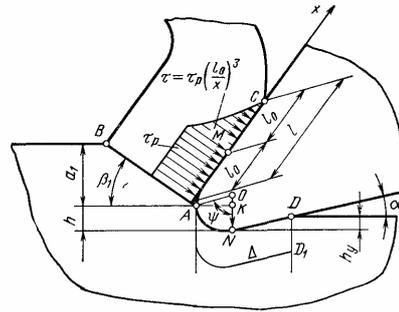


Рис. 1.8. Схема к расчёту контактных площадок на передней и задней поверхностях инструмента

где $n = \frac{1}{1 + b_0}$; $b_0 = \frac{0,25 FD^{0,3} \sqrt{\cos \gamma + B \sin \gamma}}{\sqrt{Pe} B^{0,3} [\cos \gamma + \sin \gamma - B(\cos \gamma - \sin \gamma)^{0,2}]}$; c – теплоёмкость материала заготовки; ρ – плотность материала заготовки.

Максимальная контактная температура на передней поверхности имеет место в точке M ($x = l_0$), т.е. в конце зоны пластического контакта, и выражается уравнением

$$\theta_M = \theta_A(1 + \psi_M), \quad (1.16)$$

где $\theta_A = \frac{\tau_p}{c\rho B} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{PeB}{4}}$ – максимальная температура пластических деформаций в условной плоскости сдвига (в точке A , на режущей кромке); $\psi_M = \frac{0,9675 n B \sqrt{Pe}}{\operatorname{erf} \sqrt{\frac{PeB}{4}}} \sqrt{\frac{\cos \gamma + \sin \gamma - B(\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma + B \sin \gamma}}$ – отношение

температур θ'_M / θ_A .

Температура в точке C – месте отрыва стружки от передней поверхности инструмента (при $x = 2l_0$) определяется по формуле

$$\theta_C = \theta_A(1 + 0,66\psi_M). \quad (1.17)$$

Суммарная контактная температура на передней поверхности равна

$$\theta_n = \theta_A \left(1 + \psi_M \sqrt{\frac{x}{l_0}} \right), \quad 0 \leq x \leq l_0; \quad (1.18)$$

$$\theta_n = \theta_A \left[1 + \psi_M \left(\frac{l_0}{x} \right)^{0,6} \right], \quad x > l_0 \quad (1.19)$$

Максимальная температура трения на задней поверхности инструмента (в точке N) (рис. 1.9)

$$\theta'_N = 0,6 \eta_1 \sqrt{PeE} \frac{\tau_p B^{0,25} \cos \alpha}{c\rho \sin^{0,25} \alpha}; \quad (1.20)$$

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + b_1}, \quad b_1 = \frac{0,25 FD^{0,3} \sin^{0,1} \alpha}{\sqrt{Pe} E^{0,2} B^{0,1}}, \quad E = \rho_1 / a_1.$$

Координата, которой соответствует максимум суммарной контактной температуры на задней поверхности инструмента

$$\left(\frac{x}{\Delta} \right)_m = 0,25 + \sqrt{0,0625 - \frac{0,1 \sin^{0,5} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{PeB}{4}}}{\eta_1 Pe E B^{2,5} \cos \alpha}}. \quad (1.21)$$

Суммарные контактные температуры в точках $N(x = 0,499\Delta)$ и $D(x = \Delta)$:

$$\theta_N = \theta_A \left(0,5 + \frac{0,36 \sin^{0,25} \alpha}{B^{1,25} \sqrt{PeE}} + \psi_N \right); \quad (1.22)$$

$$\theta_D = \theta_A \left(0,5 + \frac{0,25 \sin^{0,25} \alpha}{B^{1,25} \sqrt{PeE}} + 0,7 \ln \psi_N \right); \quad (1.23)$$

$$\psi_N = \frac{0,6 \eta_1 B^{1,25} \sqrt{PeE} \cos \alpha}{\sin^{0,25} \alpha \operatorname{erf} \sqrt{\frac{PeB}{4}}}.$$

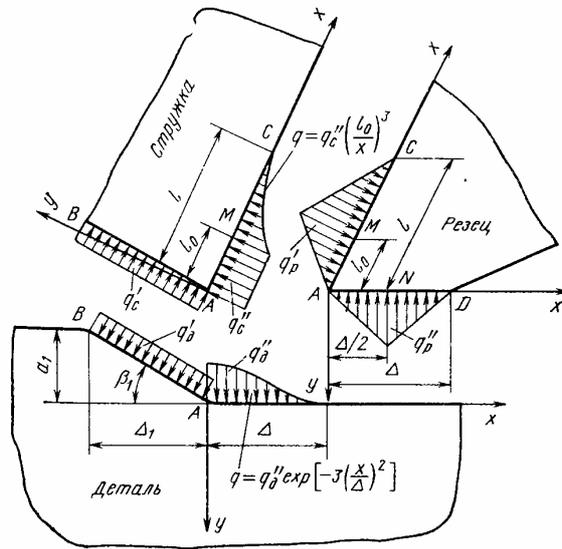


Рис. 1.9. Общая схема для расчёта тепловых явлений при резании

Средняя контактная температура на участке AD .

$$\bar{\theta}_3 = 0,5 \theta_A \left(1 + \frac{1}{u} + mu \right), \quad (1.24)$$

$$u = \frac{\sqrt{PeE} B^{1,25}}{\sin^{0,25} \alpha}, \quad m = \frac{1,035 \eta_1 \cos \alpha}{\operatorname{erf} \sqrt{\frac{PeB}{4}}}.$$

Для определения тепловых потоков в заготовке воспользуемся схемой, изображённой на рис. 1.9. Теплота Q_3 распределяется между стружкой и резцом:

$$Q_3 = Q_{дз} + Q_{рз}, \quad (1.25)$$

где $Q_{дз}$ и $Q_{рз}$ – доли теплоты трения, уходящей соответственно с контактной площадки задней поверхности в деталь и резец, Дж/с.

$$Q_{дз} = 0,625 \eta_1 \tau_p b \rho_1 v \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}} \cos \alpha; \quad (1.26)$$

$$Q_{рз} = 0,625 (1 - \eta_1) \tau_p b \rho_1 v \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}} \cos \alpha; \quad (1.27)$$

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + b_1}, \quad b_1 = \frac{0,25 F D^{0,3} \sin^{0,1} \alpha}{\sqrt{Pe} E^{0,2} B^{0,1}}, \quad E = \rho_1 / a_1.$$

Средние удельные тепловые потоки

$$\bar{q}_{дз} = 0,5 \eta_1 \tau_p v \cos \alpha; \quad (1.28)$$

$$\bar{q}_{рз} = 0,5 (1 - \eta_1) \tau_p v \cos \alpha. \quad (1.29)$$

Теплота детали определяется как:

$$Q_d = \tau_p a_1 b_1 \nu M \left[\frac{0,665 n_2 \operatorname{erf} \sqrt{\frac{\operatorname{Pe} B}{4}}}{\sqrt{\operatorname{Pe} B}} + \frac{0,625 E n_3 B^{1,5}}{\sin^{0,55} \alpha} \right], \quad (1.30)$$

$$n_2 = \frac{1}{1 + \frac{0,27 FD^{0,3} E^{0,3}}{\sqrt{\operatorname{Pe}} \sin^{0,15} \alpha}}, \quad n_3 = \frac{1}{1 + \frac{0,35 FD^{0,3} \sin^{0,1} \alpha}{\sqrt{\operatorname{Pe}} E^{0,2}}}.$$

Теплота стружки определяется как:

$$Q_c = \frac{\tau_p a_1 b_1 \nu}{B} \left[\psi_c n_1 \operatorname{erf} \sqrt{\frac{\operatorname{Pe} B}{4}} + B n \frac{\cos \gamma + \sin \gamma - B (\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma + \sin \gamma} \right], \quad (1.31)$$

$$\psi_c = 1 - \frac{2}{\operatorname{Pe} B} + \frac{1,125}{\sqrt{\operatorname{Pe} B}} \frac{\exp\left(-\frac{\operatorname{Pe} B}{4}\right)}{\operatorname{erf} \sqrt{\frac{\operatorname{Pe} B}{4}}};$$

$$n = \frac{1}{1 + \frac{0,325 FD^{0,3} (1 - \sin \gamma)^{0,25}}{\sqrt{\operatorname{Pe}}}};$$

$$n_1 = \frac{1}{1 + \frac{0,225 FD^{0,3}}{\operatorname{Pe} (1 - \sin \gamma)^{0,4}}}.$$

Теплофизические характеристики сталей и сплавов приведены в прил. Г.

1.5. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ

Для оптимизации математическая модель должна иметь следующие элементы.

- критерий (критерии) оптимизации;
- целевую функцию;
- систему ограничений;
- систему уравнений, описывающих объект;
- входные, выходные и внутренние параметры;
- управляемый (варьируемый) или управляемые (варьируемые) параметры, которые выделяются из числа внутренних параметров.

Целевая функция – это аналитическая зависимость между критерием (критериями) оптимальности и подлежащими оптимизации параметрами с указанием направления экстремума.

Отличие понятий «критерий» и «целевая функция» состоит в следующем: целевая функция может включать в себя более одного критерия и для целевой функции всегда обязательно указывается вид экстремума: $f(x) \rightarrow \max$ ($f(x) \rightarrow \min$).

Различают два вида задач оптимизации: задачу минимизации и задачу максимизации.

Задача минимизации функции f на множестве $X: a \leq x \leq b, f(x) \rightarrow \min$. Целевая функция имеет вид, как показано на рис. 1.10. Здесь x_0 – глобальный минимум, а x_1 – локальный минимум целевой функции.

Задача максимизации функции f на множестве $X: a \leq x \leq b, f(x) \rightarrow \max$, а целевая функция имеет вид, как показано на рис. 1.28. Здесь x_0 – точка глобального максимума, а x_1 – точка локального максимума целевой функции.

Эти задачи оптимизации имеют решение не при любых целевых функциях и допустимых множествах. Существуют задачи, в которых невозможно найти оптимальное решение и экстремум целевой функции. Например, не существует точек минимума функции одной переменной f на множестве $X (f(x) \rightarrow \min)$ в случаях, приведённых в табл. 1.10.

Задача оптимизации разрешима, если выполняются следующие три условия: множество допустимых решений X замкнуто (предельные точки принадлежат этому множеству) и ограничено, целевая функция $f(x)$ непрерывна.

Существуют *однокритериальные задачи оптимизации (задачи математического программирования)* двух видов: линейного и нелинейного программирования. *Формулировка такой задачи:* найти значения переменных x_1, x_2, \dots, x_n , при которых целевая функция $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ имеет максимум (минимум) при условиях: $g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq (\geq, =) b_j, j = \overline{1, m}$.

Задачу математического программирования (максимум двухпараметрическую задачу оптимизации) можно решить *графоаналитическим методом*.

Постановка задачи однопараметрической однокритериальной задачи оптимизации: дан один критерий y . Объект (процесс) описан уравнением (уравнениями), включающим один искомый параметр $y = f(x)$. Имеется система ограничений: $x \geq a_1; a_2 \leq x \leq b_1$ и т.д. Необходимо найти оптимальное значение параметра $x = x_{\text{опт}}$, обращающее целевую функцию $f(x)$ в максимум или минимум.

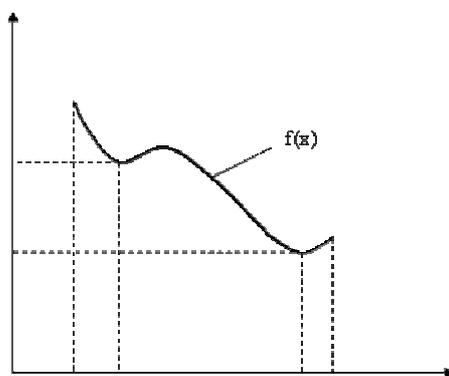


Рис. 1.10. Иллюстрация понятий «локальный минимум» и «глобальный минимум» целевой функции

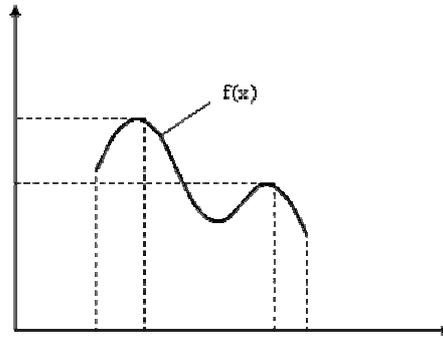
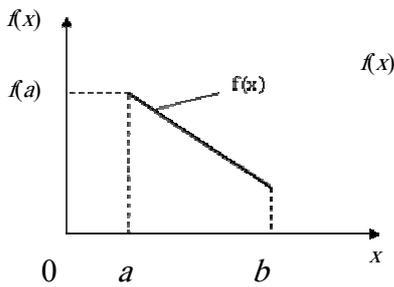
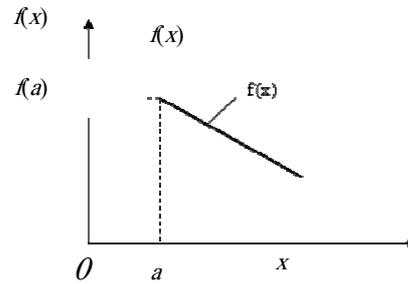


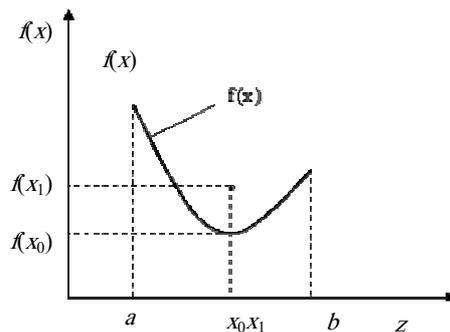
Рис. 1.11. Иллюстрация понятий «локальный максимум» и «глобальный максимум» целевой функции
Случаи, при которых невозможно найти решение задачи оптимизации



Множество допустимых решений не замкнуто: граница « a » множества допустимых решений в интервал входит, а граница « b » нет. $X = (a, b)$ – множество X не замкнуто, следовательно, $f(b)$ – не существует



Неограниченность множества допустимых решений: определена лишь одна левая граница множества допустимых решений $X = (a, \infty)$ – множество допустимых решений неограниченно



Функция $f(x)$ не является непрерывной в т. $x_0(x_1)$ существуют два значения функции – $f(x_0)$ и $f(x_1)$

Задача решается в два этапа.

На первом этапе рассматривается система ограничений, которые должны выполняться. Выполнение первого ограничения означает, что искомое значение параметра x должно находиться правее a_1 , причём a_1 в разрешённый интервал входит (рис. 1.12). Выполнение второго ограничения означает, что искомое значение параметра x должно находиться в интервале $[a_2, b_1]$, при этом границы в интервал входят.

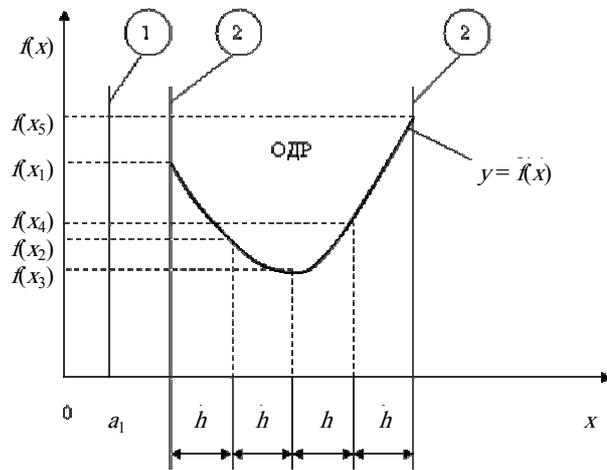


Рис. 1.12. Графическая иллюстрация решения однопараметрической однокритериальной задачи оптимизации

На втором этапе применяют *метод перебора*. В пределах области допустимых решений (ОДР) через интервал h выбирается ряд значений параметра x_j (ОДР разбита на четыре отрезка и выбрано пять значений параметра x_j). Для каждого x_j рассчитываются соответствующие значения целевой функции. Среди них находят минимальное (максимальное) значение. Значение параметра x_j , обращающее целевую функцию в минимум (максимум), является оптимальным (если $f(x)$ стремится к минимуму, то $x_{\text{опт}} = x_3$, если к максимуму, то $x_{\text{опт}} = x_5$).

Если целевая функция линейная (рис. 1.13), то на втором этапе вычисляют её значения только на границах ОДР. Эти значения сравнивают и выбирают наименьшее или наибольшее. Если $f(x) \rightarrow \min$, то $x_{\text{опт}} = b_1$, если $f(x) \rightarrow \max$, то $x_{\text{опт}} = a_2$.

Пример. Дан критерий $y = x_2/x_1$. Требуется найти $x_{1\text{опт}}$, $x_{2\text{опт}}$, обращающие в максимум целевую функцию y . Ограничения: $1 \leq x_1 \leq 8$; $2 \leq x_2 \leq 12$; $x_1 x_2 \geq 10$. Построение ОДР осуществляется в двух направлениях. В итоге в плоскости $x_1 O x_2$ ОДР будет представлять собой многогранник (рис. 1.14).

Для построения нелинейного ограничения $x_1 x_2 \geq 10$ сначала необходимо приравнять левую и правую части неравенства ($x_1 x_2 = 10$; $x_2 = 10/x_1$) и построить соответствующую кривую.

Выберем произвольную точку на плоскости $x_1 O x_2$ с любой стороны кривой, например точку с координатами $x_1 = 5$, $x_2 = 5$, «справа-вверху» от кривой. Вычислим значение левой части неравенства: $5 \cdot 5 = 25$; $25 > 10$, следовательно

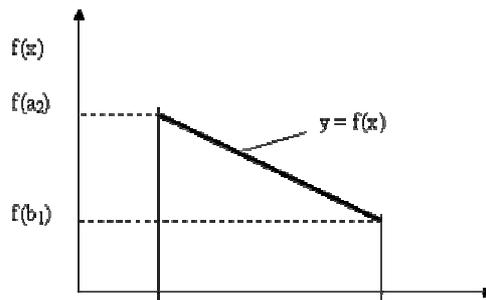


Рис. 1.13. Графическая иллюстрация решения однопараметрической однокритериальной задачи оптимизации для случая линейной целевой функции

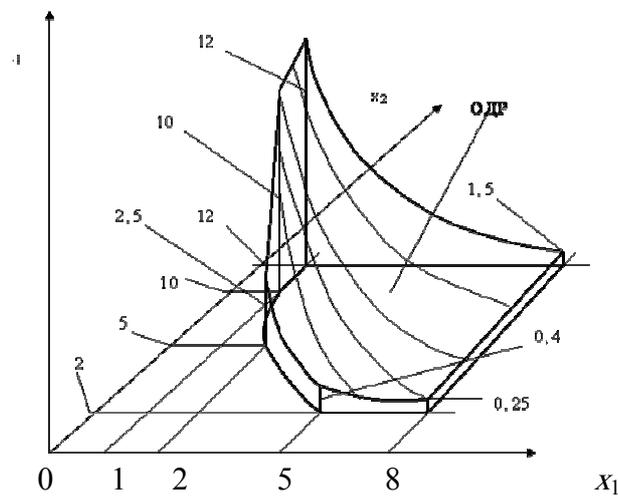


Рис. 1.14. Графическая иллюстрация решения двухпараметрической однокритериальной задачи оптимизации

неравенство выполняется. Это значит, что выбранная точка находится в ОДР, которая находится «справа-вверху» от кривой. На втором этапе вычисляем значения целевой функции в пределах ОДР: искомая точка, определяющая оптимальные значения искомых параметров, находится на границе ОДР: $x_{1\text{опт}} = 1$, $x_{2\text{опт}} = 12$. Если $x_2/x_1 \rightarrow \min$, то $x_{1\text{опт}} = 8$, $x_{2\text{опт}} = 2$.

1.5.1. ЗАДАЧИ НЕЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Методы решения задач нелинейного программирования классифицируются следующим образом.

1. Численные методы поиска экстремума функции одной переменной.

Постановка задачи. найти значение переменной x , при которой целевая функция $y = f(x)$ имеет минимум или максимум при условиях $g_j(x) = (\leq, \geq) b_j, j = \overline{1, m}$.

1.1. Классический метод.

Пусть $a \leq x \leq b$, функция $f(x)$ непрерывна на этом отрезке и имеет на нём непрерывную производную. Вычисляют значение производной $f'(x)$ и определяют критические точки (точки отрезка $[a, b]$, в которых производная обращается в нуль или не существует). В окрестности каждой критической точки исследуют знак производной и отбирают те из них, при переходе через которые производная меняет знак с минуса на плюс (точки локального минимума) или с плюса на минус (точки локального максимума). Затем вычисляют значения целевой функции в этих точках и на границах отрезка $[a, b]$. Эти значения сравнивают между собой и определяют точку, в которой достигается минимум (максимум) целевой функции. Эта точка является точкой глобального минимума (максимума) функции $f(x)$ на отрезке $[a, b]$.

При решении реальных задач оптимизации данный метод применяется редко, так как зачастую производную целевой функции определить сложно или невозможно.

1.2. Метод равномерного перебора.

Пусть дана функция $y = f(x) \rightarrow \min$ (рис. 1.15).

Фиксируют величину шага $h > 0$. Вычисляют значения целевой функции в точках $x_1 = a$ и $x_2 = x_1 + h - f(x_1)$ и $f(x_2)$. Полученные значения сравнивают. Запоминают меньшее из этих двух значений. Далее выбирается точка $x_3 = x_2 + h$ и в ней вычисляется значение целевой функции $f(x_3)$. Сравнивается оставшееся на предыдущем шаге значение и значение $f(x_3)$. Наименьшее из них опять запоминают. Так поступают до тех пор, пока очередное значение x не превысит b . Последнее оставшееся значение является приближённым значением глобального минимума.

Если целевая функция имеет узкую впадину (рис. 1.15), то можно её проскочить, и вместо точки глобального минимума определить точку локального минимума (вместо x' можно найти x''). Эта проблема частично снимается, если выбрать очень маленький шаг, но при этом потребуется много времени (в том числе и машинного) для решения задачи.

