

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Кибернетики
Направление подготовки 15.04.01 «Машиностроение»
Кафедра «Технология машиностроения и промышленной робототехники»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Расчет на прочность торцевой фрезы методом конечных элементов

УДК 621.914.22:539.4:517.962

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЛМ51	Цуй Цзян		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	В.Н. Козлов	Кандидат технических наук		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	В.В. Спицын	Кандидат экономических наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Ю.М. Федорчук	Доктор технических наук		

По разделу «Английская часть»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Д.В. Шепетовский			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ТМСР	А.Д. Вильнин			

Томск – 2017 г.

Планируемые результаты обучения по программе

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
P1	Способность выбирать аналитические и численные методы при разработке математических моделей машин, приводов, оборудования, систем, технологических процессов в машиностроении
P2	Способность подготавливать технические задания на разработку проектных решений, разрабатывать эскизные, технические и рабочие проекты технических разработок с использованием средств автоматизации проектирования и передового опыта разработки конкурентоспособных изделий, участвовать в рассмотрении различной технической документации, подготавливать необходимые обзоры, отзывы, заключения
P3	Способность изучать и анализировать необходимую информацию, технические данные, показатели и результаты работы, систематизировать их и обобщать
P5	Способность получать и обрабатывать информацию из различных источников с использованием современных информационных технологий, уметь применять прикладные программные средства при решении практических вопросов с использованием персональных компьютеров с применением программных средств общего и специального назначения, в том числе в режиме удаленного доступа
Общекультурные компетенции	
P6	Способность выбирать оптимальные решения при создании продукции с учетом требований качества, надежности и стоимости, а также сроков исполнения, безопасности жизнедеятельности и экологической чистоты производства
P7	Способность самостоятельно применять методы и средства познания, обучения и самоконтроля для приобретения новых знаний и умений, в том числе в новых областях, непосредственно не связанных со сферой деятельности

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Кибернетики
Направление подготовки (специальность) 15.04.01 «Машиностроение»
Кафедра «Технология машиностроения и промышленной робототехники»

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
8ЛМ51	Цуй Цзян

Тема работы:

Расчет на прочность торцевой фрезы методом конечных элементов

Утверждена приказом директора (дата, номер)

№ 3144/с 15.05.2017

Срок сдачи студентом выполненной работы:

01.06.2017

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Тип фрез; Обрабатываемые материалы 35ХГСА, ВТ 3 – 1; Физико-механические свойства инструментальных материалов; Теория метода конечных элементов; Исследования процесса стружкообразования, выполненные в России и за рубежом; Исследования прочности режущего инструмента, выполненные в России и за рубежом
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Обзор научно-технической литературы; Создание 3D модели режущих инструментов; Определение распределения контактных нагрузок на рабочей поверхности; Исследование распределения внутренних напряжений в режущем клине; Исследование НДС инструмента при разном режиме резания; Исследование НДС инструмента при разных геометрических параметрах режущего клина. Исследование прочности инструмента при разной

	марки режущего клина.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Технологический и конструкторский	Козлов В.Н.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Спицын В.В.
Социальная ответственность	Федорчук Ю.М.
Английская часть	Шепетовский Д.В.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Литературный обзор	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	30.09.2015
--	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Козлов В.Н.	Кандидат технических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЛМ51	Цуй Цзян		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8ЛМ51	Цуй Цзян

Институт кибернетики	Неразрушающего контроля	Кафедра ТМСР	Физических методов и приборов контроля качества
Уровень образования	магистр	Направление/специальность 15.04.01 «Машиностроение»	Расчет на прочность торцевой фрезы методом конечных элементов

Тема дипломной работы: Расчет на прочность торцевой фрезы методом конечных элементов.

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	1. Источник финансирования: Каф. ТМСР ИК
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Предпроектный анализ 2. Инициация проекта 3. Планирование управления научно-техническим проектом 4. Расчет бюджета проекта 5. План проекта 6. Бюджет научного исследования 7. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования 	
Перечень графического материала:	
<ol style="list-style-type: none"> 1. «Портрет» потребителя результатов НИ 2. Календарный план проведения НИ 3. Диаграмма Ганта 4. Бюджет НИ 	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:				
Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. менеджмента	Спицын Владислав Владимирович	Кандидат экономических наук		

Задание принял к исполнению студент:			
Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЛМ51	Цуй Цзян		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8ЛМ51	Цуй Цзян

Институт кибернетики	Неразрушающего контроля	Кафедра ТМСР	Физических методов и приборов контроля качества
Уровень образования	магистр	Направление/специальность 15.04.01 «Машиностроение»	Расчет на прочность торцевой фрезы методом конечных элементов

Тема дипломной работы: Расчет на прочность торцевой фрезы методом конечных элементов.

<p>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</p> <p>Целью данной работы является создание лабораторной модели плазмо-химического реактора конверсии метана с получением водорода и оксида углерода.</p> <p>Описание рабочего места на предмет возникновения вредных проявлений факторов производственной среды (для обслуживающего персонала необходимо обеспечить оптимальные, в крайнем случае, допустимые значения метеоусловий на рабочем месте, исключить контакт с вредными, токсичными веществами – бензапирен, фенолы и др., которые могут образовываться в процессе работы установки, обеспечить комфортную освещенность рабочего места, уменьшить до допустимых пределов шум от силового блока плазмореактора, вентиляции, обеспечить безопасные значения электромагнитных полей от силового блока плазмореактора);</p> <p>опасных проявлений факторов производственной среды (в связи с присутствием электричества для питания энергоблока плазмореактора и освещенности лаборатории, наличии горючих (СО) и взрывоопасных газов (водород) необходимо предусмотреть, если есть, то перечислить средства коллективной и индивидуальной защиты от электро-, пожаро- и взрывоопасности); необходимо предусмотреть мероприятия по предотвращению негативного воздействия на окружающую природную среду используемых энергетических проявлений и образующихся отходов: электромагнитные поля от силового блока плазмореактора, метан, водород, оксид углерода и др. парниковые и токсичные газы, «черновые» листы бумаги, отработанные картриджи, принтеры и др. оргтехника;</p> <p>- необходимо обеспечить устойчивую работу вашего производственного участка при возникновении чрезвычайных ситуаций, характерных для Сибири – сильные морозы, пурга, человеческий фактор, диверсия (рассмотреть минимум 2 ЧС – 1 природную, 1 техногенную).</p>
<p>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</p> <p>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <p>а) приводится перечень всех используемых в работе реагентов, их агрегатное состояние, класс опасности (токсичности), механизм воздействия их на организм человека, единицы измерения количества (концентрации); приводится перечень средств коллективной и индивидуальной защиты персонала, а также защиты окружающей среды;</p> <p>б) приводятся данные по оптимальным и допустимым значениям микроклимата на рабочем месте, перечисляются методы обеспечения этих значений; приводится 1 из расчетов (расчет освещенности на рабочем месте, расчет потребного воздухообмена на рабочем месте, расчет необходимого времени эвакуации рабочего персонала);</p> <p>в) приводятся данные по реальным значениям шума на рабочем месте, разрабатываются или, если уже есть, перечисляются мероприятия по защите персонала от шума, при этом приводятся значения ПДУ, средства коллективной защиты, СИЗ;</p> <p>г) приводятся данные по реальным значениям электромагнитных полей на рабочем месте, в том числе от компьютера или процессора, если они используются, перечисляются СКЗ и СИЗ; приведение допустимых норм с необходимой размерностью (с ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); предлагаемые средства защиты</p>

(сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)
Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности а) приводятся данные по значениям напряжения используемого оборудования, классификация помещения по электробезопасности, допустимые безопасные для человека значения напряжения, тока и заземления (в т.ч. статическое электричество, молниезащита - источники, средства защиты); перечисляются СКЗ и СИЗ; б) приводится классификация пожароопасности помещений, указывается класс пожароопасности вашего помещения, перечисляются средства пожарообнаружения и принцип их работы, средства пожаротушения, принцип работы, назначение (какие пожары можно тушить, какие – нет), маркировка; пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия).
Охрана окружающей среды: организация безотходного производства (приводится перечень отходов при эксплуатации установки, перечисляются методы улавливания, переработки, хранения и утилизации образовавшихся на вашем производстве промышленных отходов).
Защита в чрезвычайных ситуациях: а) Приводятся возможные для Сибири ЧС; Возможные ЧС: морозы, диверсия разрабатываются превентивные меры по предупреждению ЧС; разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий
Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства (приводится перечень ГОСТов, СНиПов и др. законодательных документов, использованных в своей работе);
Перечень графического материала: 1) Пути эвакуации 2) План размещения светильников на потолке рабочего помещения

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Федорчук Юрий Митрофанович	Доктор технических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЛМ51	Цуй Цзян		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«Английский язык»**

Студенту:

Группа	ФИО
8ЛМ51	Цуй Цзян

Институт кибернетики	Неразрушающего контроля	Кафедра ТМСПР	Физических методов и приборов контроля качества
Уровень образования	магистр	Направление/специальность 15.04.01 «Машиностроение»	Расчет на прочность торцевой фрезы методом конечных элементов

Тема дипломной работы: Расчет на прочность торцевой фрезы методом конечных элементов.

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Английский язык»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Д.В. Шепетовский			

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Шепетовский Денис Владимирович			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЛМ51	Цуй Цзян		

РЕФЕРАТ

выпускной квалификационной работы

студента гр. 8ЛМ51 Цуй Цзян

Расчет на прочность торцевой фрезы методом конечных элементов

Выпускная квалификационная работа выполнена на 169 с. пояснительной записки, содержит 89 рис., 80 табл., 66 источников. Презентация выполнена на 26 слайдах.

Ключевые слова: прочность режущего инструмента, распределение внутренних напряжений, сила резания, износ режущего инструмента, торцевая фреза, метод конечных элементов, режим резания, технологическая себестоимость, социальная ответственность.

Объектом исследования является торцевая фреза.

Цель работы – подтверждение квалификации магистр по направлению 15.04.01 «Машиностроение».

В процессе исследования проводились: создание 3D модели торцевой фрезы и других режущих инструментов, определение распределения контактных нагрузок на рабочей поверхности, исследование распределения внутренних напряжений в режущем клине, расчёт температур в режущем клине, исследование НДС инструмента при разных режимах резания, получение и анализ результатов моделирования резания при фрезеровании, расчёт общей себестоимости разработки, определение сравнительной эффективности разработки, выполнен анализ вредных факторов на производстве и решение вопросов безопасности работы, действия при чрезвычайных ситуациях и мероприятия по их предотвращению, анализ влияния производственных факторов на окружающую среду.

В результате исследования выполнен анализ разных факторов, влияющих на прочность режущей пластины торцевой фрезы, определена оптимальная геометрия режущего клина и режим резания с точки зрения его прочности при черновой обработке стали и титанового сплава, выполнен расчёт общей себестоимости разработки, решены вопросы безопасности работы, разработаны мероприятия по предотвращению чрезвычайных ситуаций.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: инструментальные материалы – Т15К6; обрабатываемые материалы: сталь 40Х, сталь 35ХГСНА, титановый сплав ВТ3-1.

Степень внедрения: по результатам защиты работы на государственной аттестационной комиссии будет решено, следует ли рекомендовать разработки к внедрению на производстве.

Область применения: черновое фрезерование труднообрабатываемых материалов.

Экономическая значимость работы достаточно высокая.

В будущем планируется принимать метод моделирования.

Содержание

1. Аннотация	1
2. Введение	1
3. Литературный обзор.....	2
3.1. Исследование сил резания на передней и задней поверхностях.....	2
3.2. Исследование процесса стружкообразования.....	3
3.2.1. Исследование процессов сливного и элементного стружкообразования.	4
3.2.2. Измерение длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента	6
3.2.3. Исследование изменения сил резания при сливном и элементном стружкообразовании	6
3.2.4. Влияние подачи, глубины и скорости резания на силы и температуру резания.....	7
3.2.5. Влияние обрабатываемого материала на силы на передней поверхности инструмента и температуру резания	8
3.2.6. Влияние обрабатываемого материала на силы на задней поверхности инструмента	15
3.3. Исследование температуры резания и распределения температуры в режущем клине	17
3.4. Изучение распределения контактных нагрузок на передней и задней поверхностях.....	20
3.5. Исследование распределения внутренних напряжений в режущем клине.	31
3.5.1. Поляризационно-оптический метод.	31
3.5.2. Интерференционный метод (метод лазерной интерферометрии)	32
3.5.3. Метод конечных элементов	32
3.6. Оценка прочности режущего инструмента	33
3.7. Постановка задачи на основе литературного обзора.....	34
4. Методика выполнения работы	36

4.1. Приложение внешней нагрузки на заднюю и переднюю поверхности.....	36
4.2. Влияние вида распределения контактных нагрузок на передней поверхности на НДС режущего клина	36
4.3. Создание модели режущего инструмента	37
4.4. Задание физико-механических характеристик инструментального и обрабатываемого материалов.....	39
5. Измерение сил резания	41
6. Измерение сил резания при точении вала	47
7. Исследование прочности резца.....	52
7.1. Расчёт внутренних напряжений в режущем клине при точении диска из титанового сплава ВТЗ-1	52
7.2. Расчёт внутренних напряжений в режущем клине при точении вала из стали 40Х.....	59
8. Исследование прочности торцевой фрезы.....	67
8.1. Конструкции и размеры торцевой фрезы	69
8.2. Расчёт режима резания для фрезерования.....	74
8.3. Расчёт удельных сил резания и контактных нагрузок при фрезеровании и точении	78
8.4. Расположение заготовки при фрезеровании торцевой фрезой	83
8.5. Создание 3D модели зуба торцевой фрезы.....	85
8.6. По программе ANSYS введение 3D модели пластины.....	87
8.7. Влияние подачи на НДС режущего клина.....	88
8.8. Влияние обрабатываемого материала на НДС режущего клина	95
8.9. Влияние фактора врезания на внутренние нормальные и эквивалентные напряжения при резании изношенным по задней поверхности инструментом	100
8.10. Выводы.	111
8.11. Литература.	113
9. Английская часть.....	117
10. Социальная ответственность.....	132

1. Аннотация

В данной работе исследовано напряжённо – деформированное состояние (НДС) в режущем клине в процессе резания торцевой фрезой с использованием метода конечных элементов (МКЭ). С помощью программного обеспечения ANSYS моделировалось нагружение зубьев торцевой фрезы внешними нагрузками при различных обрабатываемых материалах, условиях резания и геометрических параметрах инструмента. Рассчитаны деформации и распределение внутренних напряжений в режущем клине, по которым оценивалась прочность режущего инструмента.

Ключевые слова:

Метод конечных элементов, напряжённо-деформированное состояние режущего инструмента, торцевая фреза, прочность фрезы.

2. Введение

При обработке резанием необходим правильный выбор режущего инструмента. Конструкция инструмента, инструментальные материалы и геометрические параметры режущего инструмента влияют на стойкость инструмента, эффективность производства, качество обработки. Режущий инструмент должен иметь хорошие характеристики: высокую механическую прочность и красностойкость, твёрдость, большую ударную вязкость, хорошую усталостную прочность и отличное сопротивление износу.

С развитием компьютерных программ и технологий, вычислительной техники, много инженерных проблем решается численными методами с помощью компьютерных программ, включая определение распределения температуры и внутренних напряжений в режущем клине при резании. В настоящее время наиболее широко используемый численный метод исследования – это метод конечных элементов.

При обработке труднообрабатываемых материалов дисковой фрезой возникают внутренние напряжения, приближающиеся к пределу прочности инструментального материала. Для исследования напряжённо-деформированного состояния (НДС) режущего инструмента и оценки его прочности было решено использовать метод конечных элементов (МКЭ), реализуемый с помощью программного обеспечения ANSYS.

Эта компьютерная программа позволяет рассматривать НДС областей с небольшими размерами, что характерно для исследования режущего клина в области стружкообразования. С помощью этого метода можно также моделировать процесс резания, а затем выбрать рациональную конструкцию инструмента, геометрию и режим резания, чтобы увеличить надёжность и стойкость режущего инструмента, производительность обработки, используя все возможности инструмента.

3. Литературный обзор

3.1. Исследование сил резания на передней и задней поверхностях

Для измерения и анализа влияния условий резания на силу резания сила резания F (P) может быть разложена на три технологические составляющие силы резания, действующих в трёх взаимно перпендикулярных направлениях:

F_z (P_z) – тангенциальная составляющая силы резания – совпадает по направлению со скоростью главного движения. Т.к. эта составляющая в наибольшей степени влияет на мощность резания и она обычно больше других составляющих, то её называют главной составляющей силы резания.

F_x (P_x) – осевая (продольная) составляющая сила резания, направлена вдоль продольного движения подачи.

F_y (P_y) – радиальная составляющая сила, направлена поперёк продольной подачи.

Плоскость, в которой действуют F_x и F_y , называется основной плоскостью. При обработке на обычных токарных станках она горизонтальна.

На величину составляющих силы резания влияет много факторов. Основные из них: материалы обрабатываемой заготовки; инструментальные материалы; режимы резания: глубина резания, подача, скорость резания; геометрические параметры резца: величины переднего, заднего угла, радиуса при вершине и радиуса округления режущей кромки, главного и вспомогательного угла в плане; износ резца и т.д.