1.3. Метод золотого сечения прост, эффективен и широко применяется в практической оптимизации.

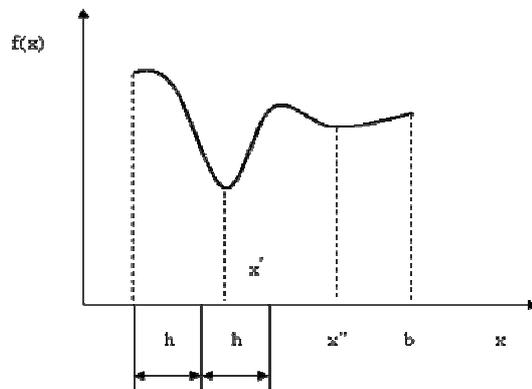


Рис. 1.15. Графическая иллюстрация метода равномерного перебора

Рассматриваемая в данном методе функция должна быть *униmodalной*. Функция $f(x)$ является *униmodalной* на отрезке $[a, b]$, если она на этом отрезке имеет единственную точку глобального минимума и слева от этой точки является строго убывающей, а справа строго возрастающей.

Суть метода *золотого сечения* заключается в том, чтобы определить точку глобального минимума на отрезке $[a, b]$ за минимальное количество шагов (за минимальное количество вычислений целевой функции).

Алгоритм метода золотого сечения заключается в следующем (рис. 1.16). На исходном отрезке $[a, b]$ выбираются две точки x_1 и x_2 . Вычисляются значения целевой функции в этих точках $f(x_1)$, $f(x_2)$ и сравниваются.

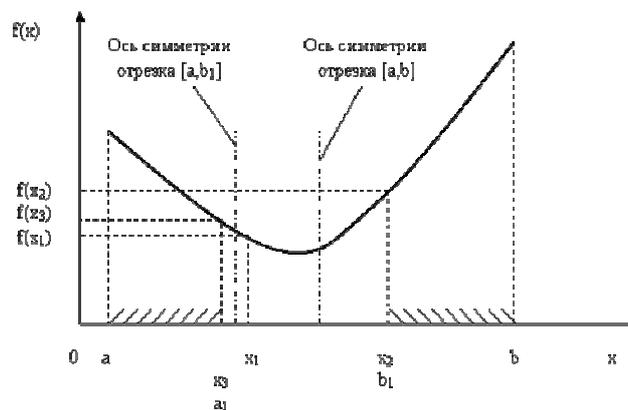


Рис. 1.16. Иллюстрация алгоритма метода золотого сечения

Из дальнейшего рассмотрения исключается отрезок, прилегающий к точке, дающей большее значение целевой функции (отрезок $[x_2, b]$). Для нового отрезка $[a, b_1]$ находится его середина, и по отношению к ней симметрично оставшейся точке x_1 ставится точка x_3 . Для нее рассчитывается значение целевой функции $f(x_3)$ и сравнивается с $f(x_1)$. Из дальнейшего рассмотрения опять исключается отрезок, прилегающий к точке с большим значением целевой функции, здесь это отрезок $[a, x_3]$. Текущий отрезок «стягивается» до нового отрезка $[a_1, b_1]$ и т.д.

2. Численные методы поиска экстремума функции n переменных.

2.1. Численные методы в задачах без ограничений.

2.1.1. Метод покоординатного спуска.

Это задача *безусловной минимизации* (задачи минимизации целевой функции $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ на всем пространстве переменных). Если требуется решить задачу максимизации, то выражение целевой функции умножают на (-1) и снова решается задача минимизации. При этом строится последовательность точек $x^{(0)}, x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n)}$, монотонно уменьшающих значение целевой функции $f(x^{(0)}) \geq f(x^{(1)}) \geq f(x^{(2)}) \geq \dots \geq f(x^{(n)})$. Направление спуска выбирается параллельно координатным осям (сначала спуск осуществляется вдоль первой оси Ox_1 , затем вдоль второй оси Ox_2 и так до последней оси Ox_n).

Имеем начальную точку $x^{(0)}$ и некоторое положительное число a (рис. 1.17). Вычисляем значение целевой функции $f(x^{(0)})$, значение целевой функции при $x = x^{(0)} + a$ и проверяем выполнение неравенства:

$$f(x^{(0)} + a) < f(x^{(0)}).$$

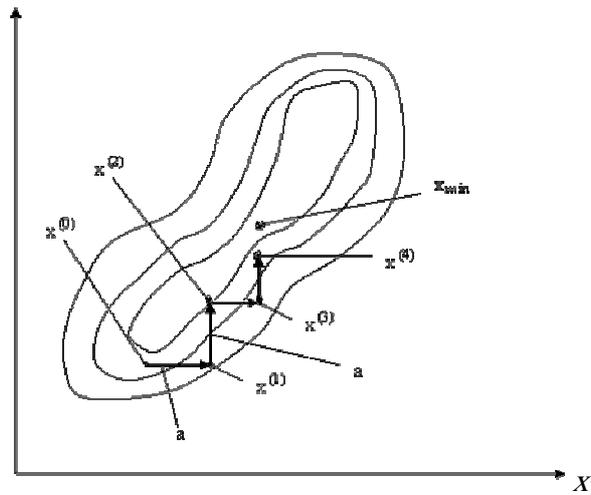


Рис. 1.17. Графическая иллюстрация поиска точки минимума методом покоординатного спуска

Если это неравенство справедливо, то вдоль направления оси Ox_1 значение функции f уменьшилось, и поэтому полагают $x^{(1)} = x^{(0)} + a$. Если неравенство (1.114) не выполняется, то делают шаг в противоположном направлении и проверяют выполнение неравенства

$$f(x^{(0)} - a) < f(x^{(0)}). \quad (1.32)$$

В случае выполнения этого неравенства полагают $x^{(1)} = x^{(0)} - a$. Если оба неравенства (1.114) и (1.115) не выполняются, то $x^{(1)} = x^{(0)}$.

Второй шаг производят вдоль координатной оси Ox_2 . Вычисляют значение функции в точке $(x^{(1)} + a)$ и сравнивают его с предыдущим значением:

$$f(x^{(1)} + a) < f(x^{(1)}). \quad (1.33)$$

Если это неравенство выполняется, то полагают $x^{(2)} = x^{(1)} + a$. Если оно не выполняется, то делают шаг в противоположном направлении и проверяют выполнение неравенства

$$f(x^{(1)} - a) < f(x^{(1)}). \quad (1.34)$$

В случае выполнения неравенства (1.34) считают, что $x^{(2)} = x^{(1)} - a$. Если оба неравенства (1.33) и (1.34) не выполняются, то принимают $x^{(2)} = x^{(1)}$.

Так перебирают все n направлений координатных осей. На этом первая итерация закончена. На n -м шаге будет получена некоторая точка $x^{(n)}$. Если $x^{(n)} \neq x^{(0)}$, то аналогично, начиная с $x^{(n)}$, осуществляют вторую итерацию. Если же $x^{(n)} = x^{(0)}$ (это имеет место, если на каждом шаге ни одно из пары неравенств не окажется выполненным), то величину шага нужно уменьшить, взяв, например, $a_{n+1} = a_n/2$, и в следующей итерации использовать новое значение величины шага.

Последующие итерации выполняют аналогично. Вычисления прекращают при выполнении какого-либо условия окончания счёта, например $|f(x)_{(k+1)} - f(x)_{(k)}| < \delta$, где $f(x)_{(k+1)}$ – значение целевой функции на $(k+1)$ итерации; $f(x)_{(k)}$ – значение целевой функции на k -й итерации; δ – некоторое положительное число, характеризующее точность решения исходной задачи минимизации целевой функции.

Применяют также следующие методы: метод Хука-Дживса, градиентный метод, метод Ньютона, метод сопряжённых направлений и т.д.

2.2. Численные методы в задачах с ограничениями.

2.2.1. Метод покоординатного спуска.

Данный метод распространяется на задачи с простыми ограничениями типа: $a_1 \leq x_1 \leq b_1; a_2 \leq x_2 \leq b_2, \dots, a_n \leq x_n \leq b_n$. Основные процедуры данного метода аналогичны предыдущему методу.

2.2.2. Метод линеаризации (приведения задачи нелинейного программирования к задаче линейного программирования).

Рассмотрим суть данного метода на примере, который приводился выше.

Приводим данную задачу к задаче линейного программирования: логарифмируем ограничения и целевую функцию: $\lg 1 \leq \lg x_1 \leq \lg 8$; $\lg 2 \leq \lg x_2 \leq \lg 12$; $\lg x_1 + \lg x_2 \geq \lg 10$. После вычислений получим:

$$0 \leq \lg x_1 \leq 0,903; \quad (1.35)$$

$$0,301 \leq \lg x_2 \leq 1,079; \quad (1.36)$$

$$\lg x_1 + \lg x_2 \geq 1. \quad (1.37)$$

После логарифмирования целевой функции $\lg y = \lg x_2 - \lg x_1 \rightarrow \max$.

Далее задача решается с применением симплекс-алгоритма или графоаналитически (рис. 1.18 и вычисления, сопровождающие построения).

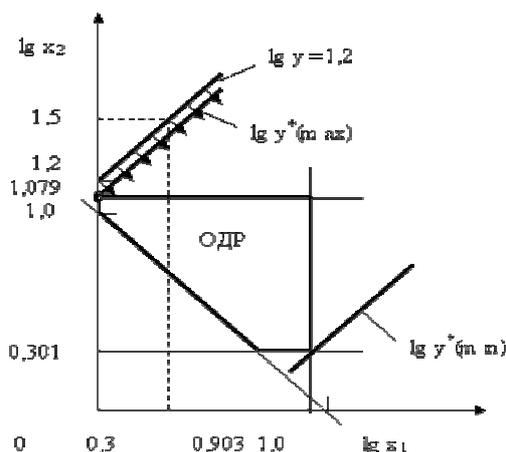


Рис. 1.18. Графическая иллюстрация графоаналитического решения задачи оптимизации методом линеаризации

Ограничения (1.36) и (1.37) представляют собой прямые линии, параллельные соответственно осям $0 - \lg x_2$ и $0 - \lg x_1$. Причём, левая ограничительная линия в ограничении (1.37) совпадает с осью $0 - \lg x_2$. Ограничение (1.36) представляет собой прямую линию, наклонную под углом 45° к осям, и имеющую координаты пересечения осей $(0, 1)$. Для нахождения точки касания линии, соответствующей целевой функции, сначала строим «произвольную» линию для целевой функции, приравнявая её выражение к произвольному числу в данном масштабе: приравняем выражение для целевой функции к числу 1,2: $\lg x_2 - \lg x_1 = 1,2 \Rightarrow \lg x_2 = 1,2 + \lg x_1$.

$\lg x_1$	0	0,3
$\lg x_2$	1,2	1,5

Далее строим линию, параллельную данной линии и касающуюся границы ОДР. Находим координаты точки касания: $\lg x_{1\text{опт}} = 0 \Rightarrow x_{1\text{опт}} = 1$; $\lg x_{2\text{опт}} = 1,079 \Rightarrow x_{2\text{опт}} = 12$. Если целевая функция стремится к минимуму ($\lg y = \lg x_2 - \lg x_1 \rightarrow \min$), то прямая линия, соответствующая ей, коснётся границы ОДР в точке с координатами: $\lg x_{1\text{опт}} = 0,903 \Rightarrow x_{1\text{опт}} = 8$; $\lg x_{2\text{опт}} = 0,301 \Rightarrow x_{2\text{опт}} = 2$.

Применяются также методы: условного градиента, барьерных функций, штрафных функций и т.д.

1.5.2. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ

Рассмотрим некоторые методы решения многокритериальных задач оптимизации.

Метод поиска Парето-эффективных решений.

Пусть имеется множество вариантов решения, по которым определены значения всех критериев. Представим множество оценок вариантов решения в пространстве равнозначных критериев (рис. 1.19): Парето-эффективные оценки состоят из точек кривой bc , исключая точку c , и линии de .

Правило. Множество Парето-эффективных оценок $P(Y)$ представляет собой «северо-восточную» границу множества Y без тех его частей, которые параллельны одной из координатных осей или лежат в «глубоких» провалах.

К преимуществам метода относят равнозначность критериев и математическую объективность метода. Недостаток метода: одно окончательное решение получается только в частном случае (количество Парето-эффективных решений, как правило, более одного).

Пример. Имеется 10 вариантов металлорежущих станков, среди которых для проектируемого участка необходимо выбрать наилучший. Станки оценены экспертами по производительности и надёжности. Оценивание производилось по 11-балльной шкале от 0 до 10. Результаты оценки станков приведены в табл. 1.2.

1.2. Экспертные оценки станков по критериям производительности и надёжности

Критерии	Оценки экспертов (баллы) для станков									
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀
Производительность (П)	6	4	10	3	10	0	2	4	6	7
Надёжность (Н)	6	2	1	7	4	4	10	4	8	2

Представим множество оценок вариантов металлорежущих станков в пространстве критериев (рис. 1.19): Парето-эффективными решениями здесь являются варианты станков C₅, C₇ и C₉.

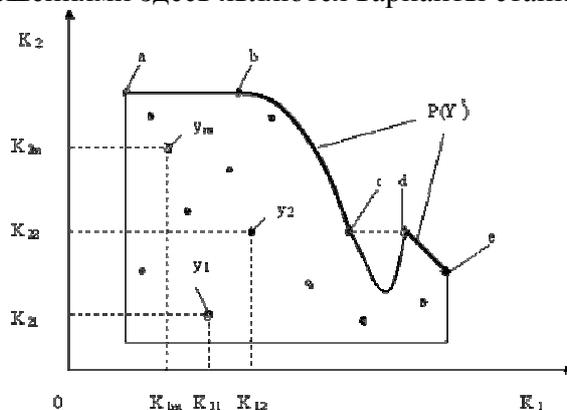


Рис. 1.19. Иллюстрация поиска Парето-эффективных решений:

K_1 и K_2 – критерии оценки вариантов решения;

$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ – множество оценок альтернативных вариантов решения;

$K_{11}, K_{12}, \dots, K_{1m}$ – значения первого критерия для 1, 2, ..., m -го варианта решения;

$K_{21}, K_{22}, \dots, K_{2m}$ – значения второго критерия для 1, 2, ..., m -го варианта решения;

$P(Y)$ – множество Парето-эффективных оценок решений

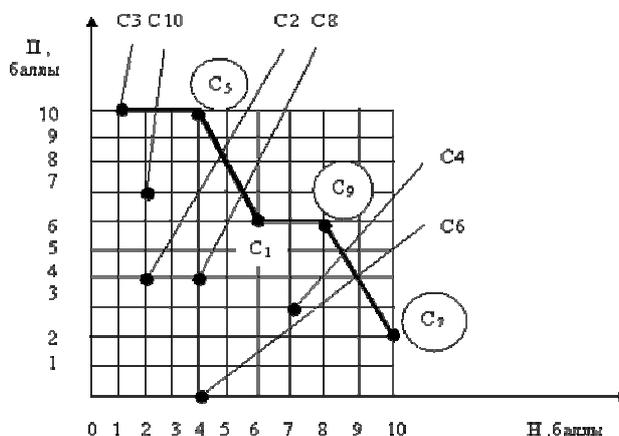


Рис. 1.20. Пример поиска Парето-эффективных решений

Метод решения многокритериальных задач оптимизации с использованием обобщённого (интегрального) критерия основан на объединении частных критериев $F_i(X)$, $i = \overline{1, n}$ в один интегральный критерий $F(X) = \Phi(F_1(X), F_2(X), \dots, F_n(X))$ и нахождении затем максимума или минимума данного критерия.

В зависимости от того, каким образом частные критерии объединяются в обобщённый критерий, различают следующие виды обобщённых критериев:

- аддитивный;
- мультипликативный;
- максиминный (минимаксный).

В аддитивных критериях целевая функция в общем виде имеет следующий вид:

$$F(X) = \sum_{i=1}^n C_i \frac{F_i(X)}{F_i^0(X)} = \sum_{i=1}^n C_i f_i(X) \rightarrow \max(\min),$$

где n – количество объединяемых частных критериев; C_i – весовой коэффициент i -го частного критерия; $F_i(X)$ – числовое значение i -го частного критерия; $F_i^0(X)$ – i -й нормирующий делитель; $f_i(X)$ – нормированное значение i -го частного критерия.

В качестве нормирующих делителей принимаются директивные значения параметров или критериев, заданных заказчиком (считается, что значения параметров, заложенные в техническом задании, являются оптимальными или наилучшими), или максимальные (минимальные) значения критериев, достигаемые в области допустимых решений.

Обобщённый аддитивный критерий является безразмерной величиной.

Пример. Определить оптимальный вариант машины с использованием обобщённого (интегрального) аддитивного критерия. Наилучшими вариантами машины являются те из них, которые обеспечивают наибольшую её производительность и надёжность. Исходные данные для решения задачи приведены в табл. 1.3.

1.3. Исходные данные для определения оптимального варианта исполнения машины

Критерий F_i	Весовой коэффициент C_i	Значения критериев для вариантов исполнения машины		
		вариант 1	вариант 2	вариант 3
Производительность F_1 , шт./ч	0,6	1000	2000	4000
Надёжность (наработка на отказ) F_2 , ч	0,4	1500	1000	500

Целевая функция на основе аддитивного критерия запишется следующим образом:

$$F(X) = C_1 \frac{F_1(X)}{F_1^0(X)} + C_2 \frac{F_2(X)}{F_2^0(X)} \rightarrow \max.$$

В качестве нормирующих делителей в данной задаче примем наилучшие (максимальные) значения частных критериев: $F_1^{(0)}(X) = 4000$ шт./ч, $F_2^{(0)}(X) = 1500$ шт./ч. Значения обобщённого аддитивного критерия рассчитываются для каждого варианта машины:

- Вариант 1: $F(X) = 0,6 \cdot (1000/4000) + 0,4 \cdot (1500/1500) = 0,55$;
- Вариант 2: $F(X) = 0,6 \cdot (2000/4000) + 0,4 \cdot (1000/1500) = 0,558$;
- Вариант 3: $F(X) = 0,6 \cdot (4000/4000) + 0,4 \cdot (500/1500) = 0,732$.

Оптимальным является третий вариант машины, так как ему соответствует максимальное значение обобщённого аддитивного критерия.

Преимущество данного метода: как правило, всегда удаётся определить единственный оптимальный вариант решения.

Недостатки:

- трудности (субъективизм) в определении весовых коэффициентов;
- аддитивный критерий не вытекает из объектной роли частных критериев и поэтому выступает как формальный математический приём;
- в аддитивном критерии происходит взаимная компенсация частных критериев, т.е. уменьшение одного из них может быть компенсировано увеличением другого критерия.

В мультипликативном критерии целевая функция записывается следующим образом:

$$F(X) = \prod_{i=1}^n C_i F_i(X) \rightarrow \max(\min),$$

где C_i – весовой коэффициент i -го частного критерия; $F_i(X)$ – числовое значение i -го частного критерия.

Преимущества мультипликативного критерия:

- не требуется нормирование частных критериев;
- практически всегда определяется одно оптимальное решение.

Недостатки:

- трудности (субъективизм) в определении весовых коэффициентов;
- перемножение разных размерностей;
- взаимная компенсация значений частных критериев.

Максиминный (минимаксный) критерий основывается на идее равномерности: стараются найти такие значения переменных (параметров) $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, при которых нормированные значения всех частных критериев равны между собой:

$$C_i f_i(X) = K,$$

где C_i – весовой коэффициент i -го частного критерия; $f_i(X)$ – нормированное значение i -го частного критерия; K – константа.

На практике так варьируют значениями переменных проектирования x_1, x_2, \dots, x_m , при которых последовательно «подтягиваются» те нормированные критерии, численные значения которых в исходном решении оказались наименьшими. При этом подтягивание «отстающего» критерия неизбежно приводит к снижению значений части остальных критериев. Но при проведении ряда шагов можно добиться определённой степени уравнивания противоречивых частных критериев.

Формально принцип максимина формулируется следующим образом: выбрать такой набор переменных $X^{(0)} \in X$, при котором реализуется максимум из минимальных нормированных значений частных критериев: $F(X^{(0)}) = \max \min f_i(X)$. Такой принцип выбора $X^{(0)}$ иногда носит название *гарантированного результата*. Если частные критерии необходимо минимизировать, то самым отстающим критерием является тот, который принимает максимальное значение. В этом случае применяют принцип минимакса: $F(X^{(0)}) = \min \max f_i(X)$.

Универсального метода, с помощью которого можно было бы решить любую задачу оптимизации, не существует. Поэтому для решения конкретной задачи применяют один или несколько своих численных методов.

1.5.3. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА КРИТЕРИЕВ ОПТИМАЛЬНОСТИ

Если требуется оптимизировать один из показателей качества проектируемого объекта при соблюдении ограничений на остальные показатели, то нужно сформировать один частный критерий. Задача оптимизации при этом сводится к задаче максимизации (минимизации) данного критерия с учётом заданных ограничений.

При наличии нескольких критериев выбирают:

а) *аддитивный критерий*, если существенное значение имеют абсолютные значения критериев при выбранном векторе параметров X ;

б) *мультипликативный критерий*, если существенную роль играет изменение абсолютных значений частных критериев при вариации вектора X ;

в) *максиминный (минимаксный) критерий*, если стоит задача достижения равенства нормированных значений противоречивых (конфликтных) частных критериев.

Рекомендации по выбору ограничений, целевой функции и критериев оптимальности при обработке резанием. Для следующих критериев оптимизации следует принимать значения: штучная

себестоимость, штучное время, компромисс стоимости и времени – минимум; число (в штуках); доля прибыли – максимум [6].

Зависимость для штучного времени должна быть приведена к проходу в пределах операции и к составляющим затрат времени, зависящим от режимов обработки. Во вспомогательном времени должно быть учтено только время на смену инструмента $\tau_{\text{сми}}$ и поворот режущей пластины $\tau_{\text{прп}}$. Время обслуживания и отдыха ($\tau_{\text{обсл}} + \tau_{\text{отд}}$) можно не учитывать.