Обычно для одного и того же обрабатываемого материала чем больше глубина срезаемого слоя (глубина резания) t и подача s , тем больше главная составляющая F_z . Влияние скорости резания не столь однозначно, существуют

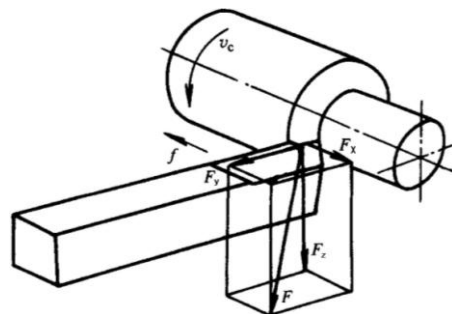


Рис. 3.1. Схема сил, действующих на передней поверхности резца при резании

участок, где увеличение скорости резания v приводит к увеличению силы резания, но при обработке стали при скорости резания более 150 м/мин с увеличением скорости резания сила резания уменьшается из-за увеличения скорости деформации в области стружкообразования и уменьшения вследствие этого зоны первичной пластической деформации.

Существует формула для расчёта приближенного значения составляющей силы резания F_z

$$F_z = K \cdot f, \quad (3.1)$$

где: K – удельная сила резания, Н/мм². f – площадь поперечного сечения срезаемого слоя, мм². При токарной обработке $f = s t$, где s – подача, мм/об, t – глубина резания, мм.

Составляющая силы F_x и F_y при $\varphi = 45^\circ$ могут быть приблизительно рассчитаны по следующим формулам:

$$F_x = (0,3 \dots 0,4)F_z \quad (3.2)$$

$$F_y = (0,4 \dots 0,5)F_z \quad (3.3)$$

Для точного расчёта составляющих силы резания необходимо использовать другую формулу:

$$P_{z, y, x} = 10 C_p t^x s^y v^n K_p \quad (3.4)$$

Суммарная сила F , действующая на резец, рассчитывается по формуле:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (3.5)$$

Более точно составляющие силы резания могут быть определены экспериментально с помощью трёхкомпонентного токарного динамометра.

3.2. Исследование процесса стружкообразования

Процесс резания материалов является процессом глубокого пластического деформирования и разрушения, сопровождаемый трением стружки о переднюю поверхность режущего клина[9] и трением задней поверхности инструмента о поверхность резания, происходящих в условиях высоких давлений и скоростей

скольжения. Затрачиваемая при этом механическая энергия превращается в теплоту, которая, в свою очередь, оказывает большое влияние на закономерности деформирования срезаемого слоя, силы резания, износ и стойкость инструмента[23].

Образующаяся при резании стружка несёт информацию о процессах, происходящих при резании, поэтому подвергается пристальному изучению.

3.2.1. Исследование процессов сливного и элементного стружкообразования.

Тип стружки зависит от многих условий, но в основном от обрабатываемого материала и режима резания. При обработке пластичных металлов обычно образуется сливная стружка, а элементная стружка образуется при обработке металлов хрупких и средней твёрдости (рис. 3.2).

Сливная стружка (рис. 3.2, *a*) представляет собой непрерывную ленту, которая в зависимости от условий схода по передней поверхности инструмента может быть прямой, спиральной или в виде хаотических завитков. Прирезцовая сторона стружки 1, прилегающая к передней поверхности инструмента, гладкая, блестящая, а внешняя сторона 2 - в виде мелких, постоянно чередующихся зубчиков. Цвет стальной стружки в зависимости от температуры резания изменяется от серебристо-белого и жёлтого до матово-серого и синего. Форма и размеры поперечного сечения стружки по всей длине постоянны, что свидетельствует о стабильности деформации, происходящей при образовании такой стружки. Сливная стружка встречается при резании пластичных металлов в основном на больших скоростях, малых и средних подачах, а также при положительных передних углах инструмента.

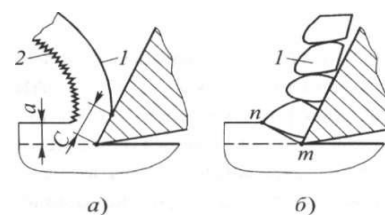


Рис. 3.2. Типы стружек, образующихся при резании металлов: а - сливная; б – элементная

Элементная стружка (рис.3.2, б) (иногда её называют стружкой скалывания) состоит из отдельных элементов (кусочков) металла 1, не связанных или слабо связанных между собой прирезцовым слоем. Каждый элемент стружки при его формировании претерпевает значительную деформацию и становится в 2...3 раза твёрже по сравнению с исходной твёрдостью обрабатываемого материала. Вследствие этого срезаемый слой, проходя через так называемую поверхность скалывания **mn**, теряет свою пластичность и разрушается с определённой периодичностью. Элементная стружка образуется при резании хрупких металлов (чугун, бронза и др.), а также при резании на невысоких скоростях пластичных металлов, при больших толщинах срезаемого слоя, малых передних углах, высокой твёрдости обрабатываемых металлов и других условиях, затрудняющих пластическую деформацию.

Различают также суставчатую стружку, у которой элементы хорошо различимы, но плотно приварены друг к другу, поэтому такую стружку иногда называют псевдо сливной.

На вид стружки, кроме физико-механических свойств металла, влияет также режим резания, геометрия режущего инструмента, применяемые смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС).

Сливная стружка может запутаться или намотаться на заготовку, приспособление или инструмент, что способно вызвать поломку режущего инструмента, а порой и повреждение заготовки или станка, резко увеличивается вероятность травмы рабочего. Поэтому стараются не допускать длинных стружек, для чего затачиваются стружкозавивающие канавки, порошки, используются накладные стружколомы, используется сильный напор смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) или сжатого воздуха, специальные СОТС, изменяющие не только форму стружки, но и её характер.

3.2.2. Измерение длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента

Длину контакта стружки с передней поверхностью обычно измеряют после проведения экспериментов (резания) на большом инструментальном микроскопе или с помощью лупы Бринеля. Предварительно передняя поверхность инструмента подготавливается для более точного измерения длины контакта.

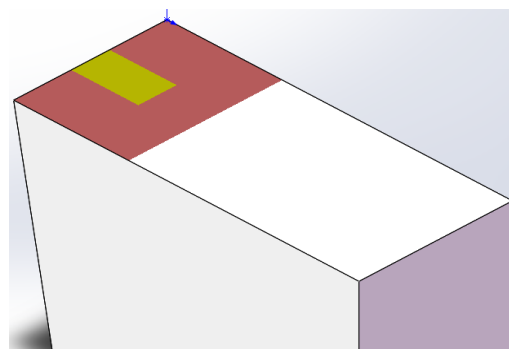


Рис. 3.3. Схема измерения длины контакта стружки

Сначала тампоном, смоченным медным купоросом, производится меднение передней поверхности инструмента, после чего инструмент сушится. На его поверхности образуется тончайшее медно-красноватое покрытие. После резания измеряется длина стёртого участка (длина контакта стружки с передней поверхностью C) (рис. 4.3), измеряется также длина налипшего на переднюю поверхность обрабатываемого материала – длина пластического контакта стружки с передней поверхностью C_1 . При обработке стали и других достаточно пластичных материалов $C \approx (4-7) \cdot a$, где a – толщина среза. При прямоугольном свободном резании $a = s$, при косоугольном резании $a = s \sin \varphi$.

При обработке пластичных металлов и сплавов длина пластического контакта стружки с передней поверхностью резца $C_1 \approx (0,4-0,6) \cdot C_1$, при образовании элементной стружки $C_1 \approx (0,1-0,3) \cdot C_1$.

3.2.3. Исследование изменения сил резания при сливном и элементном стружкообразовании

Наименьшее значение силы резания при элементной стружке будет при формировании первого элемента. По мере продвижения резца и увеличения деформации элемента сила резания будет возрастать, достигая наибольшего

значения в момент скалывания элемента, а затем уменьшаться до некоторого значения, но не до нуля, так как второй элемент стружки начинает деформироваться несколько раньше, чем заканчивается скалывание первого элемента.

3.2.4. Влияние подачи, глубины и скорости резания на силы и температуру резания

Элементами режима резания являются скорость резания, подача и глубина резания. Совокупность их значений принято называть *режимом резания*.

Скорость резания v (V) — это скорость рассматриваемой точки режущей кромки инструмента или заготовки в главном движении. Скорость резания измеряют в соответствии с системой SI в м/с, но на практике чаще в м/мин при всех видах обработки резанием, кроме шлифования и полирования, где её измеряют в м/с.