Система ограничений для процессов резания приведена в табл. 1.4.

1.4. Технические ограничения при точении

Ограничения		Станок	Зажимное приспособление	Оптимальные рабочие режимы	Заготовка
Геометрические		Рабочее пространство (максимальный, минимальный диаметр заготовки, высота рабочей зоны, максимальная длина обработки и др.)	Диапазоны запрещённых диаметров, биение детали в патроне	Геометрия режущей части, форма державки, токарный резец, токарная штанга	Размеры (громоздкость), геометрические погрешности (макро- и микроотклонения формы)
По нагрузке (износ)		Мощность, крутящий момент	Ограничение по частоте вращения, ограничение по силе зажима токарного патрона, задней баки	Материал режущей части, режущая пластина, резцедержавка	Материал, предварительная подготовка, обрабатываемость
Прочность, деформация и упругость	Статическая	Упругость (шпиндель, станина, суппорт, задняя бабка, механизм подачи)	Жёсткость закрепления	Прогиб державки	Прогиб заготовки (упругость заготовки)
	Динамическая	Аналитически пока не описано	Колебания (появление вибрации) в системе СПИД		
	Термическая		Термические деформации		

Основное время $\tau_{\text{осн}}$, определяемое только для станков, относят к длине прохода с рабочей подачей (может быть принята длина заготовки).

В качестве технологических составляющих себестоимости должны быть учтены стоимость одного часа работы станка $C_{\text{ст}}$, часовая заработная ставка $C_{\text{зс}}$, стоимость других расходов $C_{\text{др}}$ и стоимость инструмента $C_{\text{инстр}}$.

Ограничения могут быть образованы элементами системы СПИД, проявлением характеристик (геометрии, кинематики, нагрузки, износа) или совокупностью переменных (силами резания, производительностью, периодом стойкости), причём не всегда возможно однозначное разделение их.

1.6. МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КАК СРЕДСТВО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ

1.6.1. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, РЕАЛИЗУЮЩЕЕ МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Сущность метода конечных элементов (МКЭ) заключается в том, что область, занимаемая телом, разбивается на конечные элементы (треугольники в плоском случае и тетраэдры в пространственном). Внутри каждого элемента задаются некоторые функции формы, позволяющие определить перемещения внутри элемента по перемещениям в узлах (в местах стыков конечных элементов).

Комплексы МКЭ (ANSYS, NASTRAN, ABAQUS, COSMOS и др.) относятся к категории CAE-систем (Computer Aided Engineering), применяемых при проектировании машиностроительных, строительных и других конструкций.

Лидером комплексов МКЭ (FEA-пакетов) является ANSYS. Детальное описание пакета ANSYS можно найти на официальном сайте компании ANSYS [7] или (русский, сокращённый вариант) на сайте компании CAD-FEM-Russia [8]. Достоинством этой системы является наиболее полная документация и система помощи.

Имеются следующие конфигурации программы ANSYS, различающиеся своими возможностями:

- *ANSYS StructuralTM* – статические и динамические расчёты в линейной и нелинейной постановках;
- *ANSYS MechanicalTM* (с модулем ANSYS Thermal) – расчёт полей температур из решения задач стационарной и нестационарной теплопроводности, конвекции, теплообмена излучением, расчёты фазовых превращений (замерзание, плавление, сварка и т.д.). Поля температур можно автоматически передать в ANSYS Structural для прочностных расчётов;
- *ANSYS ProfessionalTM* – решение контактных задач, проведение геометрически нелинейные расчётов и оптимизации;
- *ANSYS DesignSpace[®]* – несложные прочностной, частотный или температурный расчёты, оптимизация, оценка в первом приближении правильности принятых конструктивных решений;
- *ANSYS Workbench* – многодисциплинарный анализ.

Лицензионные дистрибутивы программ ANSYS и NASTRAN стоят довольно дорого – до 10 000\$. У пользователей есть альтернатива использования freeware-программ конечно-элементного анализа. Далеко не полный их список можно найти на Web-страницах [9, 10].

ELCUT – это интерактивная система моделирования двумерных краевых задач методом МКЭ [11]. Система позволяет решать плоские и осесимметричные задачи стационарной и нестационарной теплопередачи, анализа упругого напряжённого состояния, совмещённые задачи и др. Имеется собственный модуль описания геометрии, можно импортировать фрагменты модели из AutoCAD или других САПР.

MatLab – профессиональный пакет для решения математических задач разной сложности, моделирования, решения уравнений, построения графиков. Пакет позволяет решать задачи тепломассопередачи и переноса, выполнять прочностные расчёты, а также совместные задачи. Имеется обширная библиотека встроенных функций с возможностью дополнения пользователем.

FemLAB – пакет для математического моделирования практически любых процессов, описываемых дифференциальными уравнениями. Имеется возможность взаимодействия с Matlab и CAD-пакетами [12]. Основным достоинством данного пакета является графическое представление расчётной модели на координатной сетке. Сетка может быть выполнена в реальном масштабе моделируемого объекта.

ABAQUS – универсальная конечно-элементная программа для проведения углублённого анализа поведения конструкции и решения задач теплопередачи, а также анализ контактного взаимодействия конструкции.

LS-DYNA (LSTC) предназначена для анализа нелинейного динамического отклика трёхмерных неупругих структур, решения контактных задач (удар, разрушение и формование). Пользователями программы являются все известные мировые автомобильные концерны, множество фирм оборонной отрасли и др.

ADAMS позволяет определить все параметры движения системы как из абсолютно жёстких, так и упругих звеньев; вычислить усилия в связях и реакции в опорах, усилия на элементы управления; определять взаимное перемещение составных частей и перемещения и углы поворота в шарнирах и др.

1.6.2. ПАКЕТ ТВЁРДОТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ SOLIDWORKS И ЕГО МОДУЛИ

Программа SolidWorks[®] – это САПР, использующая привычный графический интерфейс пользователя Microsoft Windows[®]. Для проектируемых трёхмерных деталей и сборок можно создавать двухмерные чертежи. Детали, сборки и чертежи являются связанными документами; при внесении любых изменений в детали или сборки документ чертежа изменяется.

Пакет SolidWorks содержит следующие основные модули.

DriveWorksXpress используется для автоматизации процесса проектирования, которая позволяет внедрить правила проектирования и повторно использовать проектную информацию в целях сохранения времени и средств. Дополнительная информация о DriveWorks на веб-узле [13].

COSMOSMotion (в версии SolidWorks Office Premium) даёт возможность определить движение механизмов, моделировать его и анимировать результаты без выхода из среды SolidWorks, а также рассчитывать нагрузки, которые могут быть использованы для определения эпюр нагрузок в структурном анализе. Источниками движения могут быть перемещения/углы поворота, скорости/ускорения и силы/моменты. В качестве результатов программа предоставляет набор диаграмм, отображающих координаты, скорости, ускорения, усилия в зависимости от времени.

Используя функциональность *ScanTo3D* (в версии SolidWorks Office Premium), можно открыть данные сканирования любого сканирующего устройства, подготовить данные и затем преобразовать их в поверхность или твёрдотельную модель.

SolidWorks Routing создаёт пути маршрута трубопровода, труб или электрических кабелей между компонентами, также включает в себя выравнивание проводки и функции оформления, позволяющие получать двухмерные чертежи по изготовлению проводки из трёхмерных электрических маршрутных сборок.

SolidWorks Toolbox включает библиотеку стандартных деталей: подшипники, болты, гайки, кулачки, зубчатые колеса, кондукторные втулки, вкладыши, стопорные кольца, винты, звёздочки, конструкционные профили, включая алюминий и сталь, шкивы для зубчатых ремней, шайбы, канавки для добавления стандартных канавок в цилиндрическую деталь.

К сожалению, крепежи являются приблизительными изображениями и не включают точное описание резьбы, что может повлиять на их использование в некоторых типах анализов, например расчётов напряжения. Кроме того, SolidWorks Toolbox позволяет выполнить расчёт балки для определения напряжения и отклонения балки и расчёт подшипника для определения нагрузки и жизненного цикла подшипника.

TolAnalyst™ – анализ допусков для определения влияния допусков и методов сборки на размерный анализ между двух элементов сборки.

COSMOSXPress позволяет провести статический анализ конструкции. Результаты расчета представляются в виде изображения на конструкции эквивалентных напряжений, запаса прочности и деформированного вида.

1.6.3. ПРОДУКТЫ-АНАЛОГИ SOLIDWORKS

MSC.visualNastran 4D позволяет имитировать кинематику и динамику механизмов. Его функциональность сопоставима с COSMOSMotion. При этом реальная податливость деталей также не учитывается. Нагрузки в местах соединений и силы инерции могут быть использованы в качестве граничных условий, приложенных к детали при её псевдостатическом анализе; добавлен кинематический анализ зубчатых зацеплений, имитации качения.

Возможности *vNastran 2002*, отсутствующие в COSMOSWorks: температурная зависимость коэффициента теплоотдачи при конвекционном теплообмене и трансляция динамических нагрузок из динамического в статический анализ.

В *vNastran*, в частности, отсутствуют возможность задания контактных граничных условий (выход из контакта, вступление в контакт, посадка с натягом, нелинейный контакт с большими перемещениями) и модель контактной теплопроводности.

Продукт оптимален для динамического анализа механизмов с последующим статическим расчётом деталей.

CATIA V5 & Structural Analysis – CAD/CAE-комплекс расчёта на прочность. Можно воспользоваться продуктами из конфигурации Structural Analysis:

- Generative Part Structural Analysis (GPS) – статический анализ и расчёт собственных частот единственной детали;
- Generative Assembly Structural Analysis (GAS) – статический анализ и расчёт собственных частот сборки. При наложении граничных условий в зонах контакта используется информация о сопряжениях в геометрической модели сборки;
- Elfini Structural Analysis – выбор типов конечных элементов, пре- и постпроцессоров;
- FEM Surface – модуль генерации сеток на поверхностях с возможностью управления качеством сетки.

Pro/ENGINEER & Pro/MECHANICA содержит следующие модули:

- **Structural Simulation Package** – статический и динамический анализы, расчёт собственных частот деталей и сборок, анализ чувствительности конструкции к изменению параметров, определяющих форму. Геометрическая модель разрабатывается или импортируется. Граничные условия могут быть взяты также из модулей теплового и кинематического анализа.

- **Motion Simulation Package** – кинематическое и динамическое моделирование механизмов;
- **Thermal Simulation Package** – стационарный тепловой расчёт деталей и сборок;
- **Fatigue Advisor** – прогноз долговечности конструкции в зависимости от формы циклов напряжений, типа материала, состояния поверхности и вида технологической обработки.

Функциональность *Pro/MECHANICA*, если исключить из рассмотрения *Fatigue Advisor*, несколько более ограничена по сравнению с комбинацией *COSMOSWorks+COSMOSMotion*. У *COSMOSWorks* лучше возможности моделирования поверхностей и более обширная номенклатура моделей контактного взаимодействия.

MechSoft (функционирует как приложение CAD-программ: *SolidWorks*, *SolidEdge* и др.) позволяет выполнить поверочный и проектировочный расчёты типовых объектов машиностроительных конструкции (можно определить статическую прочность или ресурс, уточнить геометрию на основе требований к конструкции) [14]. В базе данных присутствуют:

- прямозубые, косозубые и червячные, ременные, цепные и клиноременные передачи;
- шпоночные, сварные, штифтовые, резьбовые и паяные соединения;
- эвольвентные профили;
- подшипники скольжения;
- цилиндрические соединения с натягом.

Программа наделена инструментами параметрической оптимизации, позволяет анализировать плоские и пространственные размерные цепи.

MechSoft основана на аналитических вычислениях и не имеет никакого отношения к конечно-элементным и сходным процедурам. Из этого вытекают достоинства и ограничения программы. К числу первых относятся высокая степень достоверности расчётов (методы апробированы и в подавляющем большинстве узаконены в отраслевых документах), скорость и возможность проектировочного расчёта с учётом статической, усталостной и, в некоторых ситуациях, динамической прочности. Границы применимости – это стандартизованные объекты и условия их функционирования.

1.6.4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, РЕАЛИЗУЮЩЕЕ ТВЁРДОТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Одними из наиболее распространённых и освоенных специалистами комплексов CAD являются AutoCAD и созданный на его основе Autodesk Mechanical Desktop. Эти продукты имеют понятный и доступный интерфейс, а также обладают большими возможностями для моделирования в двух- и трёхмерном пространстве. Дополнительным удобством является наличие литературы об этих комплексах на русском языке.

Графические пакеты T-Flex, Компас-3D, SolidWorks также позволяют выполнять чертежи в 2D и 3D-проекциях. Кроме того, пакеты T-Flex и SolidWorks содержат расчётные модули, позволяющие проводить механические расчёты и решать задачи оптимизации.

CADWorx – пакет на базе AutoCAD® для проектирования промышленных предприятий. Комплект программ *CADWorx* полностью поддерживает и легко адаптируется ко всем отраслям промышленности. *Модули CADWorx обеспечивают следующие возможности.*

- *CADWorx Plant* и *Plant Professional*: проектирование трубопроводов, оборудования, металлоконструкций, кабельных трасс, а также связи с базой данных; реализована возможность конвертации режимов черчения из 2D в 3D и наоборот, в любой момент времени;

- *CADWorx Steel* и *Steel Professional (Металлоконструкции)* – полнофункциональный пакет трёхмерного моделирования металлоконструкций;

CADfix (Finite Element Graphical Systems, FEES) – проектирование, инженерный анализ, моделирование производственных процессов, обмен данными и моделями между комплексами САПР без потери данных. Программа восстанавливает геометрические модели, вплоть до получения твёрдотельной модели по несвязанному каркасному набору опорных линий, а также производит

модификации и экспорт геометрических файлов. CADfix может использоваться для создания расчётных моделей для конечно-элементного расчёта (доводка твёрдотельной геометрии до приемлемого для разбиения состояния и непосредственная разбивка на конечные элементы).

2. ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

2.1. ЗАДАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ

В качестве примера рассмотрим процесс несвободного резания (рис. 1.1, а).

Материал режущего инструмента – твёрдый сплав ВК8 и материал заготовки – твёрдый сплав ВТЗ-1.

Геометрические параметры резца: главный угол резца в плане $\phi = 35^\circ$, вспомогательный угол резца в плане $\phi_1 = 15^\circ$, главный задний угол резца $\alpha = 9^\circ$, передний угол резца $\gamma = 0^\circ$, угол заострения резца $\beta = 90^\circ$, угол при вершине резца в плане $\epsilon = 130^\circ$, радиус при вершине резца в плане $r = \rho_1 = 0,007$ м. Сечение резца $H \times B = 25 \times 16$ мм [5, 15]. Режимы резания [5, 15]: глубина резания $t = 0,006$ м, подача $S = 0,21-0,41$ м\об., скорость резания $v = 60$ м/мин., диаметр заготовки $d_3 = 100$ мм, частота вращения заготовки $n_3 = 307,8$ об/мин.

2.1.1. РАСЧЁТ НАГРУЗОК, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

Результаты расчётов по формулам (1.4) – (1.10) приведены в табл. 2.2. За расчётные силы принимаем $N = 3570,6$ Н и $N_1 = 9044,4$ Н. Сила стружкообразования $R = \sqrt{R_z^2 + R_y^2} = \sqrt{6480,7^2 + 2427,1^2} = 6920,2$ Н. Из треугольника сил $R_x = R \cos 45 = 4893,3$ Н.

2.2. Результаты расчёта нагрузок, действующих на режущий инструмент

Расчётный параметр	Величина
Критерий Пекле Pe	199,8
Тангенциальная составляющая силы стружкообразования R_z , Н	6480,7
Радиальная составляющая силы стружкообразования R_y , Н	2427,1
Сила трения на передней поверхности $F_{п}$, Н	1125,36
Нормальная сила N , Н	3570,6
Сила трения на задней поверхности F_1 , Н	5334,3
Нормальная сила на задней поверхности N_1 , Н	9044,4
Толщина среза a_1 , м	0,00047
Ширина среза b_1 , м	0,008
Коэффициент трения на задней контактной площадке μ_1	0,59

2.1.2. РАСЧЁТ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПЕРЕДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕЗЦА

Результаты расчётов по формулам (1.11) – (1.17) приведены в табл. 2.3.

2.3. Результаты расчёта температуры на передней поверхности резца (рис. 1.7.)

Расчётный параметр	Величина
Длина AB , м	0,001
Длина AD , м	0,0021
Длина AC , м	0,00037
h , м	0,0000898
h_v , м	0,0000657
Максимальная контактная температура на передней поверхности θ_M , °C	699
Максимальная температура пластических деформаций в условной плоскости сдвига θ_A , °C	112,1
Температура в месте отрыва стружки от передней поверхности инструмента θ_C , °C	499,43

Результаты расчетов по формулам (1.18) – (1.19) представлены на рис. 2.1.

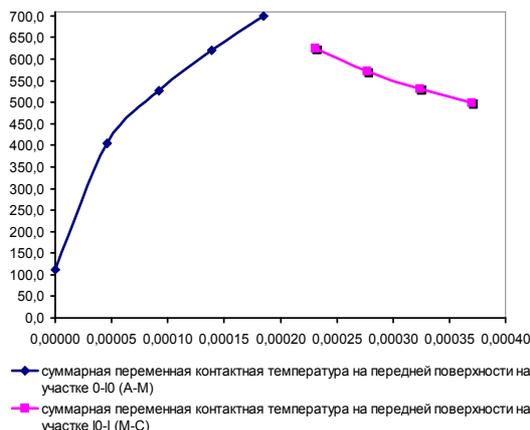


Рис. 2.1. Зависимость суммарной контактной температуры на передней поверхности резца от длины контакта стружки с инструментом

2.1.3. РАСЧЁТ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЗАДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕЗЦА

Результаты расчётов по формулам (1.21) – (1.24): координата, которой соответствует максимум суммарной контактной температуры на задней поверхности инструмента $(x/\Delta)_m = 0,499$, максимальная температура трения на задней поверхности инструмента $\theta'_N = 1897,9$ °C, суммарная контактная температура в точке N : $\theta_N = 922,75$ °C, суммарная контактная температура в точке D : $\theta_D = 672,3$ °C, средняя контактная температура на участке AD : $\bar{\theta}_s = 805,2$ °C.

2.1.4. РАСЧЁТ ТЕПЛОТЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗАГОТОВКИ

Результаты расчётов по формулам (1.26) – (1.30): доля теплоты трения, уходящей с контактной площадки задней поверхности в деталь $Q_{д3} = 21\,965,7$ Дж/с, доля теплоты трения, уходящей с контактной площадки задней поверхности в резец $Q_{р3} = 258,1$ Дж/с, $\bar{q}_{д3} = 796\,934\,122,1$ Дж/с, $\bar{q}_{р3} = 9\,365\,254,7$ Дж/с, теплота детали $Q_d = 11\,947,3$ Дж/с.

2.1.5. РАСЧЁТ ТЕПЛОТЫ ПОВЕРХНОСТИ СТРУЖКИ

Согласно принятым исходным данным теплота на поверхности стружки составит $Q_c = 16887,6$ Дж/с (см. формулу (1.31)).

2.2. СОЗДАНИЕ ГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Для создания объёмного изображения можно использовать ряд пакетов: Autodesk Inventor®, Solid Works®, Catia V5R17®, ANSYS 13.0® и т.д.

Рассмотрим этапы построения геометрии реза в пакете Catia V5R17.

Для создания новой детали в **Стандартной панели инструментов** выберите **Создать** , при этом откроется диалоговое окно, в котором предлагается выбрать один из шести стандартных шаблонов, выделите значок **Обычный.ipt**  и нажмите **ОК**. Откроется рабочее окно, в котором в верхней части располагается основное меню, слева инструментальная палитра и браузер, а справа от них рабочая область, в которой происходит построение изображения детали (рис. 2.2).

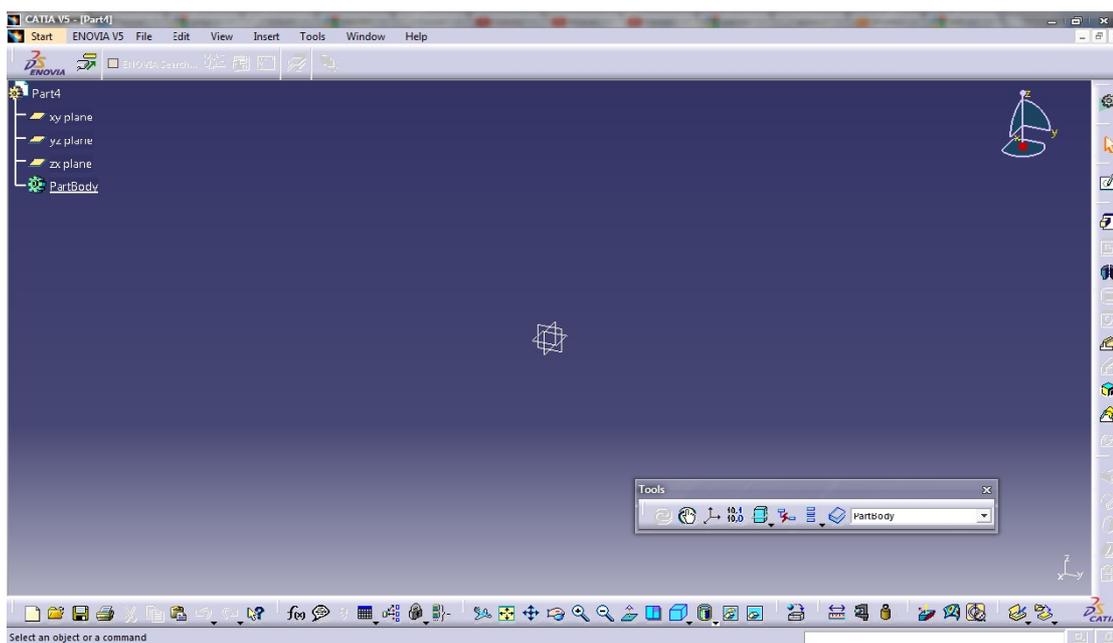


Рис. 2.2. Рабочее окно Catia V5R17

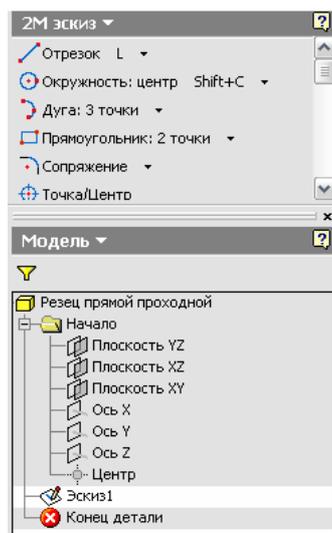


Рис. 2.3. Редактирование браузера

При создании новой детали в браузере отображаются имя детали, автоматически присваиваемое по умолчанию, папка «Начало», «Эскиз1», «Конец детали», рабочие плоскости и оси. Программа автоматически переходит в режим создания эскизов, а в инструментальной палитре появляется набор инструментов для эскизирования: **Отрезок**, **Окружность**, **Дуга** и др. (рис. 2.3). После завершения построения эскиза он заменяется на набор инструментов для превращения плоских эскизов в объёмные модели деталей. В графической области для удобства построений отображается координатная сетка. Начало координат помещается в центр графической области.