Подача s (S , f) — это отношение расстояния, пройденного рассматриваемой точкой режущей кромки или заготовки в направлении движения подачи, к соответствующему числу циклов или определённым долям циклов другого движения. Под циклом движения понимают полный оборот, ход или двойной ход режущего инструмента или заготовки.

Глубина резания t определяется как расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями заготовки, измеренное перпендикулярно к последней.

Глубина резания оказывает большое влияние на силы резания, поэтому иногда возникает необходимость разделить припуск на несколько рабочих ходов, чтобы глубина резания на каждом ходе не превышала 3-4 мм.

Величина подачи ограничивается силами, действующими в процессе резания; эти силы могут привести к поломке режущего инструмента, деформации и искажению формы заготовки, поломке станка. Другим ограничением является наибольшая допустимая шероховатость. Для

увеличения производительности обработки целесообразно работать с максимально возможной подачей. Для обеспечения заданной шероховатости поверхности при этом необходимо увеличить радиус при вершине инструмента, однако это вызовет увеличение силы резания и увеличение упругой деформации системы СПИД, поэтому радиус при вершине при токарной обработке, как правило, не превышает 2,5 мм.

Основная причина износа инструмента – это температура на участках контакта инструмента со стружкой и с заготовкой. Поэтому скорость резания в наибольшей степени влияет на износ инструмента.

3.2.5. Влияние обрабатываемого материала на силы на передней поверхности инструмента и температуру резания

Влияние обрабатываемого металла на силы резания. При резании металл претерпевает большую пластическую деформацию в зоне стружкообразования. Большое влияние на величину силы резания оказывают силы трения стружки и обрабатываемого материала соответственно о переднюю и заднюю поверхности режущей части инструмента. Необходимо учитывать и нагрев обрабатываемого материала в зоне резания, т.к. его свойства могут сильно отличаться от свойств, которые были получены при комнатной температуре при обычных статических испытаниях при малых скоростях деформации.

При обработке мягких и пластичных материалов вследствие большой усадки стружки и увеличенной зоной первичных пластических деформации сила резания может быть больше, чем при обработке твёрдых материалов. Поэтому однозначной зависимости между силой резания и пределом прочности на разрыв обрабатываемого материала, его твёрдостью и другими механическими характеристиками не имеется.

Вместе с тем установлено, что силы резания растут при увеличении предела прочности, твёрдости, пластичности и вязкости обрабатываемого материала.

Для облегчения выполнения теоретических расчётов делается допущение, что все деформации происходят в плоскости, которую назвали условной плоскостью сдвига (рис. 3.4). Для материалов, образующих элементную стружку, это допущение практически соответствует реальным процессам, но для пластичных

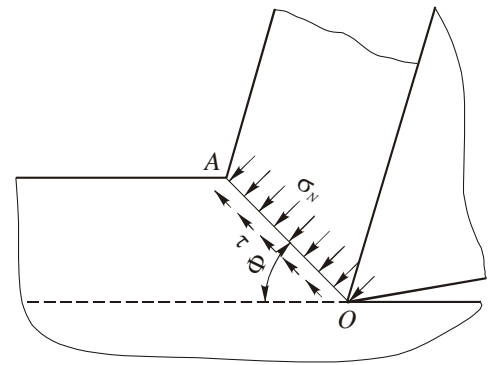


Рис. 3.4. Напряжения в условной плоскости сдвига

материалов это серьёзное упрощение процесса стружкообразования. Однако при увеличении скорости резания (для стали $v > 200$ м/мин) даже у пластичных материалов происходит уменьшение зоны первичных пластических деформаций, что позволяет говорить о деформациях в очень узкой области, приближающейся по размерам к условной плоскости сдвига.

Сила резания и тепловыделение в зоне стружкообразования зависят от напряжений в условной плоскости сдвига. Многочисленные эксперименты показали, что независимо от условий резания (обрабатываемый материал, скорость резания, толщина и ширина срезаемого слоя, передний угол инструмента) распределение касательного напряжения τ по длине условной плоскости сдвига примерно равномерное (рис. 3.4) [1].

Распределение нормальных напряжений σ_N имеет более сложный характер и зависит от степени деформации и режима резания. Так, например, при малой степени деформации (резание на микроскоростях с большим передним углом) нормальные напряжения вдоль условной плоскости сдвига σ_N могут принимать положительные и отрицательные значения. При больших степенях деформации и применяемых на практике скоростях резания нормальное напряжение σ_N имеет положительное значение и распределяется также примерно равномерно, как и касательное напряжение. Влияние

нормального напряжения σ_N на величину касательного напряжения τ экспериментально не установлено [17].

Для качественной оценки степени пластических деформаций используется коэффициент усадки (укорочения) стружки K_l , который равен отношению длины участка l , с которого была удалена стружка, к длине самой стружки l_1 . Пренебрегая уширением стружки можно рассчитать усадку стружки как усадку стружки по толщине, т.е. отношение толщины стружки a_1 к толщине среза a ($K_a = a_1/a$). Обычно оперируют истинной усадкой стружки $K = K_l \cdot K_a$.

Большое влияние на усадку стружки оказывают передний угол γ , скорость резания v и физико-механические свойства обрабатываемого материала. Подача s и глубина резания t на усадку стружки влияют незначительно.

Результаты многочисленных исследований, выполненных как в России, так и за рубежом, показали, что процесс деформирования при резании материалов относится к простому сдвигу.

Расстояние ΔS , на которое смещается при простом сдвиге верхняя граница прямоугольного образца из испытуемого металла относительно нижней границы, называется абсолютным сдвигом. Отношение расстояния ΔS к расстоянию между верхней и нижней границами Δh называется относительным сдвигом, и он служит мерой пластической деформации $\varepsilon = \Delta S / \Delta h$.

Относительный сдвиг при резании может быть рассчитан по формуле

$$\varepsilon = \frac{\cos \gamma}{\cos(\Phi - \gamma) \sin \Phi}, \quad (3.6)$$

или по формуле

$$\varepsilon = \frac{K^2 - 2K \sin \gamma + 1}{K \cos \gamma} \quad (3.7)$$

Угол наклона условной плоскости сдвига Φ можно рассчитать, зная коэффициент усадки стружки K и передний угол γ :

$$\Phi = \arctg\left(\frac{\cos \gamma}{K - \sin \gamma}\right) \quad (3.8)$$

При пластическом деформировании у большинства металлов происходит упрочнение, поэтому при увеличении степени деформации e_i нормальное напряжение σ_i растёт по типичной кривой 1, представленной на рис. 3.5.

Эту кривую можно описать степенным уравнением

$$\sigma_i = B e_i^n, \quad (3.9)$$

где B - коэффициент, зависящий от предела текучести σ_T деформируемого материала; n - показатель степени упрочнения материала.

При плоском деформированном состоянии уравнение (3.9) можно заменить зависимостью

$$\tau = B \varepsilon^n, \quad (3.10)$$

где τ - касательное напряжение; ε - относительный сдвиг.

В результате исследований было установлено, что при резании различных металлов и сплавов с ростом деформации касательные напряжения возрастают не всегда. У некоторых металлов касательные напряжения остаются постоянными, как у идеально пластического тела (рис. 3.5, прямая 2), а у некоторых сталей – даже несколько снижается. В этой связи Н.Н. Зоревым было предложено рассчитывать среднее значение касательных напряжений при резании по приближенной эмпирической зависимости [13, 25]

$$\tau_{cp} = A_{2,5}, \quad (3.11)$$

где $A_{2,5}$ - сопротивление сдвигу при механических испытаниях для деформации относительного сдвига $\varepsilon = 2,5$.

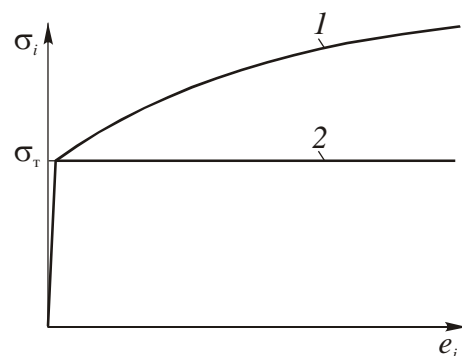


Рис. 3.5. Типичная кривая пластического течения:
1 - упрочняющийся материал;
2 - идеально пластичный материал

А. М. Розенберг и Л.А. Хворостухин экспериментально установили следующую зависимость между твердостью стружки по Виккерсу HV и средним касательным напряжением в зоне стружкообразования при резании сталей, чугуна, меди и алюминия [31]

$$\tau_{cp} = 0,185 HV . \quad (3.12)$$

Эксперименты показали, что влияние температуры на уменьшение среднего касательного напряжения при резании предварительно нагретого металла становится заметным, если температура превышает 700°C . Расчеты температуры в зоне сдвига при резании других сталей на самых напряжённых режимах показали, что они не выходят за пределы 700°C [28, 32], даже если процесс считать адиабатическим, то есть осуществляемым без оттока теплоты. Если же учитывать отток теплоты, то температура в зоне сдвига будет ниже указанной. Кроме того, из-за высокой скорости деформации процесс деформирования в зоне сдвига протекает в очень короткий промежуток времени (тысячные доли секунды). Поэтому за такой чрезвычайно малый отрезок времени, в течение которого частицы металла проходят через зону сдвига, снижение твердости и напряжения под влиянием нагрева не происходит.

Влияние скорости деформации на повышение напряжения сдвига было доказано экспериментально только при резании легкоплавких металлов (свинец, алюминий). При резании металлов с большей температурой плавления (сталь, медь и др.) это влияние отсутствует [32].

Результаты зарубежных исследователей (*E.M. Trent, E.J. Amini* и др.) [36] показали, что изменение скорости резания и подачи в широком диапазоне на напряжение сдвига влияют незначительно. Значения напряжения сдвига при резании не более чем на 10% отличаются от напряжений сдвига тех же материалов, измеренных при стандартных лабораторных механических испытаниях при соответствующих величинах деформаций. Примерные значения напряжений сдвига τ , измеренные с помощью динамометра, при резании ряда материалов приведены в табл. 3.1 [36].

Таблица 3.1. Значения напряжений сдвига τ для некоторых обрабатываемых материалов [36]

Обрабатываемый материал	τ , Н/мм ²
Техническое железо	370
Сталь (С=0,12%)	480
Никель-хромованадиевая сталь	690
Аустенитная нержавеющая сталь	630
Никель	420
Медь (отожженная/холоднокатаная)	250/270
Латунь	370
Алюминий	97
Магний	125
Свинец	36

Для расчета напряжений сдвига τ можно использовать схему сил, действующих на передней поверхности резца (см. рис. 3.6). Сила резания R приложена к вершине режущего клина и представлена в виде двух составляющих: 1) \bar{P}_1 , которая действует в направлении вектора скорости резания \bar{v} ; 2) \bar{P}_2 , которая действует в направлении подачи \bar{s}_y , перпендикулярно к вектору скорости \bar{v} . При этом

$$\bar{R} = \bar{P}_1 + \bar{P}_2 \text{ или } R = \sqrt{P_1^2 + P_2^2}. \quad (3.13)$$

Анализ силовых зависимостей показывает, что касательные напряжения τ и размеры срезаемого слоя a и b прямо пропорционально влияют на силу резания (стружкообразования) R и ее составляющие P_1 и P_2 . Более сложное влияние на их уровень оказывает деформация срезаемого слоя, определяемая углом наклона условной плоскости сдвига Φ , а также направление действия силы резания (стружкообразования) R , определяемое углом действия $\omega = \eta - \gamma$. Угол действия ω - это угол между вектором силы резания (стружкообразования)

\bar{R} и вектором скорости резания \bar{v} . Величина последнего зависит от условий трения на передней поверхности режущего клина и переднего угла (рис. 3.6).

Угол η можно рассчитать по формуле $\text{tg}\eta = \text{tg}(\omega + \gamma)$,

где $\text{tg}\omega = P_2 / P_1$.

Анализ силы резания R и ее составляющих (рис. 3.6) показывает, что величина силы R изменяется при изменении переднего угла γ и режима резания (v, a, b), а также свойств обрабатываемого материала. Последние определяют изменение степени деформации при переходе срезаемого материала в стружку (угол Φ), условий трения на передней поверхности (угол η) и переднего угла γ инструмента. При этом указанные углы тесно взаимосвязаны между собой.

Любые изменения условий трения на передней поверхности инструмента сказываются на величине деформации стружки, а любые изменения в области стружкообразования – на условиях трения в области контакта на передней и задней поверхностях. Влияние зоны контакта стружки с передней поверхностью на величину деформации и силы иногда может быть даже более значительным, чем напряжение сдвига τ .

Относительный сдвиг при резании может быть определен также через скорость сдвига v_Φ :

$$\varepsilon = \frac{v_\Phi}{v \sin \Phi} = \frac{\cos \gamma}{\cos(\Phi - \gamma) \sin \Phi}, \quad (3.14)$$

а скорость деформации по формуле

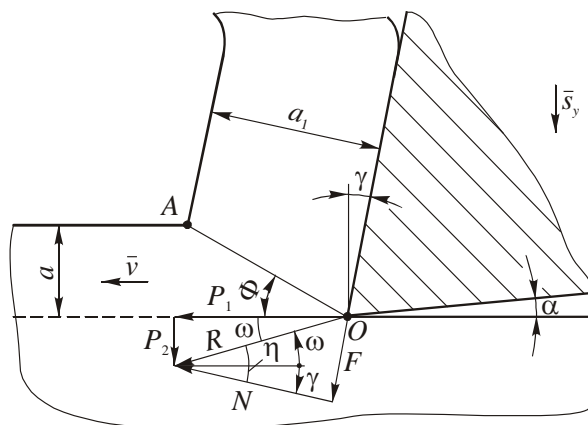


Рис. 3.6. Схема сил, действующих на передней поверхности резца при свободном резании

$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta S}{\Delta h \Delta t} = \frac{v_{\Phi}}{\Delta h} = \frac{v \cos \gamma}{\cos(\Phi - \gamma) \Delta h}, \quad (3.15)$$

где Δh – ширина зоны первичных пластических деформаций.

Из уравнения (3.15) следует, что на скорость деформации $\dot{\epsilon}$ наибольшее влияние оказывает скорость резания v . При очень узкой зоне деформации Δh , которая составляет десятые доли миллиметра, скорость деформации $\dot{\epsilon}$ достигает очень больших значений. Например, при резании латуни резцом с углом $\gamma = 17^\circ$ и скоростью $v = 250$ м/мин скорость деформации $\dot{\epsilon} = 2,4 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ [17]. Таким образом, при резании скорость деформации по сравнению с механическими испытаниями выше в 10^6 раз, а степень деформации в несколько раз выше, чем при других видах пластической деформации. При этом деформация протекает при высоких температурах и давлениях на передней поверхности режущего клина.

Таким образом, процесс резания металлов является процессом огромной пластической деформации протекающий с высокой скоростью. Поэтому многие закономерности этого процесса в настоящее время не могут быть установлены чисто теоретически и являются результатом экспериментально-теоретических исследований.

3.2.6. Влияние обрабатываемого материала на силы на задней поверхности инструмента

Силы на задней поверхности инструмента интересовали многих исследователей. 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.

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. 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.

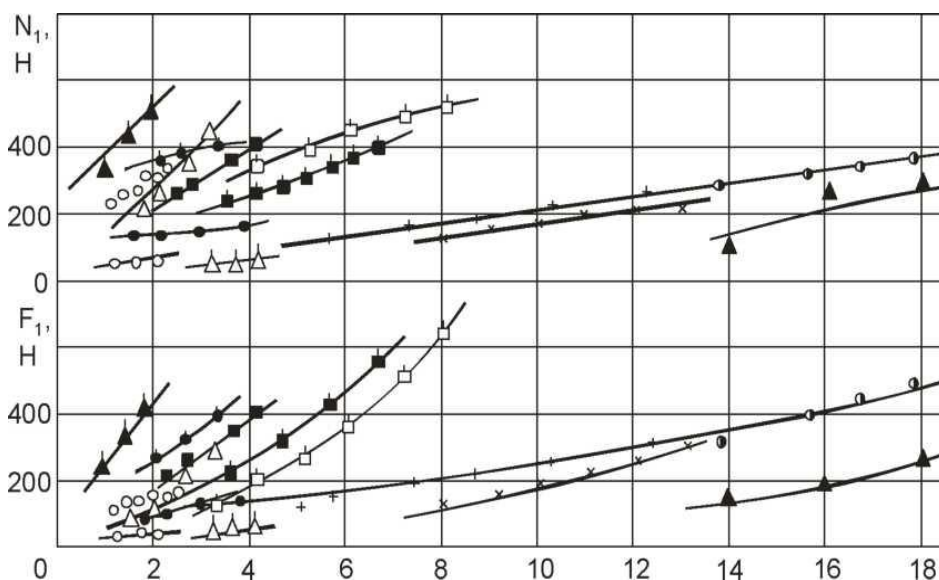


Рис. 3.7. Влияние продольной усадки стружки K (ξ) на нормальную N_1 и касательную F_1 силы задней поверхности (М.Ф. Полетика) [17]

С понижением коэффициента трения нормальная сила на задней поверхности значительно возрастает. 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.

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 Байкалова В.В. было показано отсутствие влияния скорости резания на силы при постоянном угле действия.