Поменяем имя детали «Деталь1» на «**Резец проходной прямой**», развернём щелчком по знаку + папку «Начало» (рис. 2.3). Сделаем видимыми плоскости YZ , XZ , XY , наведя курсор на каждую из них и щелкнув правой клавишей мыши. В раскрывшемся диалоговом окне ставим флажок на опции **Видимость** (при необходимости отключить видимость убираем флажок). Нажав клавишу **F6**, переходим к изометрическому виду. При наведении указателя мыши на имя плоскости в браузере или на изображение плоскости в рабочей области она будет также подсвечиваться соответственно в рабочей области или браузере.

Переименуем «Эскиз1» в «**верх резца**», подсветив его и нажав правую клавишу мыши. В раскрывшемся диалоговом окне выбираем **Редактировать эскиз**, нажимаем клавишу **Page Up** и, указав мышью на «**верх резца**», получаем вид на эскиз. Используя пиктограмму **Отрезок** в инструментальной палитре, вычерчиваем контуры верха резца с учётом принятой геометрии инструмента. Чтобы полученный эскиз был полностью определён, нанесём размеры, нажав пиктограмму **Размеры D**. Указателем мыши подсвечиваем требуемые линии эскиза, на которых необходимо проставить размеры. После щелчка левой клавишей мыши для каждой линии появляется её размер. Если необходимо, например, проставить параллельный размер, то дополнительно нужно щёлкнуть правой клавишей мыши и из раскрывающегося списка выбрать **параллельный размер**. Двойным щелчком левой клавишей мыши по размеру его можно отредактировать, исправив число в раскрывшейся панели **Редактирование размера**. Линия автоматически изменит свою длину и весь эскиз перестроится в соответствии с принятым размером. Весь эскиз можно просмотреть, выбрав в основном меню **Вид/Показать все (Home)**, нажав аналогичную пиктограмму или клавишу **Home**. Нажав правую клавишу мыши в рабочем окне и выбрав **Принять эскиз**, завершаем построения в эскизе, нажав клавишу **F6**, получим изометрический вид эскиза. «**Верх резца**» показан на рис. 2.4, а.

Создадим новую плоскость для нижней части резца, выбрав пиктограмму **Рабочая плоскость** или нажав клавишу **J**.левой клавишей мыши выделим плоскость «**верх резца**» и переместим указатель вниз, при этом появится окно **Сдвиг**, в котором укажем **-25**. В браузере появится **РабПлоскость1**. «**Низ резца**» будет лежать в основной плоскости. Используя ранее перечисленные команды, строим эскиз нижней части резца (рис. 2.4, б).

Выбрав пиктограмму **По сечениям** или нажав **Shift+L**, переходим к построению резца. В открывшемся диалоговом окне (рис. 2.5) в разделе **Сечения** указываем «**верх резца**», «**низ резца**». В рабочей области на предварительном просмотре можно увидеть полученный по сечениям резец. Для принятия резца нажимаем **ОК**. Переименуем в браузере указанную операцию по сечениям в «**профиль резца**».

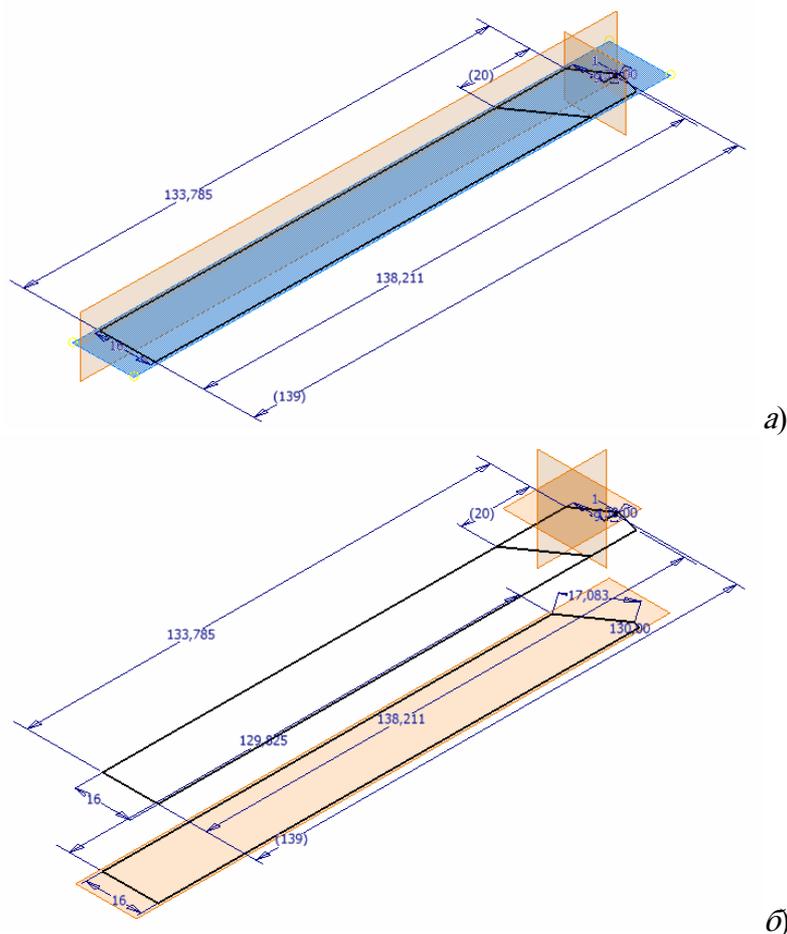


Рис. 2.4. Эскизы резца:
а – верх резца; б – низ резца

Создадим угол заострения резца или передний угол, имеющий величину 10° . Для этого построим новую плоскость, параллельную плоскости YZ , отстоящую от нее на 16 мм вправо. В браузере появится новая плоскость, назовём её «плоскость правая». На плоскости YZ создадим эскиз с именем «**вырез большой**» с длиной сегмента 20 мм, углом между горизонтальной и наклонной линией 10° и радиусом сопряжения между ними 1 мм. На «**правой плоскости**» создадим новый эскиз с именем «**вырез малый**» с длиной сегмента 14,012 мм, углом между горизонтальной и наклонной линией 10° и радиусом сопряжения между ними 1 мм. Применим операцию **По сечениям** к этим двум эскизам и получим передний угол резца, равный 0° . Эту операцию назовём «**вырез**».

На торце резца выполним фаску величиной 1,5 мм. Для этого применим команду **Фаска (Shift+K)**. В диалоговом окне укажем размер фаски, торцевые рёбра резца и нажмём **ОК**.

В завершение построений нажмём клавишу **F6** и тем самым получим изометрическое изображение резца (рис. 2.6). Сохраним изображение в файл **резец проходной прямой.ipt**.

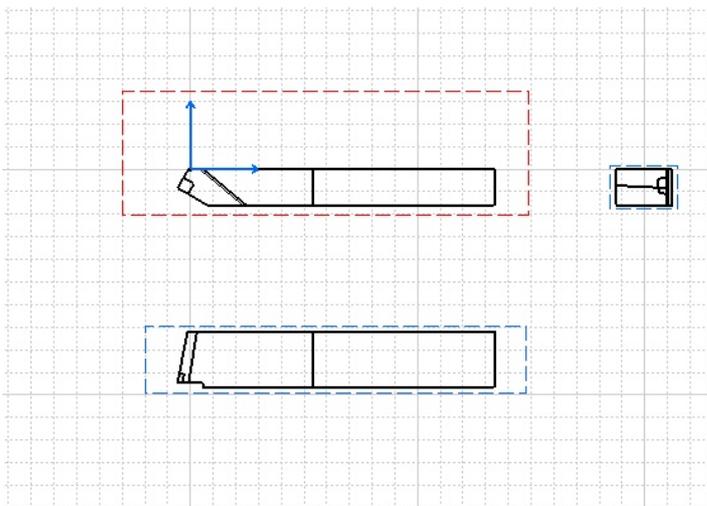


Рис. 2.5. Построение объекта по сечениям

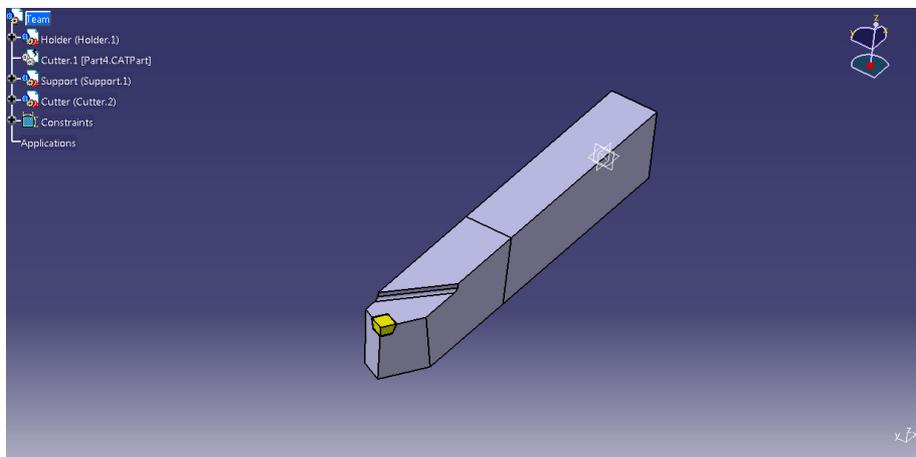


Рис. 2.6. Изометрическое изображение резца

Для передачи данного файла в пакеты Catia V5R17®, ANSYS 13.0 ® сохраним его с расширениями **iges (igs)** и **step (stp)**, предварительно развернув изображение резца на переднюю кромку и отключив видимость всех компонентов модели. Для поворота с видом на главную режущую кромку нажмём клавишу **F4**.

2.3. СОЗДАНИЕ ГЕОМЕТРИИ ЗАГОТОВКИ И ЭЛЕМЕНТА СТРУЖКИ

Прежде чем создавать эскиз, полученную расчётным путём геометрию элементов (см. формулы (1.12) – (1.14)) желательно прорисовать в натуральную величину на миллиметровой бумаге или в пакете AutoCad.

Для создания геометрии в пакете Catia V заготовки используем эскиз (рис. 2.7, а) и операцию выдавливания (рис. 2.7, б), для элемента стружки – эскиз (рис. 2.8, а) и операции выдавливания на длину контакта прямолинейной и радиусной частями главной режущей кромки, которая составляет $b_1 = 8$ мм (рис. 2.8, б). Сохраним файлы с расширением *iges*.

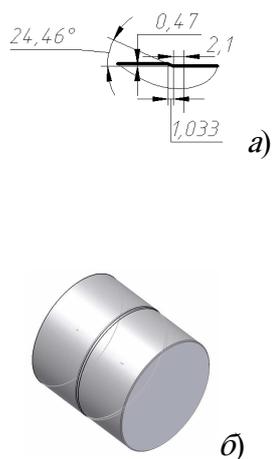


Рис. 2.7. Изометрическое изображение заготовки:
a – контур внешней поверхности заготовки на участке соприкосновения с резцом; *б* – применение операции выдавливания к эскизам контуров внешних поверхностей заготовки

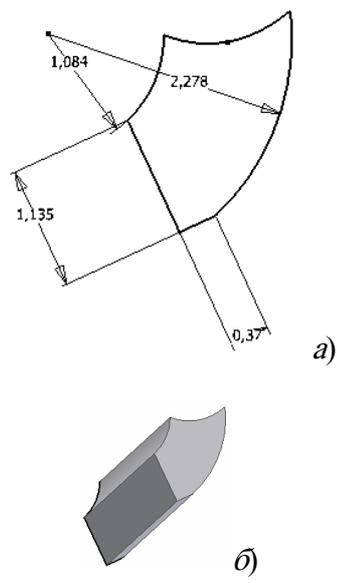


Рис. 2.8. Изометрическое изображение элемента стружки:
a – эскиз контура сечения элемента стружки; *б* – применение операции выдавливания к эскизу контура сечения элемента стружки

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЗОК, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

3.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ Catia V5R17

Импортируем файл **резец проходной прямой.igs** в Catia V5R17. Вызываем команду **Открыть (Ctrl+O)**. Программа может потребовать выполнение диагностики импортирования детали: нажимаем **Да**. В открывшемся окне слева от рабочей области панели браузера в графе **Дополнительно** нажимаем **Исправить все грани** и **ОК**. Далее действуем согласно запросам и на выходе нажимаем **Esc**. В результате имеем изображение резца (рис. 3.1).

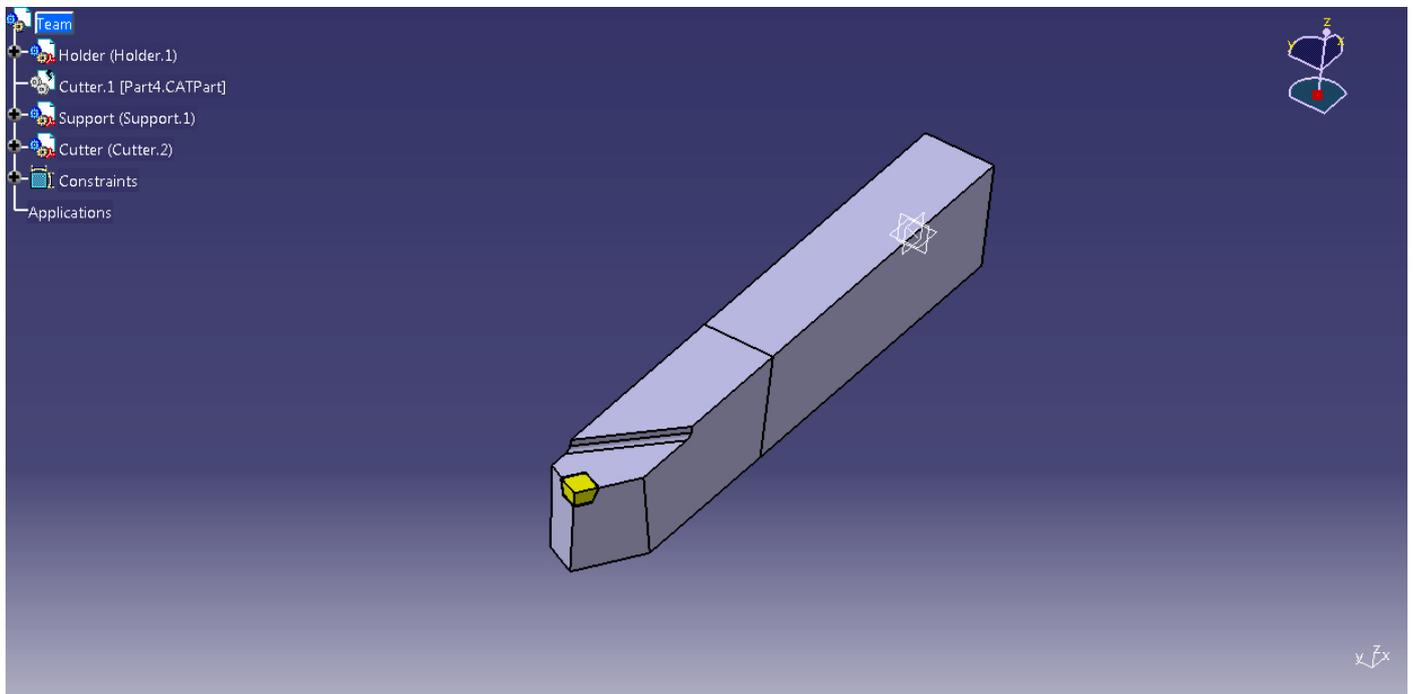


Рис. 3.1. Изометрическое изображение резца в Catia V5R17

Назначим материал резца, щелкнув правой клавишей мыши по **Материал резца не указан** в панели браузера, выберем **Материал резца**. В открывшемся окне **Редактор материалов** отметим **Материалы Catia/Другие металлы/Титан**.

Щёлкнув правой клавишей мыши в рабочей области и выбрав команду **Вращать вид**, повернём модель таким образом, чтобы была видна главная режущая кромка резца. В панели основного меню пакета выберем команду **Инструменты/ANSYS**. Нажимаем кнопку **Далее**. В разделе **Ограничение** укажем на цилиндрическую поверхность, имитирующую резцедержатель (рис. 3.2). В разделе **Нагрузка** выберем **Сила** и приложим нагрузку на переднюю и заднюю поверхности инструмента расчётными силами $N = 3570,6 \text{ Н}$ и $N_1 = 9044,4 \text{ Н}$, как показано на рис. 3.3. В следующем окне раздела **Нагрузка** введём расчётное значение силы в ньютонах. Далее следуем указаниям расчётного модуля ANSYS. Сохраним данный проект.

В разделе **Результаты** будут отображаться опасные сечения резца (рис. 3.4), распределение напряжений (рис. 3.5), распределение смещений (рис. 3.6) и деформированная форма резца (рис. 3.7). Нажав на кнопку **Выполнить**, можно запустить анимацию. Выбрав пункт **Создать отчет HTML**, результаты расчёта просматриваются как html-страницы.