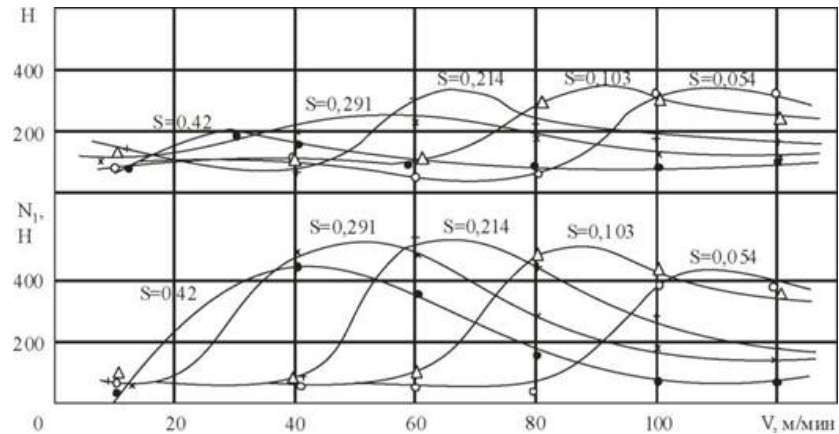


Рис. 3.8. Влияние скорости резания на силы задней поверхности при точении чугуна (Байкалов А.К.) [17]

В работах по исследованию распределения контактных нагрузок на задней поверхности методом разрезного резца при строгании латуни Л63 отмечается незначительное уменьшение контактных нагрузок при введении смазки [Остафьев В.А., [17].

3.3. Исследование температуры резания и распределения температуры в режущем клине

Стойкость режущего инструмента в основном зависит от температуры рабочих поверхностей инструмента. Можно выделить четыре группы методов определения температуры резания и температурного поля в режущем клине.

К первой группе относится метод, с помощью которого измеряется только средняя температура резания – метод естественной термо-ЭДС.

Ко второй группе принадлежат методы, с помощью которых измеряется температура узкоограниченных участков зоны резания или резца, например: метод искусственной термопары; оптический и радиационный методы.

К третьей группе относятся методы, позволяющие сразу экспериментально определить распределение температуры (температурные поля) на определенных участках изделия или резца: метод изучения цветов побежалости (очень неточный), метод термочувствительных покрытий (термокрасок),

видеосъёмка или фотографирование в инфракрасном свете с последующим преобразованием в видимый участок спектра при использовании тепловизора.

К четвёртой группе относятся расчётные и аналоговые методы, которые требуют начальных экспериментальных данных, полученных непосредственно при резании.

Наиболее простым способом определения средней температуры рабочих поверхностей инструмента (*температуры резания*) является способ *естественной термо-ЭДС* (электродвижущей силы)

(рис. 3.9), который основан на физическом эффекте возникновения разности потенциалов при нагреве места спая разнородных материалов. Как известно, при нагреве места спая проволок из двух

разнородных металлов, например железо — константан, медь — константан, платина — иридий и т.д., в нем образуются заряды противоположных знаков. Если свободные концы проволок соединить, то в цепи возникает термоток, электродвижущая сила которого пропорциональна разности температур места спая и холодных концов проволок.

Величину электродвижущей силы можно измерять с помощью микроамперметра. Чтобы определить среднюю температуру резания необходимо показание микроамперметра умножить на тарировочный коэффициент, который определяют при нагреве в печи места спая инструментального и обрабатываемых материалов и измерении при этом силы тока.

Более удобным и точным способом является видеосъёмка или фотографирование при использовании тепловизора, но при этом должен быть доступ к боковой поверхности инструмента. Наиболее просто это реализуется при свободном прямоугольном течении диска из обрабатываемого материала.

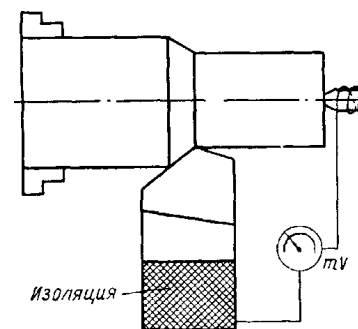


Рис. 3.9. Упрощенная схема измерения средней температуры резания (метод естественной термопары)

На рис. 3.10 представлено распределение температуры в стружке, заготовке и токарном резце, полученные расчётом методом конечных элементов по данным тепловизора и искусственных термопар. Наибольшая температура на поверхности резца наблюдается непосредственно у режущей кромки (900 °С), а также на небольшом удалении от неё (900 °С) (рис. 3.10, а, в, г). Это подтверждает версию о том, что тепло не сразу доходит до прирезцовой части стружки и передней поверхности инструмента из средней части зоны стружкообразования.

Большая температура непосредственно у режущей кромки объясняется ухудшением теплоотвода.

Сравнительно небольшая температура в области сдвига (200-340 °С) объясняется тем, что не всё тепло, образующееся при больших пластических деформациях в этой зоне, успевает дойти до боковой поверхности рассматриваемой области.

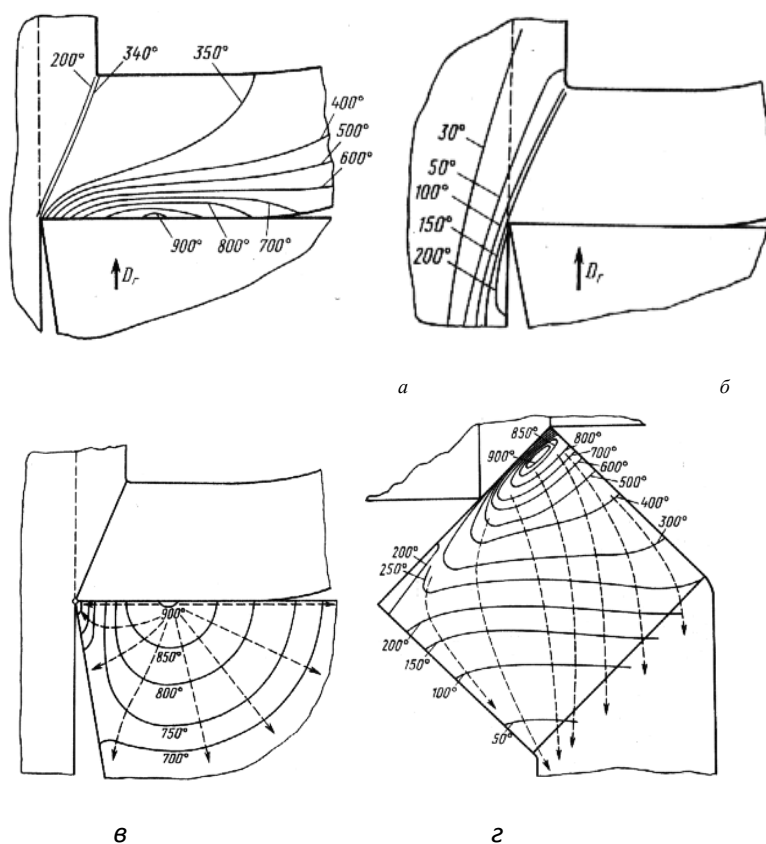


Рис. 3.10. Распределение температуры в стружке (а), заготовке (б), режущем клине (в) и на передней поверхности резца (г) при резании стали 40Х резцом из Т15К6. $V=150$ м/мин, $S=0,3$ мм/об, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=10^\circ$, $\varphi=45^\circ$.

Температура обрабатываемого материала в зоне стружкообразования должна учитываться при расчёте сил резания, в зоне контакта стружки с режущим инструментом должна учитываться при расчёте сил трения, а температура в режущем клине – при оценке его прочности.

3.4. Изучение распределения контактных нагрузок на передней и задней поверхностях

Для исследования распределения контактных нагрузок на передней поверхности инструмента может быть использован поляризационно-оптический метод. Резец изготавливается из оптически активного материала, например, оргстекла, материал которого изменяет свои оптические свойства при изменении внутреннего напряжения. При прохождении через прозрачный плоский резец поляризованный монохроматический свет образует на экране чередующиеся полосы вследствие интерференции света. Чем ближе полосы друг к другу, тем больше главные напряжения в просвечиваемой области.

Чтобы определить напряжения количественно, пластину из используемого оптически активного материала предварительно тарируют – сжимают постепенно увеличивающейся нагрузкой P до тех пор, пока не появится тёмная полоса. Рассчитывают напряжение при этой нагрузке $\sigma = P/(b \times a)$, МПа, где P – сила сжатия, Н; b – ширина пластины, м; a – толщина пластины, м. Это напряжение будет в рассматриваемой области, если появится только одна тёмная полоса. После этого нагрузку опять постепенно увеличивают до появления очередной полосы, после

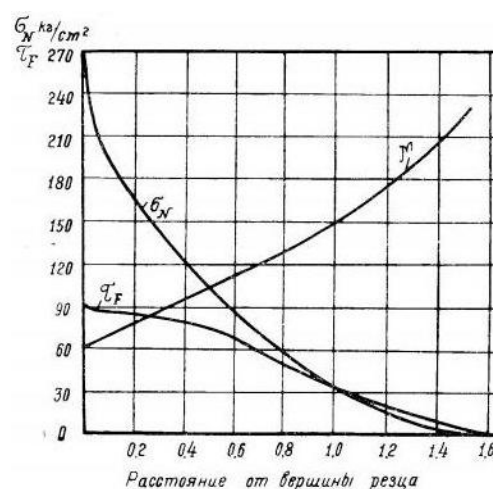


Рис. 3.11. Распределение нормальных и касательных напряжений на передней поверхности при обработке свинца [4]

чего производится расчёт напряжения для второй полосы и т.д.

В процессе резания диска из обрабатываемого материала плоским резцом, ширина которого немного больше толщины диска, резец просвечивается поляризованным монохроматическим светом. При этом считается количество полос и определяется напряжение на линии одинаковых главных напряжений.

Таким образом определяются внутренние напряжения в режущем клине. Считается, что выходящая на переднюю поверхность полоса свидетельствует о соответствующем напряжении и на передней поверхности. На основании этого строится кривая распределения нормальной контактной нагрузки на передней поверхности (рис.3.11).

При использовании динамометра измеряются технологические составляющие силы резания – P_z , P_y и P_x .

При анализе контактных процессов оперируют физическими составляющими силы резания. На переднюю поверхность инструмента при резании действуют сила трения F , направленная касательно к передней поверхности инструмента, и нормальная сила N , направленная перпендикулярно передней поверхности инструмента.

По виду распределения контактных нагрузок классифицируются:

1. Сосредоточенная нагрузка. Обычно её прикладывают на расстоянии 0,3 от длины контакта стружки с передней поверхностью, учитывая, что наибольшее нормальное контактное напряжение находится около режущей

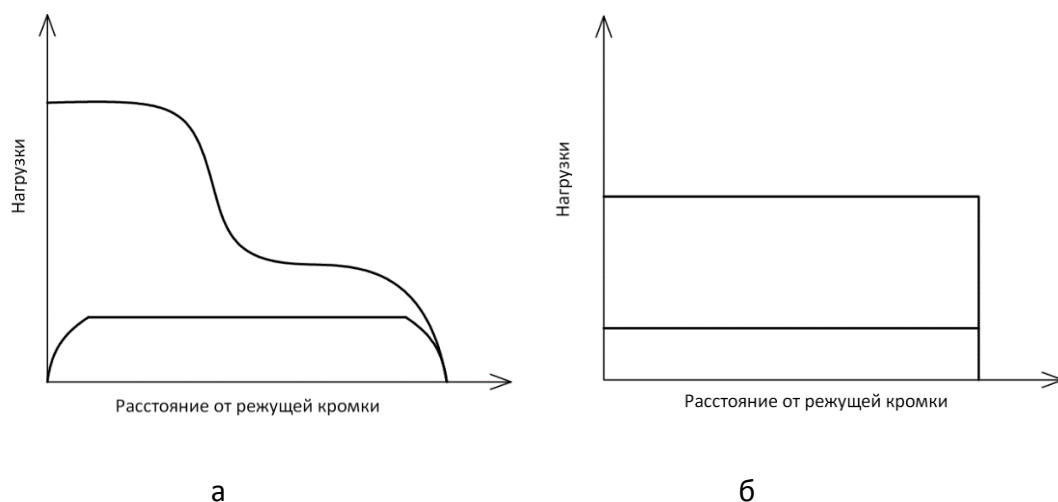


Рис. 3.12. Виды распределения контактных нагрузок на рабочей поверхности:
а – реальное распределение; б – равномерно распределённая

кромки (рис. 3.12, а);

2. Равномерно распределённая (Рис. 3.12, б);

3. Нагрузка, распределённая по установленному закону (реальное распределение, полученное с точностью, достижимой на данный период уровнем развития техники и технологий) (Рис. 3.12, а);

Аналогично проводится исследования распределения контактных нагрузок на задней поверхности резца [12]. Для острозаточенного неизношенного резца контакт задней поверхности инструмента с поверхностью заготовки слишком мал, чтобы зафиксировать изменения нагрузки. В связи с этим нагрузки на задней поверхности острого инструмента считают пренебрежимо малыми по сравнению с силами на передней поверхности, а распределение их принимается по закону треугольника. Однако при износе инструмента фаска износа по задней поверхности увеличивается настолько, что нагрузки на ней становятся сопоставимыми с нагрузками на передней поверхности, а порой и превышают их, поэтому требуется изучение их величины и характера распределения.

При малой ширине фаски износа на задней поверхности ($h_3 \leq 0,2$ мм) обычно считается, на ней действует равномерное распределение.

Существует три основных метода исследования контактных напряжений. Наиболее надёжный – использование разрезного резца. Для его применения необходим четырёхкомпонентный динамометр, который был сконструирован в ТПИ Красильниковым В.А. специально для применения разрезного резца (рис. 4.13). Динамометр состоит из двух поясов упругих элементов – нижнего и верхнего, на них наклеены датчики, которые

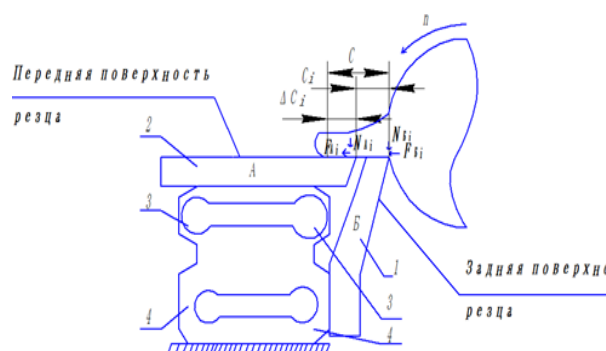


Рис. 3.13. Схема работы динамометра при исследовании напряжений на передней поверхности

преобразуют упругую деформацию от силы резания в электрический сигнал. Этот сигнал усиливается и поступает на регистрирующие приборы, например, в ноутбук.

Разрезной резец состоит из двух пластин (рис. 3.13). Пластина Б крепится к нижним упругим элементам, пластина А – к верхним упругим элементам. Увеличивая последовательно длину участка ΔC_i пластины А, измеряем нормальную N_i и касательную F_i силы резания, действующие на этом участке и рассчитываем удельные контактные нагрузки как отношение приращения этих сил к приращению площади её поверхности.

Изготавливаем пластины А и Б таким образом, чтобы расстояние C_B от режущей кромки до косо́го зазора с углом ψ_B между пластинами было больше длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента С ($C_B > C$) (рис. 3.14, сверху). Рассмотрим методику исследования распределения контактных нагрузок при свободном прямоугольном точении диска резцом с передним углом $\gamma = 0^\circ$. Если передний угол не равен нулю, то выполняем расчёт физических составляющих силы резания N_i и F_i с учётом измеряемых технологических составляющих P_{zi} и P_{yi} :

$$N_i = P_{zi} \cos \gamma + P_{yi} \cdot \sin \gamma, \quad (3.16)$$

$$F_i = P_{yi} \cos \gamma + P_{zi} \sin \gamma. \quad (3.17)$$

Вначале режем на участке 0, где контакт стружки только с пластиной Б. На рис. 3.14 этот участок расположен сверху. Размер b_c – это ширина контакта стружки с передней поверхностью инструмента, она будет всё время постоянной в данной серии

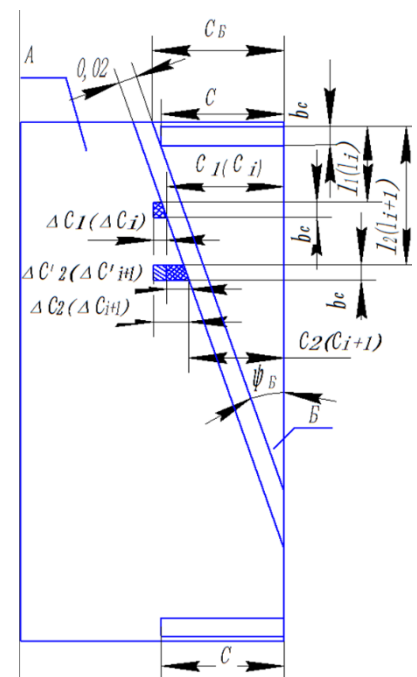


Рис. 3.14. Вид сверху на пластины разрезного резца

экспериментов. Контакта стружки с пластиной **A** нет, поэтому силы резания N_{Ai} и F_{Ai} на пластине **A** будут равны нулю.