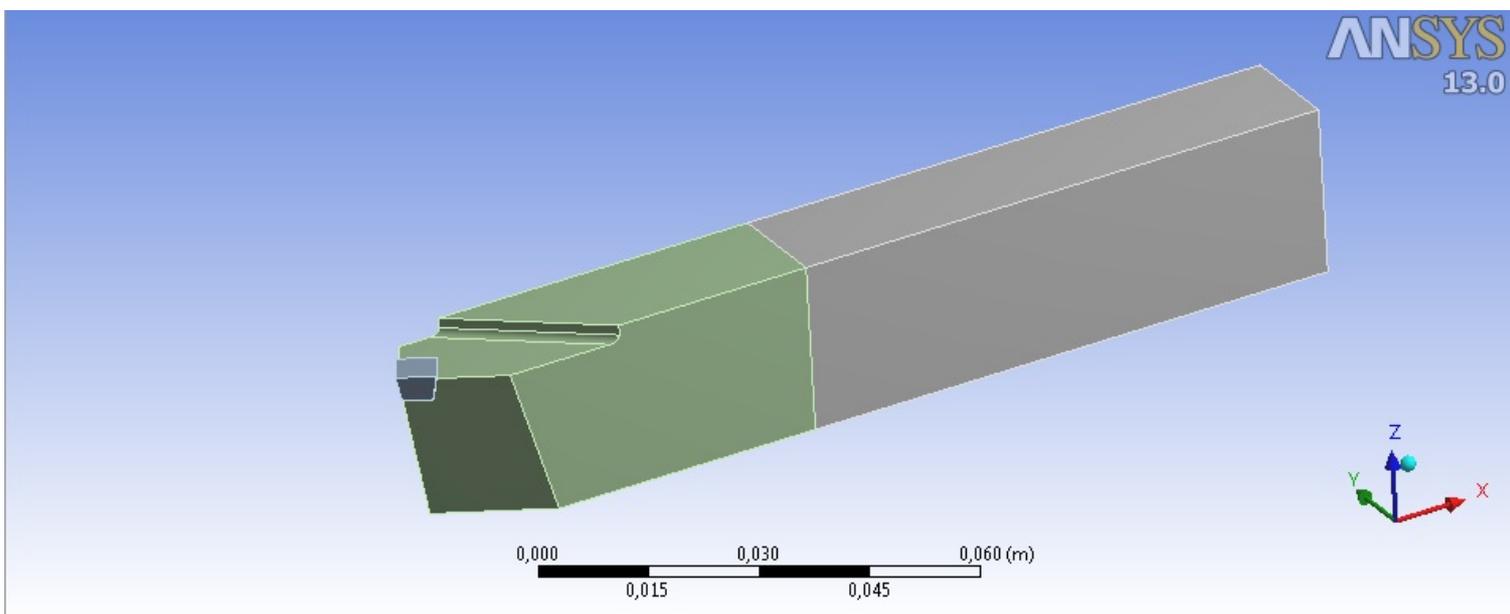


Рис. 3.2. Наложение ограничений на модель

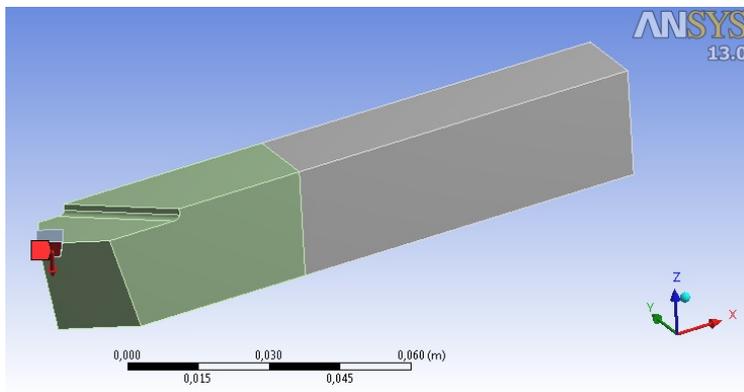


Рис. 3.3. Приложение нагрузки к режущей кромке

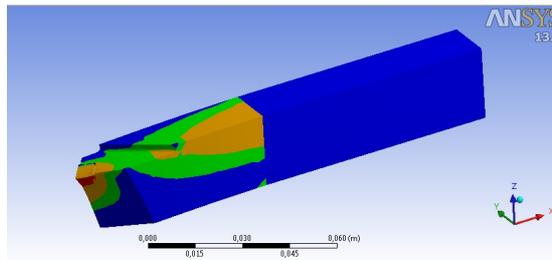


Рис. 3.4. Опасные сечения реза

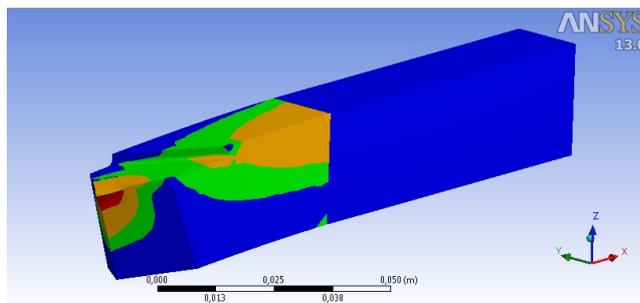


Рис. 3.5. Распределение напряжений

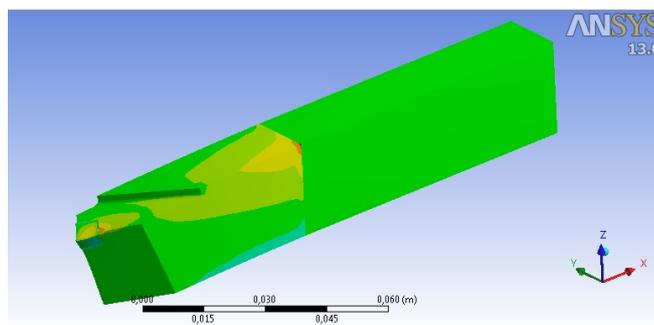


Рис. 3.6. Распределение смещений

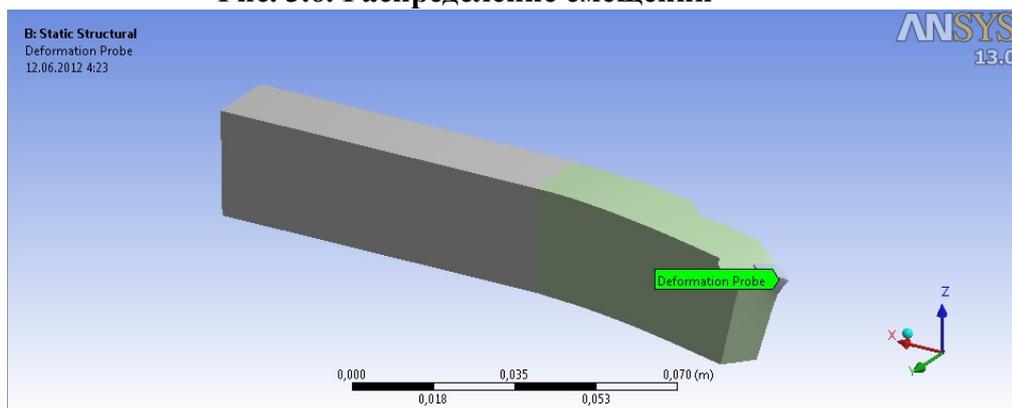


Рис. 3.7. Деформированная форма реза

3.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ ANSYS 13.0

Импортируем файл **резец проходной прямой.stp** в **ANSYS 13.0**. Вызываем команду **Файл/Новая 3D модель**, затем **Файл/ Импортировать**. Программа проведёт конвертацию расширения step (stp) в файл ANSYS 13.0. Нажимаем **Старт** и **ОК**. В результате имеем следующее окно ANSYS 13.0 (рис. 3.8).

В верхней части рабочего окна ANSYS 13.0 располагается основное меню и пиктограммы команд, слева браузер, а справа от браузера рабочая область, в которой происходит построение детали.

Развернём вкладку браузера **3D Построения/Рабочие плоскости:3** и отключим видимость плоскостей. Это можно сделать как наведением указателя мыши на имя плоскости в браузере, так и на вид плоскости в рабочем окне. Нажмём правую клавишу мыши и выберем **Погасить**. Перенесём указатель мыши на резец и, удерживая левую клавишу, развернём модель таким образом, чтобы была видна главная режущая кромка резца.

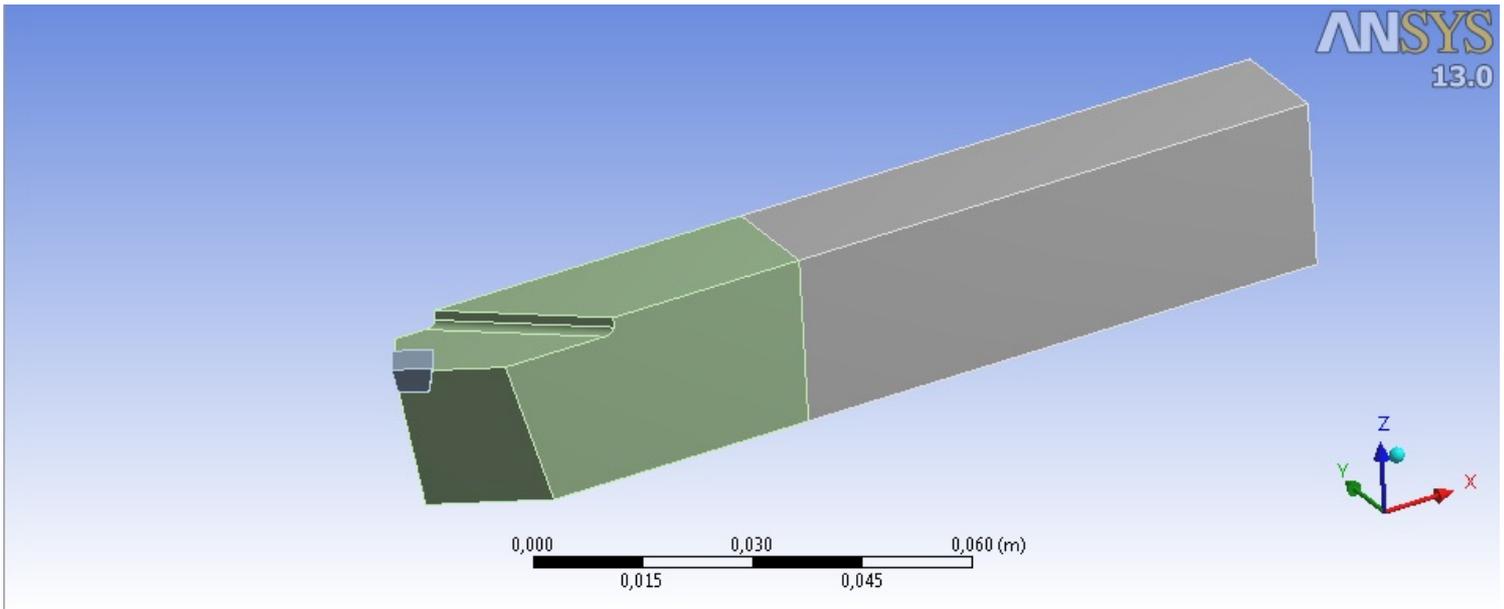


Рис. 3.8. Изометрическое изображение резца в ANSYS 13.0

В основном меню вызовем команду **Анализ/Новая задача**. Появится окно, в котором выберем **Закончить ввод <Enter>**. Установим параметры сетки как **Точнее**. Подтвердим выбор. Произойдёт генерация конечно-элементной сетки, которая будет нанесена на резец.

Назначим материал резца, вызвав команду **Анализ/Материал**, и выберем материал резца – титан.

Для моделирования нагрузок, действующих на резец, вызовем команду **Анализ/Нагружение/Сила**. В открывшемся окне (рис. 3.9) укажем величину силы в ньютонах и те грани, на которые она действует.

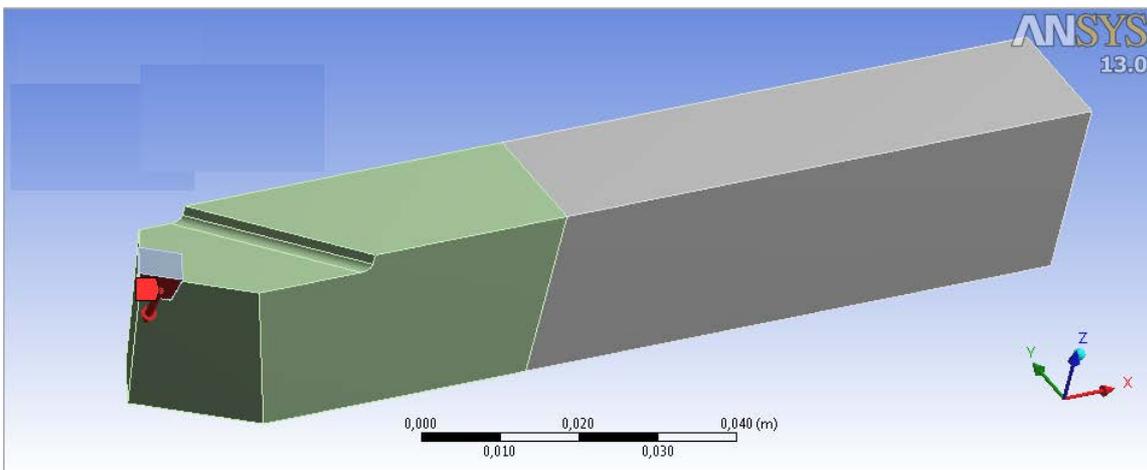


Рис. 3.9. Задание величины и направления действия силы

Определим закрепление резца, вызвав команду **Анализ/ Закрепление/Полное закрепление**. В открывшемся окне (рис. 3.10) укажем грани, образующие поверхность, имитирующую резцедержатель.

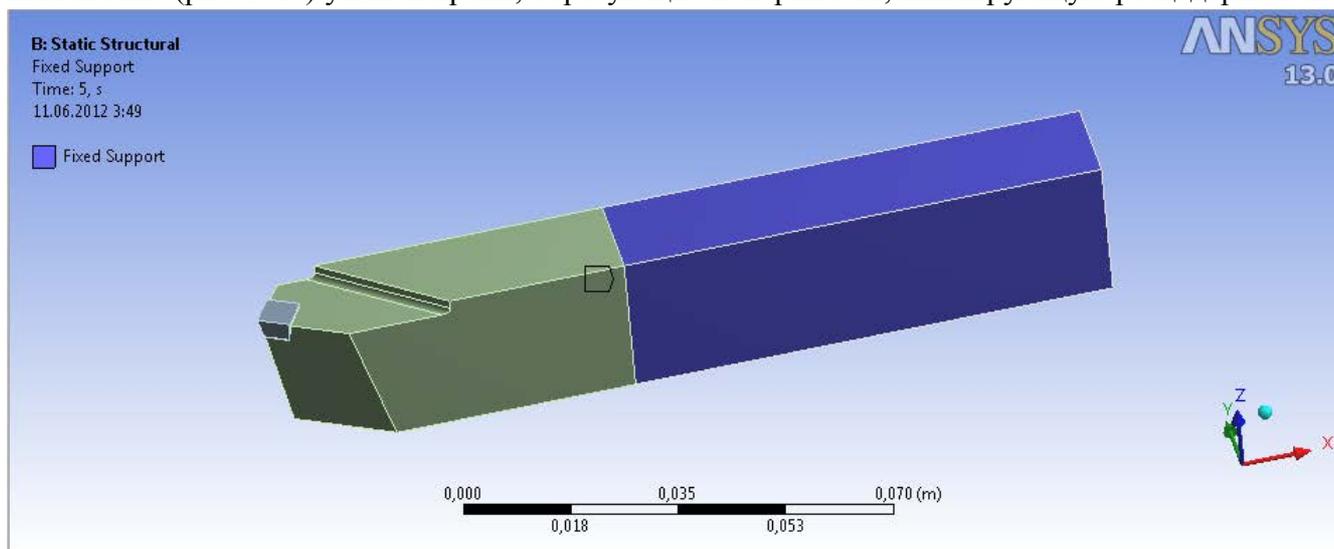


Рис. 3.10. Задание условий закрепления

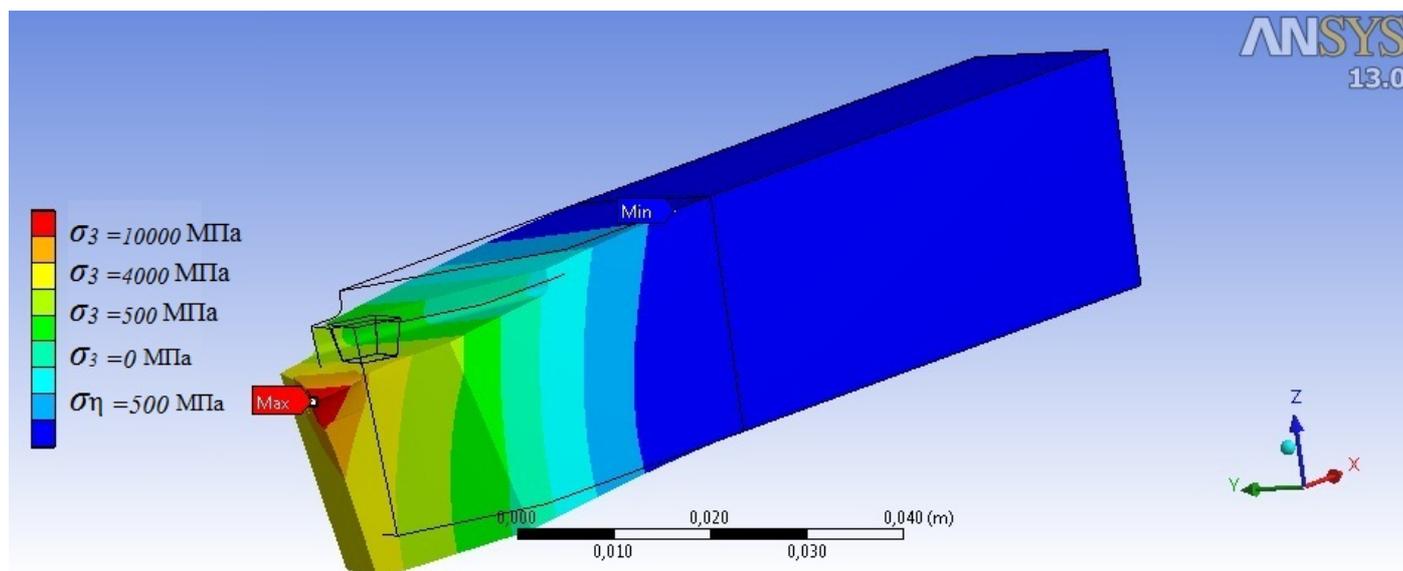


Рис. 3.11. Иллюстрация величины перемещения

Командой **Анализ/Расчет** запустим процедуру расчёта нагрузок. В окне браузера появится пункт **Результаты:3**. Развернём его и последовательно выбираем подпункты. В рабочей области будет прорисована геометрия резца с учётом нагрузок (рис. 3.11).

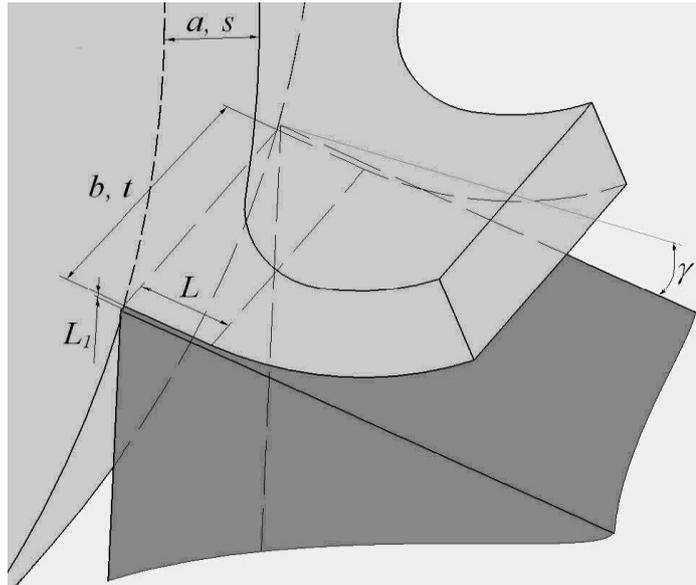
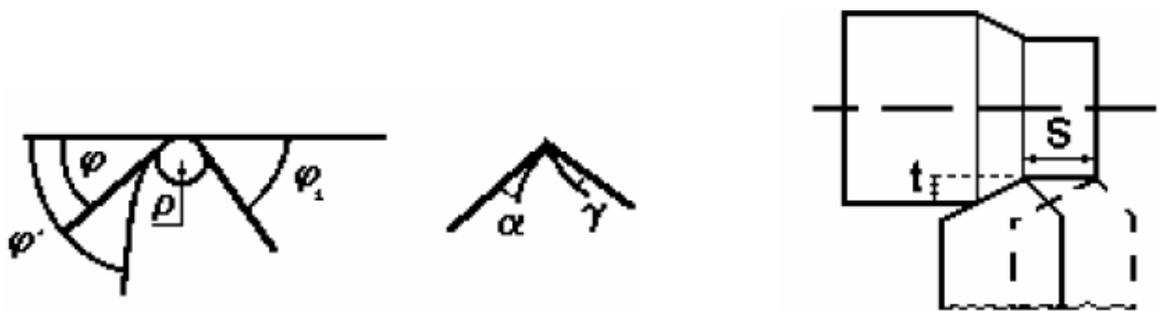


Рис. 3.12. Если поверхности резца криволинейные, то углы измеряются между соответствующими касательными к рассматриваемым поверхностям в точке режущего лезвия.



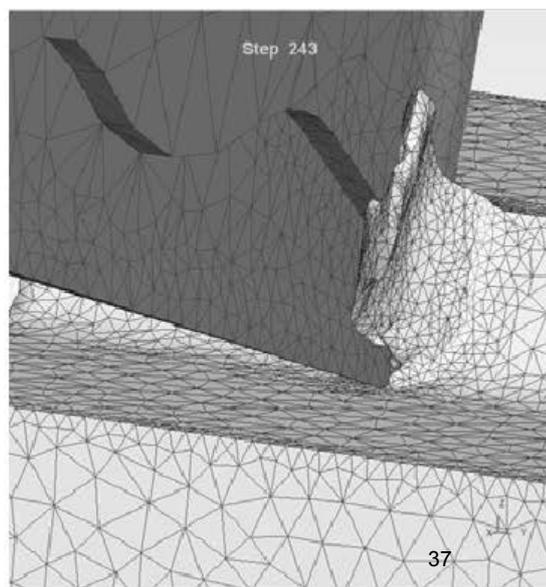
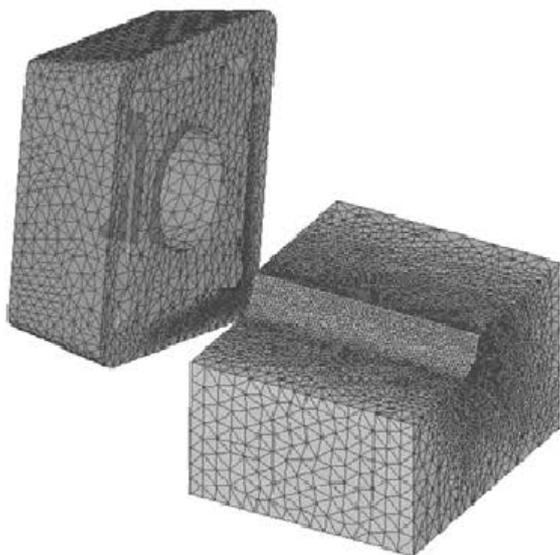
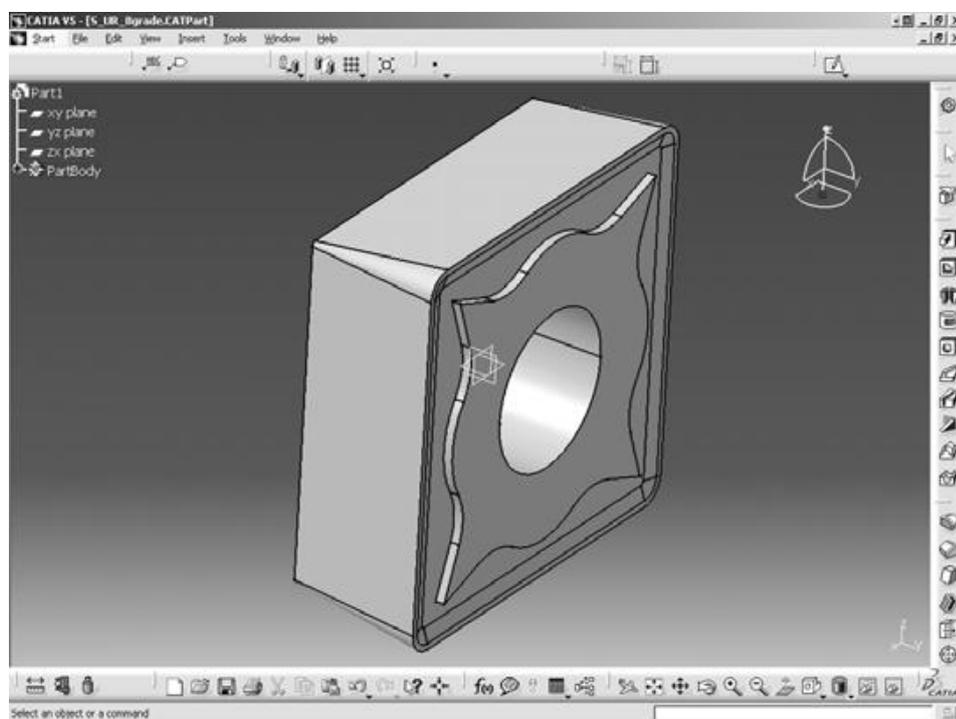
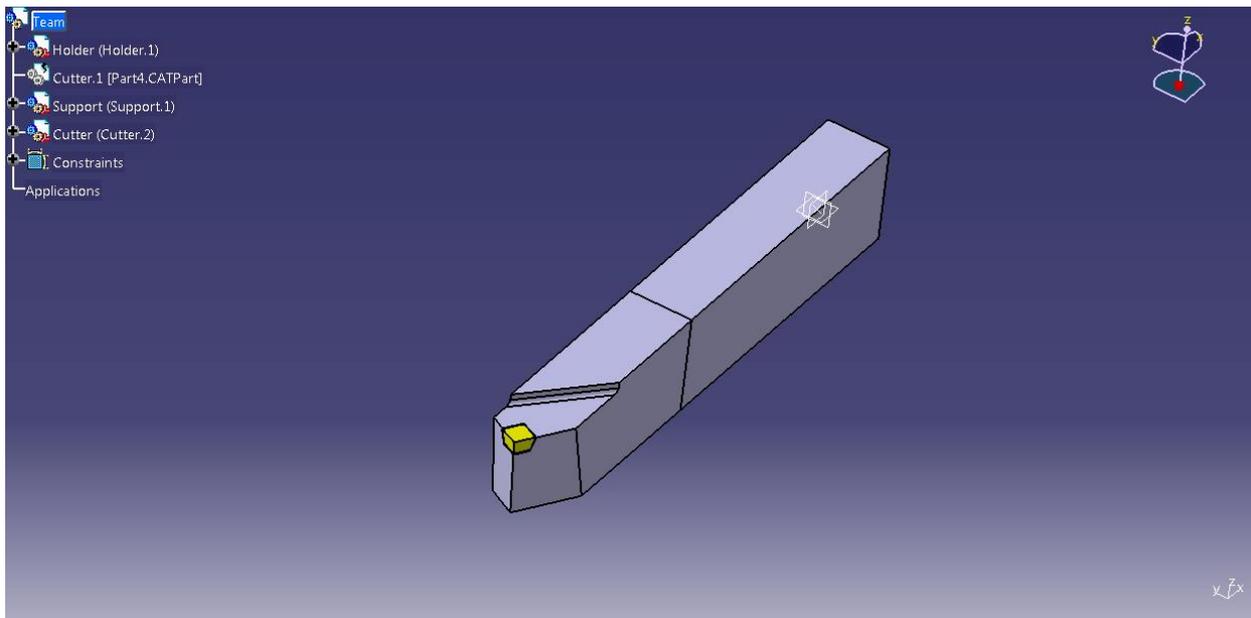
На режущем лезвии всегда предусматривают радиус скругления режущей кромки ρ (R, r – радиус при вершине) для снижения механических и силовых нагрузок на вершине резца.

Площадь срезаемого слоя $F = a \times b = t \times s$
 Величина

a — толщина срезаемого слоя, кратчайшее расстояние между двумя последними положениями режущей кромки,

b — ширина, то есть длина стороны сечения срезаемого слоя образованного главной режущей кромкой инструмента.

4. Расчет на прочность изделий сложной формы методом конечных элементов



4.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ РЕЖУЩЕГО КЛИНА ПРИ ОБРАБОТКЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТЗ-1

Прочность инструмента оценивается сопоставлением напряжений, возникающих в режущем клине при резании, с предельно допустимыми для данного инструментального материала. Комплексные исследования прочности режущей части инструмента были проведены А.А.Аваковым, А.И.Бетанели, Т.Н.Лоладзе, В.А.Остафьевым, Г.Л.Хаетом и многими другими исследователями. Исследования процесса хрупкого разрушения показали, что при этом происходит зарождение и накопление микротрещин, которые затем сливаются в одну макротрещину [16]. Эта трещина и становится поверхностью раздела с характерным кристаллическим изломом. Наиболее вероятными местами появления микротрещин обычно являются зоны с наибольшими внутренними напряжениями, однако в некоторых случаях (например, всестороннее сжатие) могут быть и отступления от этого правила.

Наибольшее распространение получили численные методы, особенно метод конечных элементов [16]. Это связано и с большей точностью расчета, и с наличием готовых универсальных программ для его реализации.

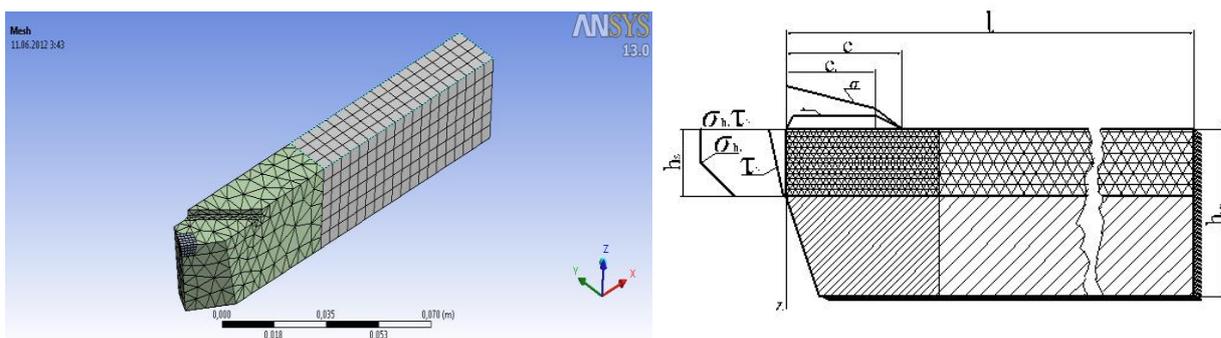


Рис. 4.1 Исходная схема расчёта напряжённно-деформированного состояния режущего клина изношенного инструмента

Сущность метода конечных элементов (МКЭ) заключается в том, что рассматриваемая область разбивается на большое число отдельных элементов простой геометрической формы, связанных в узловых точках налагаемыми связями. Каждому элементу предписываются конкретные свойства, неизменные внутри каждого элемента. На узлы, являющимися общими для выделенного элемента и остальным телом инструмента, налагаются необходимые связи. К элементам рабочих поверхностей прикладываются контактные нагрузки, после чего определяются деформации и напряжения в каждом элементе.

Методика расчета МКЭ и экспериментальная проверка получаемых результатов подробно приводятся в работе В.А.Остафьева [16] и в работах, выполненных под его руководством, поэтому отметим лишь особенности принятия исходных данных.

Для расчета напряженно-деформированного состояния режущего клина нами была использована программа "Ansys". Величина контактных нагрузок на рабочих

поверхностях реза определялась методом разрезного реза с учетом экспериментально найденных нами сил на передней поверхности. Определение длины контакта на передней поверхности инструмента производилось на большом инструментальном микроскопе.

Режущий клин разбивался на 500...636 прямоугольных и треугольных элементов (в зависимости от геометрии режущего клина). Схема разбивки, выбранная система координат и характер наложенных связей на опорные узлы приведены на рис. 4.1. Количество конечных элементов, находящихся под нагрузкой на передней поверхности, менялось в зависимости от условий резания от 11 до 16. Расчет производился на персональном компьютере. Количество конечных элементов ограничено возможностями компьютера.

При слишком большом числе элементов возрастает трудоемкость описания исходных данных, время счета и вероятность сбоя компьютера. В то же время размеры элементов должны быть достаточно малы с целью увеличения точности расчета и разрешающей способности. Поэтому было решено ограничиться расчетом небольшой области режущего клина вблизи режущей кромки: $l = 2$ мм, $h_{расч} = 6$ мм

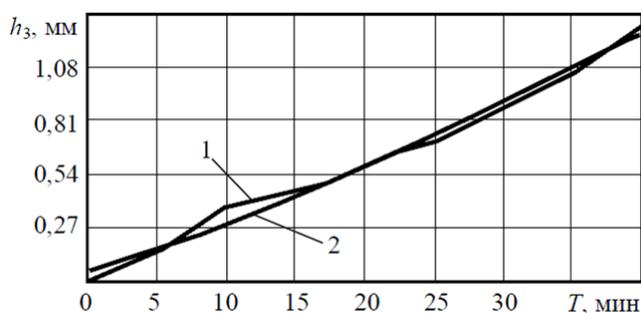
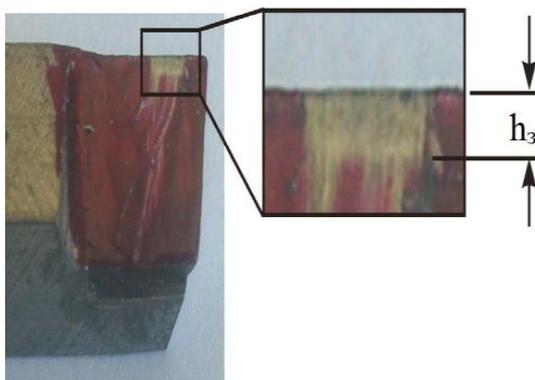


График зависимости роста фаски износа от времени.
1 — экспериментальные данные, 2 — расчет

4.2 ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНЫХ НАГРУЗОК НА ЗАДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ИНСТРУМЕНТА

Силы на задней поверхности инструмента интересовали многих исследователей как в нашей стране, так и за рубежом. Объясняется это актуальностью проблемы увеличения стойкости и прочности режущего инструмента, поскольку именно износ по задней поверхности и возникающие при этом нагрузки и повышение температуры в большинстве случаев приводят к выходу инструмента из строя. Томская школа резания внесла особый вклад в изучение природы возникновения сил на задней поверхности и их распределении на фаске износа.

Розенберг А.М. в 40-х годах разработал методику выделения сил на задней поверхности, заключающуюся в экстраполяции сил на нулевую толщину среза при постоянной температуре резания [16].

Его ученик, ставший впоследствии член-корреспондентом АН СССР, Зорев Н.Н. предложил другие методики выделения сил на задней поверхности: экстраполяция на нулевую фаску износа, подбора переднего угла и косоугольного резания [17]. Первая из них нашла широкое распространение из-за простоты подготовки и проведения экспериментов и малого влияния на процессы, происходящие на передней поверхности и в области стружкообразования.

В 50-х годах Байкаловым А.К. под руководством Розенберга А.М. были проведены исследования сил резания и их изменения в процессе износа при обработке серого чугуна [19]. Был выявлен ряд закономерностей по влиянию скорости резания, подачи и износа на силы на задней поверхности. В это же время Розенбергом Ю.А. проводились исследования по фрезерованию серого чугуна, в которых большое внимание уделялось силам на задней поверхности. Куфарев Г.Л., Окенов К.Б., Говорухин В.А., Гольдшмидт М.Г. исследовали напряженно-деформированное состояние в области стружкообразования, его влияние на контактные процессы на передней поверхности резца, затрагивались вопросы изменений на поверхности среза, вступающего в контакт с задней поверхностью инструмента.

Влиянию различных факторов на силы задней поверхности (влияние твердости обрабатываемого материала, степени пластической деформации, средства инструментального и обрабатываемого материалов, смазочно-охлаждающей жидкости и др.) были посвящены исследования ученика Розенберга А.М. Полетики М.Ф. Под его руководством Мелиховым В.В. в 60-х годах с помощью поляризационно-оптического метода были проведены исследования распределения контактных нагрузок на задней поверхности резца [21].

В 60-х годах Наумов В.А. исследовал закономерности износа резцов при обработке титановых сплавов, в которых показал наличие отрицательных задних углов на фаске износа задней поверхности, выявил влияние износа на силы резания [22]. Работы в этом направлении были продолжены Афонасовым А.И. и Сбоевым В.Н. Под руководством Полетики М.Ф. и непосредственном его участии в 70-х годах были продолжены исследования по выявлению положения поверхности среза на остром резце и при округлении режущей кромки, величины упругой и пластической деформации под фаской износа задней поверхности [24].

В 60-х годах Полетикой М.Ф. и Красильниковым В.А. специально для реализации метода разрезного резца был спроектирован и создан уникальный четырехкомпонентный динамометр. Под руководством Полетики М.Ф. в 70-80-х годах Красильниковым В.А. и позже Бутенко В.А. с помощью метода разрезного резца были проведены исследования по распределению контактных нагрузок на передней поверхности инструмента при высоких скоростях резания [25], [26]. В 80-х годах этот метод и динамометр были использованы для исследования распределения контактных нагрузок на фаске износа задней поверхности [26], [28].

В результате проведенных исследований было установлено, что с повышением усадки стружки силы на задней поверхности растут, но соответствующие кривые располагаются в порядке возрастания твердости обрабатываемого материала (рис. 4.2). В зависимости от степени пластической деформации в зоне стружкообразования изменяется и величина нормальных напряжений на плоскости сдвига, что влияет на величину упругой деформации слоя обрабатываемого материала, входящего в контакт с задней поверхностью.

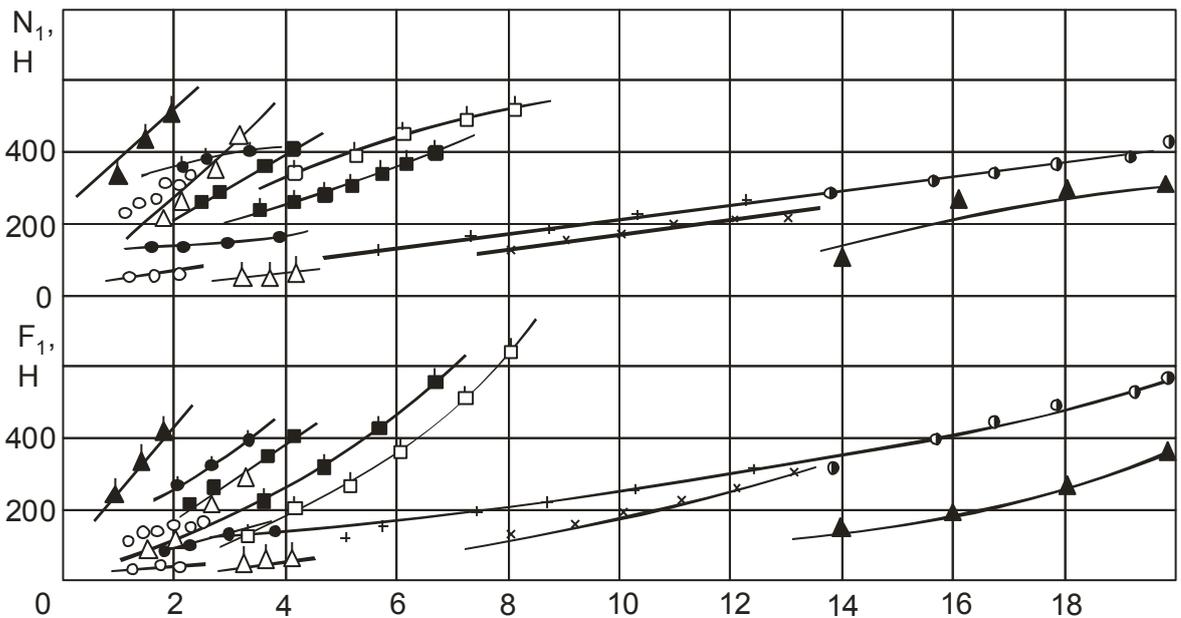


Рис. 4.2 Влияние продольной усадки стружки ξ на нормальную N_1 и касательную F_1 силы задней поверхности [18].

С понижением коэффициента трения нормальная сила на задней поверхности значительно возрастает [17]. При этом условный (средний) коэффициент трения на передней и задней поверхностях могут различаться в связи с различным соотношением длины пластического и упругого контакта. На наш взгляд решающее влияние на силы задней поверхности оказывает коэффициент трения на передней поверхности. Это влечет за собой изменение угла действия, а значит и нормальных нагрузок на поверхности среза и ее упругого восстановления.

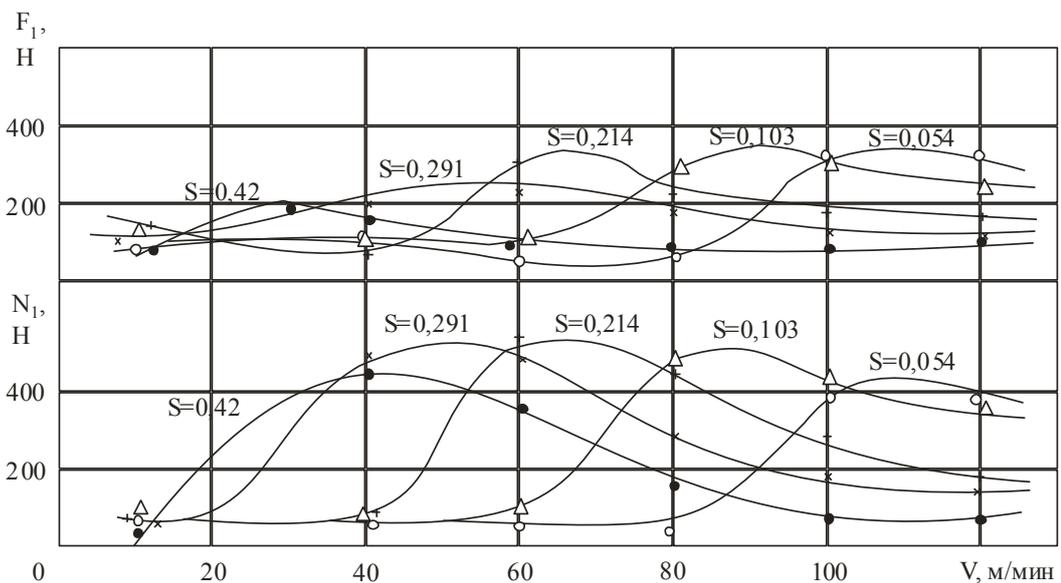


Рис. 4.3 Влияние скорости резания на силы задней поверхности при точении чугуна [19].

Воздействие скорости резания проявляется в основном косвенно, через изменение температуры контактных поверхностей инструмента и в зоне стружкообразования, что приводит к изменению величины угла действия. В работе [17] показано отсутствие влияния скорости резания на силы при постоянном угле действия.

В работе [21] поляризационно-оптическим методом было получено распределение контактных нагрузок на задней поверхности резца при свободном строгании свинцовой пластины. Если эпюры, полученные Мелиховым В.В. представить так, чтобы по оси абсцисс были отложены не безразмерные величины, а линейные, то видно отсутствие влияния фаски задней поверхности на эпюры контактных нагрузок. Увеличение переднего угла приводит к уменьшению контактных нагрузок, что связано, по мнению автора, с изменением угла действия. По этой же причине происходит уменьшение контактных нагрузок при резании со смазкой.

В работе [23] при исследовании распределения контактных нагрузок методом разрезного резца при строгании латуни Л63 отмечается незначительное уменьшение контактных нагрузок при введении смазки.

В целях выяснения причин расхождения экспериментальных данных в исследованиях, проведенными разными авторами, нами были проведены опыты по свободному точению дисков из разных обрабатываемых материалов с использованием разрезного резца [28]. Было выяснено, что характер стружкообразования влияет на вид эпюр контактных нагрузок на задней поверхности: при сливной стружке (обрабатываемый материал латунь Л63) наибольшая величина контактных нагрузок отстоит от режущей кромки, а при элементной (обрабатываемый материал латунь ЛМЦА 57-3-1) – находится непосредственно у режущей кромки (рис. 4.4).

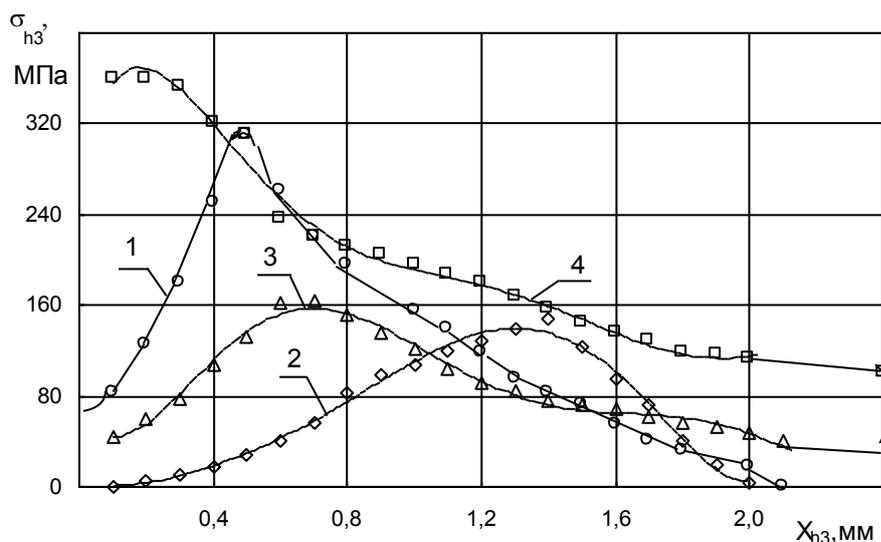


Рис. 4.4 Распределение нормальных контактных нагрузок на фаске задней поверхности инструмента, $\gamma=0^0$, $\alpha_\phi=0^0$. Л63-Р6М5: 1 - $S=0,06$ мм/об, $V=100$ м/мин; 2 – $S=0,21$ мм/об, $V=100$ м/мин; 3 – $S=0,21$ мм/об, $V=217$ м/мин. 4 - ЛМЦА 57-3-1 – Р6М5, $S=0,41$ мм/об, $V=100$ м/мин.

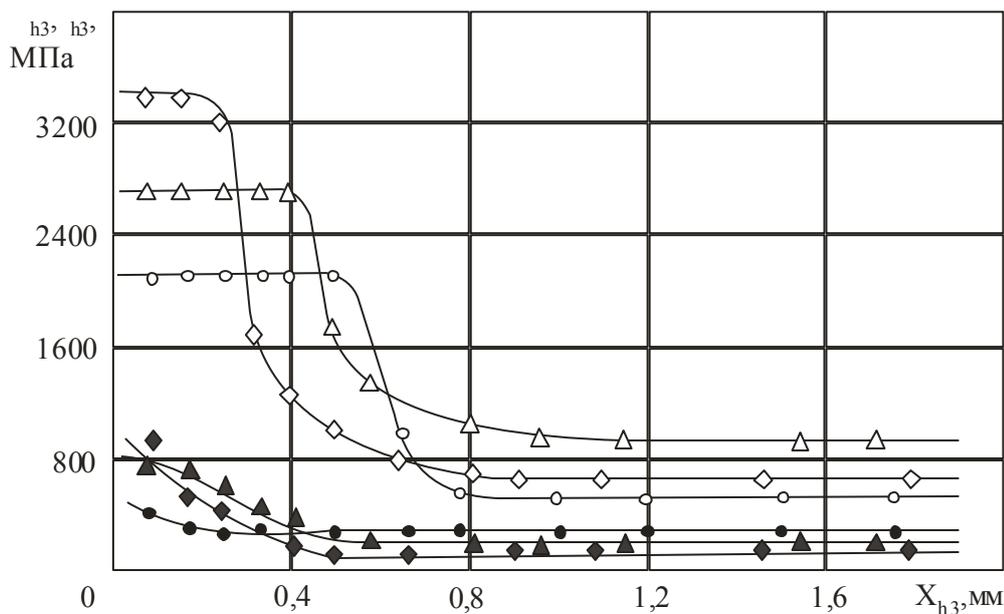
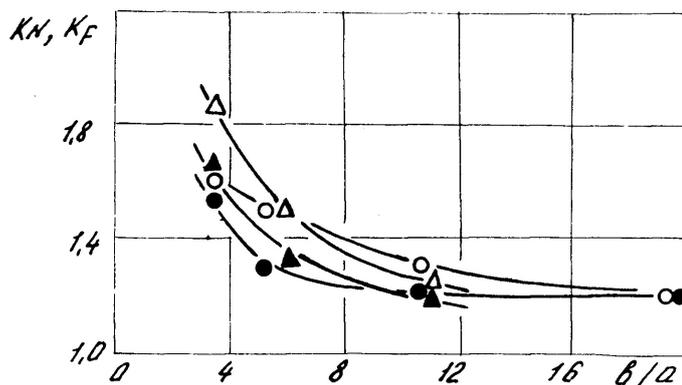


Рис. 4.5 Распределение нормальных (\diamond, Δ, \circ) и касательных ($\blacklozenge, \blacktriangle, \bullet$) контактных нагрузок на фаске задней поверхности инструмента при резании титанового сплава. ВТ3-1 - ВК8, $\gamma=0^0, \alpha_\phi=0^0, V=60$ м/мин.: \diamond, \blacklozenge - $S=0,41$ мм/об.; Δ, \blacktriangle - $S=0,21$ мм/об.; \circ, \bullet - $S=0,11$ мм/об.

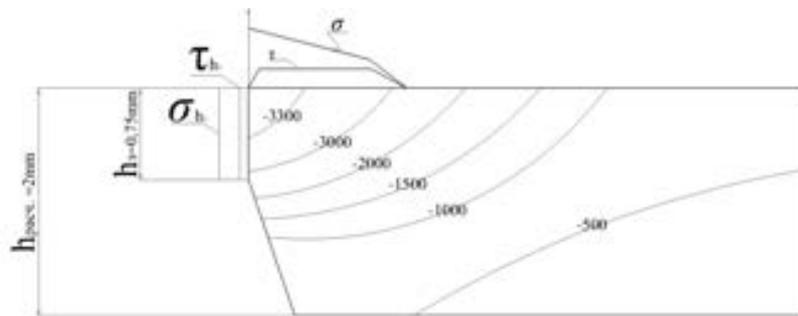
Влияние характера стружкообразования проявляется при резании титанового сплава ВТ3-1, дающего элементную стружку (рис. 4.5).



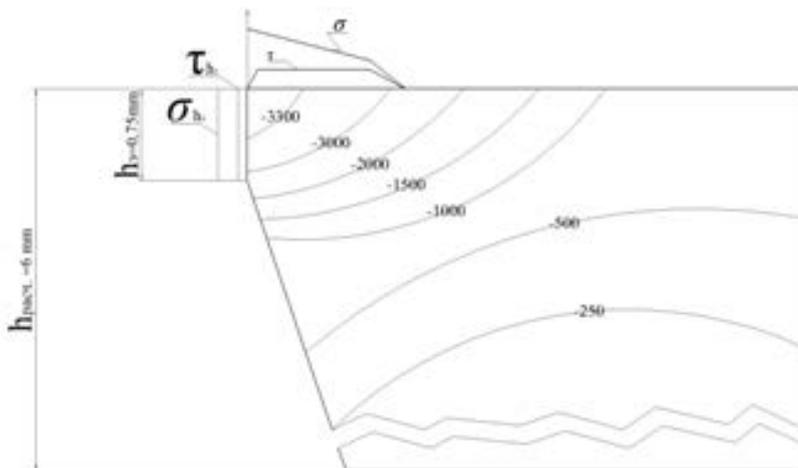
Влияние отношения ширины среза b к толщине a на неравномерность распределения контактных нагрузок; \circ, \bullet - латунь Л63; Δ, \blacktriangle - титановый сплав ВТ1-0; \circ, Δ - K_N ; \bullet, \blacktriangle - K_F

Контактные нагрузки распределены неравномерно не только по нормали к режущей кромке, но и вдоль неё. Поэтому необходимо давать поправку на неравномерность распределения контактных нагрузок вдоль режущей кромки. В работе В.А. Бутенко [26] приведены зависимости поправочных коэффициентов для контактных нагрузок на передней поверхности, определяемых как отношение наибольшей величины контактного напряжения к её среднему значению в сечении, параллельном режущей кромке. Для расчета напряженно-деформированного состояния режущего клина нами была использована программа "Лира", разработанная в НИИ АСС Госстроя УССР. Так как в данной работе не определялось распределение контактных нагрузок на передней поверхности, то для их оценки были использованы результаты работ. Величина напряжений была скорректирована с учетом найденных нами экспериментально сил на передней поверхности, определенных в данной работе. Определение длины контакта на передней поверхности инструмента производилось на большом инструментальном микроскопе.

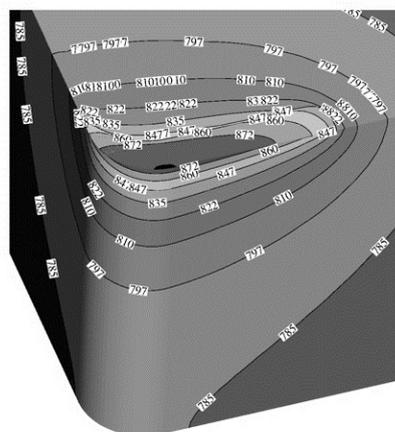
С целью проверки влияния размеров расчетной области на величину и распределение напряжений, был произведен расчет при одних и тех же граничных условиях и размерах конечных элементов, но с трехкратной разницей в различной величине $h_{расч} = 0,54$ мм и $h_{расч} = 1,44$ мм. Выяснилось, что разница мало влияет на распределение напряжений (рис. 4.6, а, б, в).



(а)



(б)



(в)

Рис. 4.6. Распределение главного напряжения σ_3 , МПа, при различной толщине расчётной зоны $h_{расч}$. ВТЗ-1 – ВК8, $\gamma=0^\circ$, $V=60$ м/мин, $S=0,21$ м/об.

Установив при расчете МКЭ величину напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$, а по ним и величину главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, действующих в режущей части инструмента, можно оценить запас его прочности. Для этого необходимо выбрать определенный критерий прочности. В настоящее время широко используется критерий предельного состояния, разработанный в институте проблем прочности АН УССР Г.С. Писаренко и А.А. Лебедевым [29]. Основанный на современных представлениях о кинетике деформирования и разрушения материалов, критерий Писаренко-Лебедева обладает высокой достоверностью (выше 92%) и описывается следующим выражением:

$$\sigma_\eta = \chi \times \sigma_t + (1 - \chi) \times \sigma_1 \times p \leq \sigma_\epsilon, \quad (4.1)$$

где: $\chi = \sigma_\epsilon / \sigma_{-\epsilon}$ - константа материала при заданных условиях работы - её величина характеризует степень участия в микроразрушении сдвиговой деформации, создающей благоприятные условия для разрыхления материала и образования трещин; $\sigma_\epsilon, \sigma_{-\epsilon}$ - величины предельного сопротивления материала при одноосном растяжении и сжатии; σ_t - интенсивность напряжений в рассматриваемой точке:

$$\sigma_t = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2};$$

$p = A^{1-j}$, здесь - A - константа материала, отражающая характер имеющихся в материале дефектов и размеры тела, т.е. отражающая статистическую сущность процесса разрушения;

$j = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / \sigma_t$, - параметр напряженного состояния, имеющий смысл жесткости нагружения.

Учитывая изменчивость свойств инструментальных материалов с ростом температуры, В.А. Остафьев [30] рекомендует следующие критерии предельного состояния для сплавов группы WC-Co, когда температура $\theta < 870$ К:

$$\sigma_\eta = 0,24 \cdot \sigma_1 + 0,76 \cdot \sigma_1 \cdot 0,8 \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_1} \leq \sigma_\epsilon; \quad (4.2)$$

Запас прочности инструментального материала:

$$n = \sigma_\epsilon / \sigma_\eta. \quad (4.3)$$

Для твердого сплава ВК8 с размером зерна от 1 до 2 мкм пределы прочности: при растяжении $\sigma_\epsilon = 780$ МПа, при сжатии $\sigma_{-\epsilon} = 4200$ МПа [4.2].

Критерий Писаренко-Лебедева имеет высокую достоверность в тех случаях, когда разрушение материала происходит от растягивающих напряжений. В областях сжимающих напряжений его применение не предусмотрено.

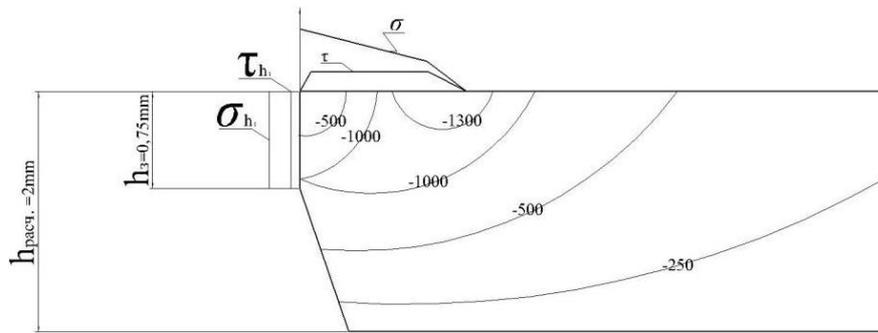


Рис.4.7 Распределение главного касательного напряжения τ_{max} , МПа, в режущем клине при износе инструмента по задней поверхности $h_3=2$ мм.
 ВТЗ-1 –ВК8, $\gamma=0^\circ$, $V=60$ м\мин, $S=0,21$ м\об.

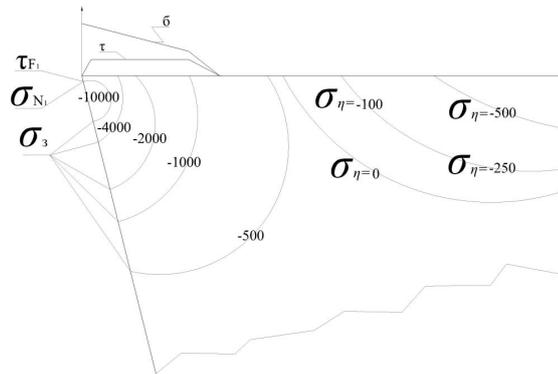


Рис. 4.8 Распределение главного напряжения σ_3 и критерия σ_η , МПа, в острозаточенном клине.
 ВТЗ-1 – ВК8, $\gamma=0^\circ$, $V=60$ м\мин, $S=0,21$ м\об.

Анализ напряженного состояния режущего клина показывает, что при обработке титанового сплава ВТЗ-1, сопровождающейся: значительным износом по главной задней поверхности, в области режущей кромки в большинстве случаев возникают напряжения сжатия, растягивающие напряжения отсутствуют. В связи с этим необходимо использовать критерий, удовлетворительно описывающий предельное состояние хрупкого материала при действии сжимающих напряжений. В соответствии с рекомендациями в области сжимающих напряжений был использован критерий первой теории прочности, т.е. наибольшее по абсолютной величине главное напряжение сравнивалось с пределом прочности твердого сплава на сжатие. (рис. 4.8) В отдельных случаях прочность инструмента дополнительно оценивалась и по максимальным касательным напряжениям (рис. 4.7).

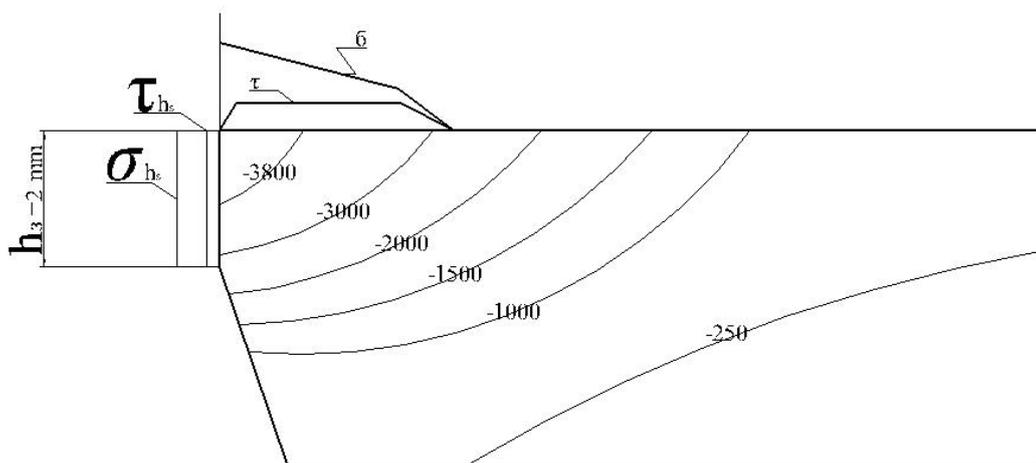


Рис. 4.9 Распределение главного напряжения σ_3 , МПа, в режущем клине при искусственной фаске износа по задней поверхности $h_3 = 2$ мм;
 ВТЗ-1 - ВК8, $\gamma=0^\circ$, $v = 60$ м/мин, $s = 0,41$ мм/об

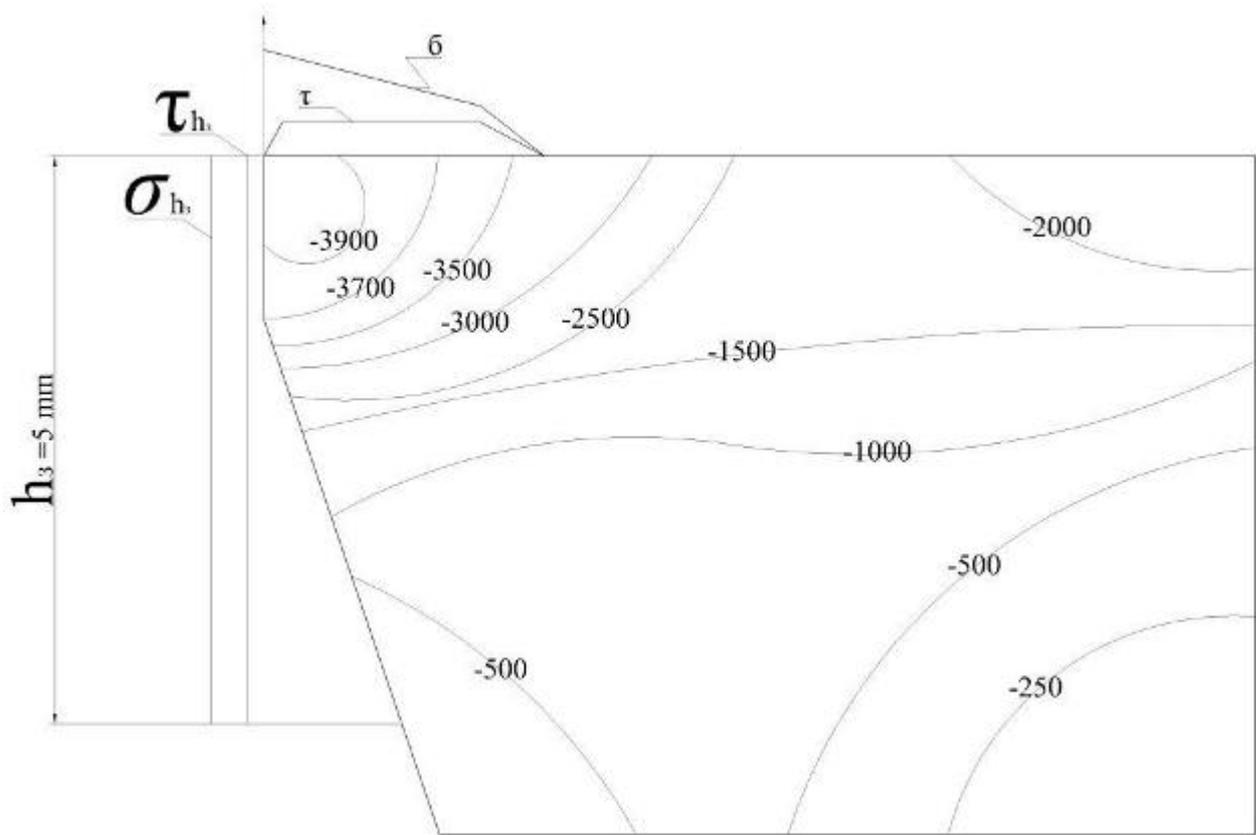


Рис. 4.10 Распределение главного напряжения σ_3 , МПа, в режущем клине при искусственной фаске износа по задней поверхности $h_3 = 1,44$ мм;
 BT3-1 - BK8, $\gamma = 0^\circ$, $v = 60$ м/мин, $s = 0,41$ мм/об

При обработке титанового сплава BT3-1 острозаточенным инструментом с нулевым передним углом на задней поверхности у режущей кромки появляется зона, в которой сжимающие напряжения превышают предельно допустимые, в результате чего в момент врезания и происходит выкрашивание режущей кромки (рис. 4.11). На передней поверхности на расстоянии более $1,5$ длин контакта стружки с инструментом ($1,5s$) от режущей кромки появляются напряжения растяжения, наибольшая величина которых достигает $\sigma_\eta = 500$ МПа на расстоянии $4s$.

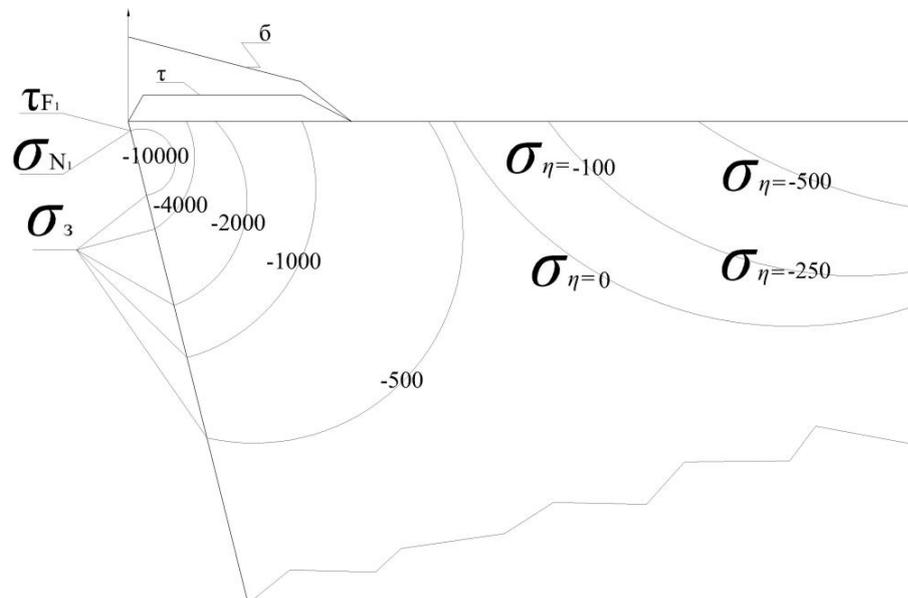


Рис. 4.11 Распределение эквивалентного σ_η и главного напряжения σ_3 , МПа, в режущем клине острозаточенного резца;
 BT3-1 - BK8, $\gamma = 0^\circ$, $v = 60$ м/мин, $s = 0,21$ мм/об

Таким образом, на передней поверхности имеется опасная зона, где σ_{η} приближается к предельно допустимому значению ($\sigma_{\sigma} = 780$ МПа). В области режущей кромки расположение линий равных σ_3 . Примерно совпадает с линиями поверхности раздела при выкрашивании и сколах твердосплавного инструмента.

При появлении фаски износа на задней поверхности зона с предельно допустимыми значениями σ_3 на задней поверхности исчезает (рис. 4.6). Наибольшее значение главного напряжения по абсолютной величине не превышает 3400 МПа у режущей кромки, что на практике косвенно подтверждается уменьшением вероятности выкрашивания при появлении фаски. В то же время увеличивается зона со средними значениями напряжений ($1000 \text{ МПа} < |\sigma_3| < 3000 \text{ МПа}$), что говорит об увеличении вероятности скола, поскольку возрастает вероятность попадания в этой области различных дефектов твердого сплава - потенциальных очагов зарождения микротрещин.

Растягивающие напряжения в рассчитываемой области режущего клина отсутствуют.

Рассматривая уменьшение сжимающих напряжений на задней поверхности и исчезновение растягивающих на передней при небольшой фаске на задней поверхности, необходимо разделять пути её появления в целях правильной оценки ее влияния на прочность инструмента. В том случае, если фаска на задней поверхности появляется в результате выкрашивания режущей кромки, то при этом в месте её образования появляются и микротрещины, которые являются концентраторами напряжений и существенно увеличивают вероятность дальнейшего выкрашивания режущей кромки, несмотря на уменьшение расчетных напряжений.

При расчете не учитывалось появление микротрещин на фаске задней поверхности, т.е. геометрия клина моделировалась заточкой фаски без образования концентраторов напряжения. Поэтому для уменьшения напряжений необходимо притуплять режущую кромку заточкой фаски по задней поверхности величиной 0,05...0,2 мм.

При дальнейшем увеличении фаски износа на задней поверхности ($h_3 > 0,75$ мм) происходит незначительное увеличение напряжений вблизи режущей кромки (рис. 4.8). Увеличиваются размеры области со средними значениями напряжений, что приводит к росту вероятности попадания в ней дефектов твердого сплава.

С ростом подачи ($a = s = 0,41$ мм/об) происходит увеличение областей с $|\sigma_3| > 1000$ МПа (рис. 4.9). Области с меньшими значениями напряжений практически не изменяются. Увеличение наибольших значений σ_3 незначительно: на 15 % при увеличении подачи в 2 раза (с 0,21 мм/об до 0,41 мм/об) (рис. 4.7, 4.9). Рост ширины фаски на задней поверхности более значительно влияет на увеличение областей с $|\sigma_3| > 1000$ МПа, чем увеличение подачи (рис. 4.10).

В случае износа, сопровождающегося появлением округления режущей кромки ρ и фаски на задней поверхности h_3 , в области последней появляются растягивающие напряжения, превышающие предельно допустимые (рис. 4.12). Конфигурация линий наибольших напряжений σ_{η} позволяет объяснить появление отрицательных задних углов наклона фаски при износе твердосплавного инструмента, который протекает в следующей последовательности: появление небольшой фаски с нулевым углом наклона на задней поверхности, округление режущей кромки, и, затем, перерастание нулевого угла наклона фаски в отрицательный.

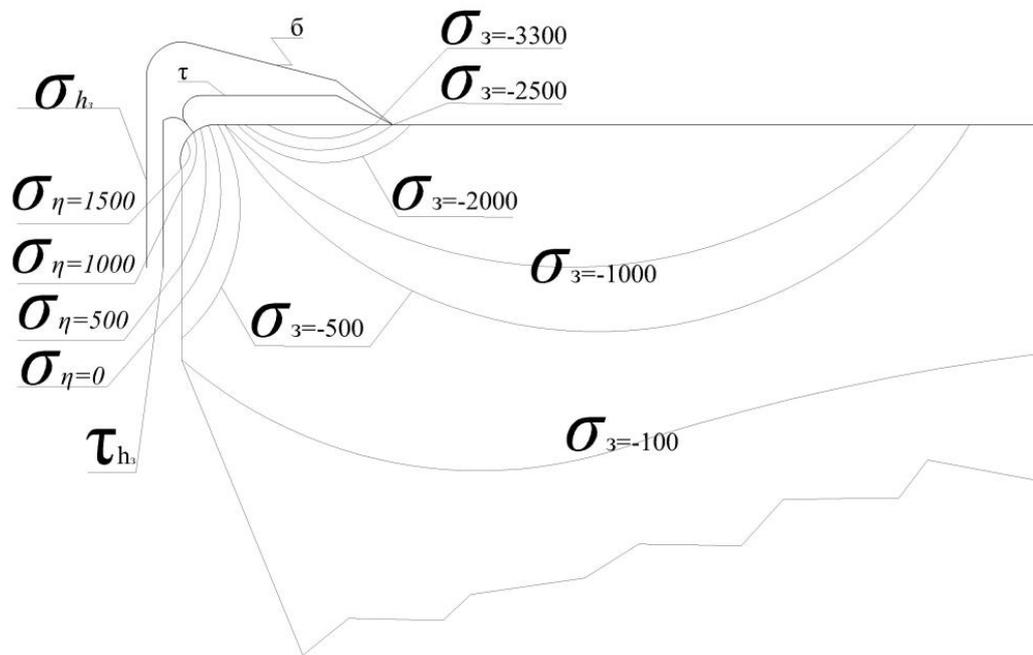


Рис. 4.12 Распределение эквивалентного σ_{η} и главного напряжения σ_3 , МПа, в режущем клине резца при искусственном округлении режущей кромки; ВТ3-1 – ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $\rho = 0,07\text{мм}$, $v = 60$ м/мин, $s = 0,21$ мм/об, $h_3 = 0,24$ мм;

Сжимающие напряжения по абсолютной величине не превышают 3400 МПа и их распределение коренным образом отличается от распределения при наличии только фаски на задней поверхности.

Распределение температуры в режущем клине представлено на рис. 4.13. Можно отметить повышение температуры до 1000°C при существенном износе по задней поверхности. Такое высокое значение температуры на контактных поверхностях способно существенно уменьшить предел прочности на сдвиг, что и объясняет малое значение касательных контактных нагрузок.

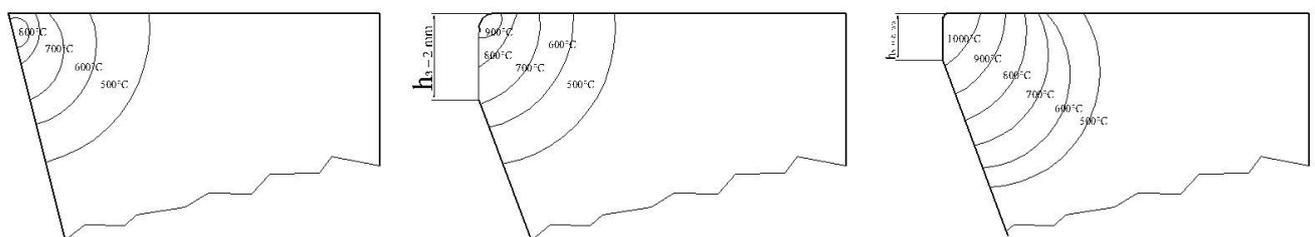


Рис. 4.13 Распределение температуры в режущем клине при резиний диска.

$h_3 = 0,75$ мм; $\rho = 0,35$ мм ; $h_3 = 2$ мм; $\rho = 0,07$ мм

ВТ3-1 - ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $v = 60$ м/мин.

$S = 0,21$ мм/об

4.3. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В СТРУЖКЕ

В этой части исследования, распределение напряжения, скорости деформации, напряжения и температуры в зоне деформации, которые трудно измерить экспериментально, не предлагается. При анализе сетка часть работы состоит из 4938 узлов и 4792 четырехугольник изо-параметрических элементов. Все параметры, собранные после устойчивое состояние, в котором 3 мм инструмент инсульта достигла уникальной. Анализ проводится с предыдущими работами как 0° передний угол. Распределение температуры в заготовке, чип и инструменте показано на рисунке. Максимальная температура находится на вторичной зоны сдвига за счет трения между чипом и передней поверхности этого инструмента. Самая высокая температура, достигнутые в инструмент чуть выше всплывающей подкаске.

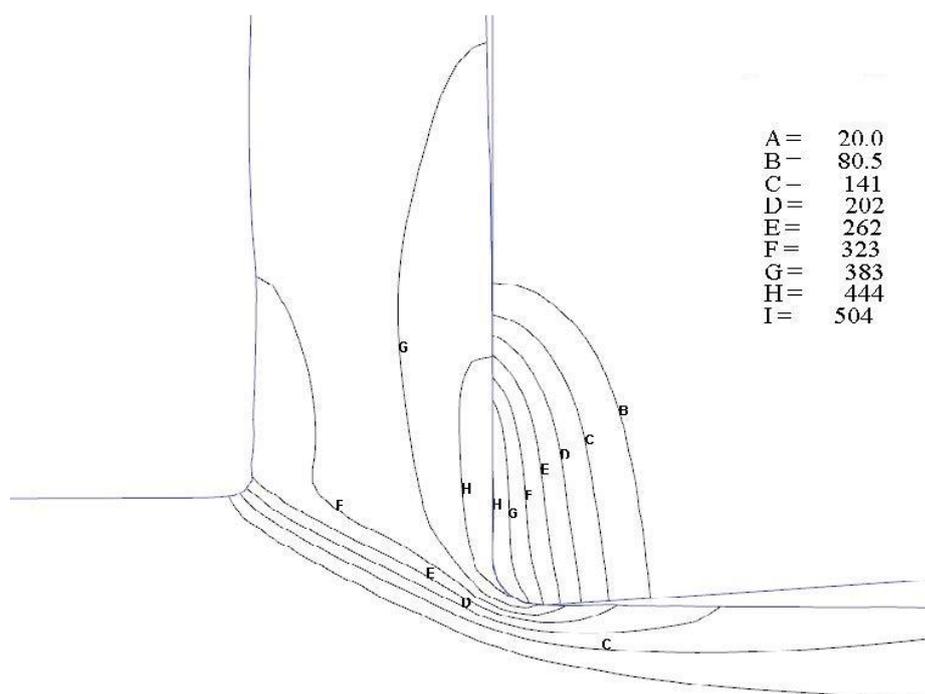


Рис. 4.14 Распределение температуры в стружке
VT3-1 - BK8, $\gamma = 0^\circ$, $v = 60$ м/мин. $S = 0,21$ мм/об

Пластическая деформация показано на рисунке 4.15. Видно, что в качестве элемента часть работы проходит, хотя зоны деформации, его величина пластической деформации увеличивается. Появляется в средней нарушенная зона, где высокая пластической деформации находятся в максимальной температуры, с максимальным значением 2,85 и остается неизменной вне зоны деформации.

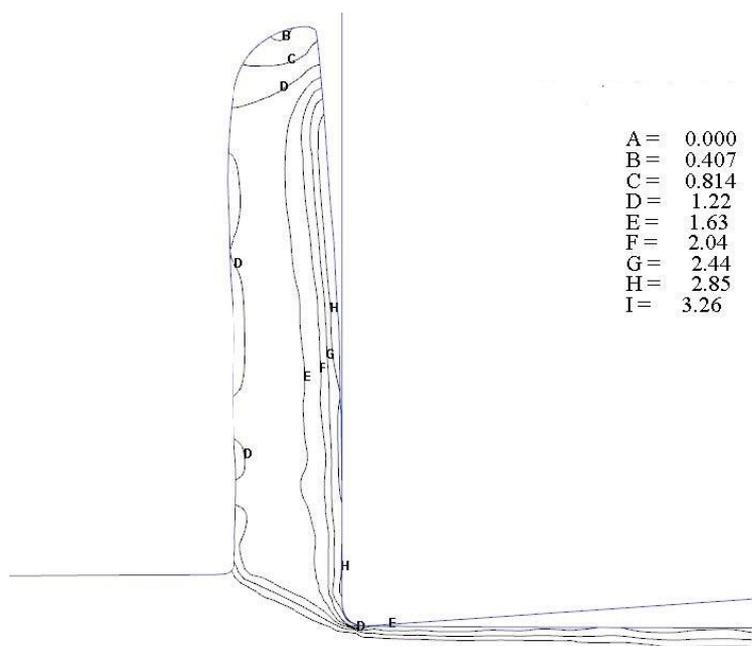


Рис. 4.15 Распределение пластические деформаций в стружке
 ВТЗ-1 - ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $v = 60$ м/мин. $S = 0,21$ мм/об

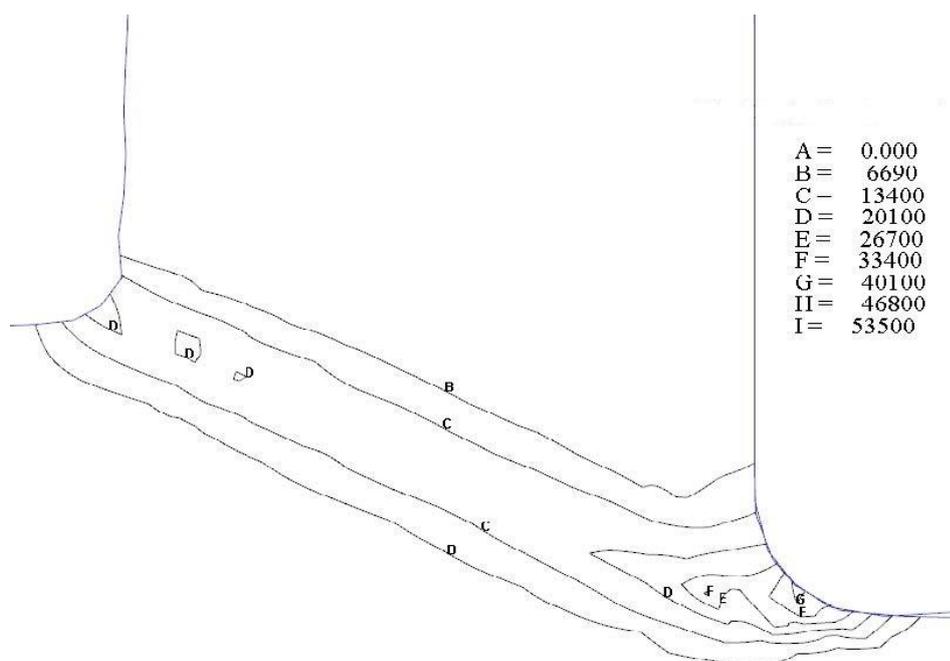


Рис. 4.16 Распределение скоростей деформаций в стружке
 ВТЗ-1 - ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $v = 60$ м/мин. $S = 0,21$ мм/об

Эффективное распределение напряжений показано на рисунке 4.17. Видно, что эффективная достигает максимального напряжения за счет увеличения стоимости как на основную зону сдвига проработать и скорости деформации. Затем он начинает снижаться по отношению к вторичной зоны сдвига в связи с снижением скорости деформации и повышение температуры. Максимальное значение 1060 МПа полученные в первичной нарушенной зоне в средней зоне сдвига и 911 МПа.

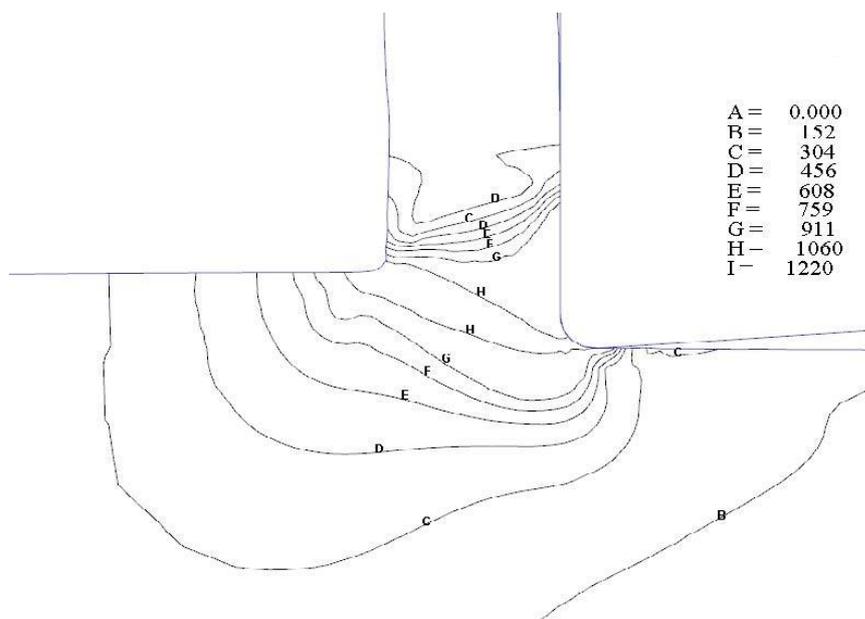


Рис. 4.17 Распределение интенсивности напряжений в стружке
 ВТ3-1 - ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $v = 60$ м/мин. $S = 0,21$ мм/об

ВЫВОДЫ

1. При обработке титанового сплава ВТЗ-1 острозаточенным инструментом с $\gamma = 0^\circ$ в первый же момент происходит выкрашивание режущей кромки с образованием фаски на задней поверхности вследствие превышения сжимающих напряжений предельного значения.

На передней поверхности инструмента на расстоянии четырех длин контакта от режущей кромки возникает зона с растягивающими напряжениями, близкими к предельно допустимым. В этой зоне зарождается трещина, приводящая к сколу режущего клина.

2. Появление фаски на задней поверхности благоприятно сказывается на напряженном состоянии рабочей части инструмента: растягивающие напряжения на передней поверхности исчезают, а сжимающие становятся в 2 раза меньше предельно допустимых.

Таким образом, целесообразно притуплять острозаточенный инструмент с целью заточки небольшой фаски на задней поверхности $h_3 = 0,05...0,2$ мм.

3. С ростом подачи и ширины фаски на задней поверхности увеличивается область со средними значениями напряжений ($1000 \text{ МПа} < |\sigma_3| < 3000 \text{ МПа}$), что приводит к увеличению вероятности попадания в неё дефектов инструментального материала, являющихся потенциальными очагами зарождения микротрещин.

4. Округление режущей кромки сопровождается появлением на задней поверхности непосредственно у режущей кромки зоны с растягивающими напряжениями, превышающими предельно допустимые. Выкрашивание в этой области приводит к появлению отрицательного угла наклона фаски задней поверхности. В остальном округление режущей кромки благоприятно сказывается на напряженном состоянии режущего клина, т.е. σ_3 уменьшается по абсолютной величине.

5. Оптимальной геометрией инструмента для обработки титановых сплавов следует считать: передний угол $\gamma = -20^\circ...-35^\circ$, задний угол $\alpha = 8^\circ$, ширина заточенной фаски на задней поверхности $h_3 = 0,05...0,2$ мм с углом наклона фаски $\alpha_\phi = 0^\circ$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Силин, С.С. Метод подобия при резании материалов / С.С. Силин. – М. : Машиностроение, 1979. –152 с.
2. Подгорков, В.В. Резание металлов. Электронный конспект лекций / В.В. Подгорков. – Ивановский государственный энергетический университет.
<http://elib.ispu.ru/library/lessons/Podgorkov/index.html>.
3. Исследование температуры в зоне резания при точении на токарном станке. Студенческая контрольная работа. Тольяттинский филиал Самарского государственного педагогического университета. – Тольятти – 1999 г.
<http://mixport.ru/referat/referat/57696/>.
4. Мирошниченко, А.В. НИРС. Определение количества тепла, выделяемого при зенкеровании / А.В.Мирошниченко.
<http://www.masters.donntu.edu.ua/2000/mehf/miroshn/nirs.htm>.
5. Грановский, Г.И. Резание металлов : учебник для машиностроит. и приборостроит. спец. вузов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М. : Высшая школа, 1985. – 304 с.
6. Якобс, Г.Ю. Оптимизация резания. Параметризация способов обработки резанием с использованием технологической оптимизации / Г.Ю. Якобс, Э. Якоб, Д. Кохан. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
7. Welcome to ANSYS, Inc. – Corporate Homepage. <http://www.ansys.com>.
8. Компания КАДФЕМ.
http://www.cae-services.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=54&Itemid=58.
9. ANSYS, Inc. Products. <http://www.ansys.com/products/default.asp>.
10. Consistent Software. <http://www.consistent.ru/soft/>.
11. Сервер поддержки программы ELCUT. <http://www.tor.ru/elcut>.
12. COMSOL: COMSOL – Multiphysics Modeling..
13. SolidWorks:: <http://www.solidworks.com/sw/products/details.htm?productid=514>.
14. SolidWorks:: 3D CAD Design Engeniring Software Tools.
<http://www.solidworks.com/sw/3d-caddesign-software.htm>.
15. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение-1, 2001. – Т. 2. – 912 с.
16. Розенберг А.М. Определение сил на задней грани резца. Сб. статей “Вопросы машиноведения и машиностроения“. АН СССР. Зап. Сиб. Филиал, 1951, с. 39 – 41.
17. Зорев Н.Н. Исследование элементов механики процесса резания. М.: Машгиз, 1952.-363 с.
18. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. -М.: Машиностроение, 1969.-150 с.
19. Байкалов А.К. Оптимальная геометрия резцов при скоростном резании чугуна. Автореф. Дис. Канд. Техн. Наук. – Томск, 1952. –19 с.
20. Утешев М.Х., Сенюков В.А. Некоторые результаты исследования напряженного состояния режущей части инструмента при помощи лазера. –В кн. “Прочность режущего инструмента“. М. , 1969, с. 38 – 50.
21. Мелихов В.В. Исследование контактных нагрузок на задней поверхности резца и их влияние на прочность режущей части. Автореф. Дис. Канд. Техн. Наук. – Тула, 1971. – 21 с.
22. Наумов В.А. Особенности процесса резания изношенным инструментом. Автореф. Дис. Канд. Техн. Наук. – Томск, 1966. –24 с.
23. Остафьев В.А. Расчет динамической прочности режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1979.-168 с.
24. Полетика М.Ф., Собанин А.Л., Кужларов В.Н. Силы и деформации на различных участках задней поверхности резца. Сб. статей “Вопросы оптимального резания

металлов”. Вып. 1. -Уфа, 1976, с. 98-104.

25.Красильников В.А. Исследование контактных напряжений на передней поверхности резца при высоких скоростях резания: Автореф. Дис. Канд. Техн. Наук.. – Томск, 1973, 24 с.

26.Полетика М.Ф., Бутенко В.А., Козлов В.Н. Механика контактного взаимодействия инструмента со стружкой и заготовкой в связи с его прочностью. Сб. статей “Исследования процесса резания и режущих инструментов”. -Томск, 1984, с. 3-32.

27.Полетика М.Ф., Афонасов А.И. Контактные условия на задней грани инструмента при элементном стружкообразовании. Сб. статей "Прогрессивные технологические процессы в машиностроении". -Томск, 1997, с. 14-17.

28.Красильников В.А., Козлов В.Н., Подворчан А.И. Методика измерения контактных нагрузок на задней грани резца. Сб. статей “Исследования процесса резания и режущих инструментов”. -Томск, 1984, с. 130-133.