Затем сдвигаем динамометр вместе с разрезным резцом вдоль периферии диска на расстояние l_1 до положения 1. На пластине **A** на участке ΔC_1 действуют силы резания N_{A1} и F_{A1} . Отношение этих сил к площади контакта есть **удельная** нормальная и касательная сила резания на участке ΔC_1 . Нормальная удельная нагрузка $q_{N1} = N_{A1}/(\Delta C_1 \cdot bc)$.

Аналогично рассчитывается касательная удельная нагрузка $q_{F1} = F_{A1}/(\Delta C_1 \cdot bc)$.

Снова сдвигаем динамометр с разрезным резцом вдоль периферии диска на расстояние l_2 до положения 2. На пластине **A** на участке ΔC_2 действуют силы резания N_{A2} и F_{A2} .

Приращение площади участка 2 ($i + 1$) происходит на длину $\Delta C'_2$: $\Delta C'_2 = \Delta C_2 - \Delta C_1$. Приращение нормальной силы на этом участке $\Delta C'_2$ рассчитывается по формуле: $\Delta N'_{A2} = N_{A2} - N_{A1}$, или в общем виде: $\Delta N'_{Ai+1} = N_{Ai+1} - N_{Ai}$.

Отношение приращения этой нормальной силы к приращению площади контакта есть **удельная** нормальная сила резания на участке $\Delta C'_2$:

$$qN'_2 = \Delta N'_{A2} / (\Delta C'_2 \cdot bc), \quad (3.18a)$$

или в общем виде:

$$qN'_{i+1} = (N_{Ai+1} - N_{Ai}) / [(\Delta C_{i+1} - \Delta C_i) \cdot bc]. \quad (3.18б)$$

Аналогично рассчитывается касательная удельную нагрузку qF_2 на участке $\Delta C'_2$:

$$qF'_{i+1} = (FA_{i+1} - FA_i) / [(\Delta C_{i+1} - \Delta C_i) \cdot bc]. \quad (3.19)$$

При смещении динамометра вместе с разрезным резцом вдоль периферии диска на небольшое расстояние l_i приращение длины контакта стружки с пластиной **A** ΔC_i будет небольшое ($\Delta C_i \rightarrow 0$), приращение площади будет небольшое, поэтому удельная нормальная сила на этом участке будет считаться как нормальное напряжение σ_N ($\sigma_{Ni} \approx q_{Ni}$).

Аналогично и для касательного напряжения τ_F ($\tau_{Fi} \approx q_{Fi}$).

При измерении контактных нагрузок [38] на фаске задней поверхности резца при прямоугольном свободном резании диска из обрабатываемого материала измеряются силы, действующие на пластину А и на пластину Б (рис.3.15). Зазор между пластинами проходит по задней поверхности под углом φ к режущей кромки широкого составного резца. Увеличивая последовательно длину участка h_{31} при неизменной длине фаски износа по задней поверхности h_3 , рассчитываем контактные нагрузки как отношение приращения силы к приращению площади контакта на пластине А.

Многолетний опыт применения метода разрезного резца показывает, что необходимо не только контролировать неизменность общих технологических составляющих силы резания P_z и P_y , но и учитывать разность измерительных перемещений частей разрезного резца в процессе резания.

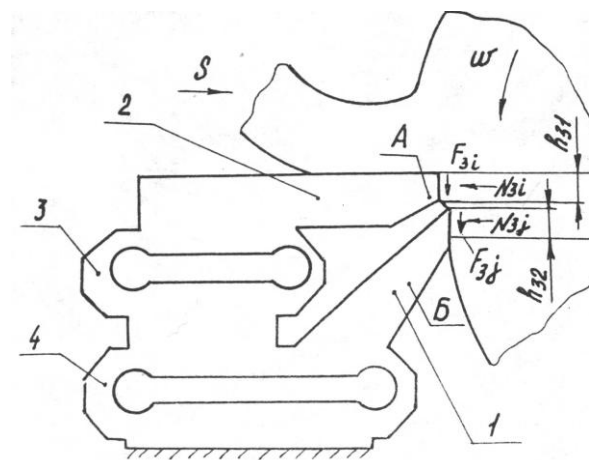


Рис. 3.15. Схема работы динамометра при исследовании контактных нагрузок на задней поверхности резца на токарном станке при горизонтальной подаче s

При использовании вышеупомянутого четырёхкомпонентного динамометра, сконструированного специально для применения разрезного резца, на токарном станке при резании с горизонтальной радиальной подачей происходят, как и следовало ожидать, упругие деформации упругих измерительных элементов. При врезании на площадку длиной $h_{3i} = h_{31}$ пластины А действует сила больше, чем на площадку $h_{3j} = h_{32}$ пластины Б ($h_{3i} + h_{3j} = h_3$), что вызывает большую деформацию упругих измерительных элементов 3 (рис. 3.15). Пластина А смещается влево относительно пластины Б

и появившийся острый уступ пластины Б начинает срезать дополнительную стружку с поверхности резания. Щель между пластинами забивается, что приводит к нарушению условий измерения сил.

Анализ вариантов различных схем измерений показывает, что для устранения указанных нежелательных явлений необходимо изменить либо конструкцию динамометра, либо схему резания. Второй путь менее трудоемкий. По этому варианту резание необходимо выполнять не на токарном станке, а на горизонтально фрезерном при вертикальной подаче с стола станка (рис. 3.16).

В этом случае приращение сил на задней поверхности резца будет измеряться на пластине Б.

При врезании под действием сил на площадке h_{31} пластина А переместится немного вниз и влево вследствие упругой деформации измерительных элементов 4.

Пластина Б вместе с измерительными элементами 3, закрепленными на упругих элементах 4, тоже переместится

в этом же направлении. Поэтому уступа между пластинами не возникает. Суммарные (общие) технологические составляющие силы резания P_y и P_z измеряются с помощью упругих измерительных элементов 4, а приращения сил на задней поверхности – с помощью упругих элементов 3.

Удельные нормальные контактные нагрузки на задней поверхности на участке h_{3i} рассчитываются по формуле

$$q_{N1i} = \Delta N_{1i} / (\Delta h_{3i} \cdot b_1) = \Delta P_{yi} / (\Delta h_{3i} \cdot b_1), \quad (3.20)$$

где ΔN_{1i} – увеличение нормальной силы N_1 на задней поверхности пластины Б за счёт увеличения длины контакта заготовки с задней

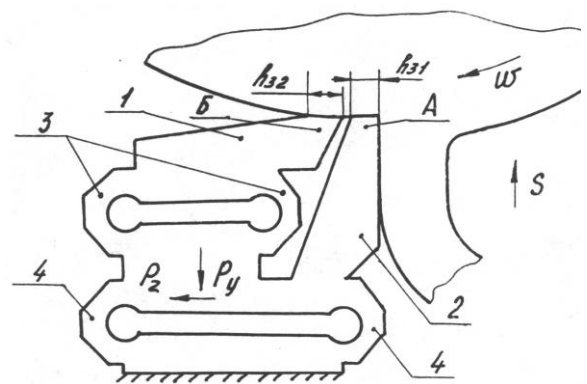


Рис. 3.16. Схема работы динамометра при исследовании контактных нагрузок на задней поверхности резца на горизонтально-фрезерном станке при вертикальной подаче s

поверхностью пластины Б на величину Δh_{3i} ; b_1 – ширина контакта заготовки с задней поверхностью инструмента. При достаточно большой ширине диска $b_d \geq 4$ мм уширение диска в процентном отношении небольшое, поэтому можно принять $b_1 \approx b_d$. ΔP_{yi} – увеличение радиальной составляющей силы резания P_y на пластине А.

Удельные касательные контактные нагрузки рассчитываются по формуле

$$q_{F1i} = \Delta F_{1i} / (\Delta h_{3i} \cdot b_1) = \Delta P_{zi} / (\Delta h_{3i} \cdot b_1), \quad (3.21)$$

где ΔF_{1i} – увеличение касательной силы F_1 на задней поверхности пластины Б за счёт увеличения длины контакта заготовки с задней поверхностью пластины Б на величину Δh_{3i} , ΔP_{zi} – увеличение тангенциальной составляющей силы резания P_z на пластине А.

При $\Delta h_{3i} \rightarrow 0$ удельные нормальные нагрузки q_{N1} приближаются к нормальным напряжениям σ_{h3} , действующим на задней поверхности инструмента ($q_{N1i} \approx \sigma_{N1i}$ или $q_{N1i} = \sigma_{h3i}$), а удельные касательные нагрузки q_{F1} приближаются к касательным напряжениям τ_{h3} на задней поверхности инструмента ($q_{F1i} \approx \tau_{F1i}$ или $\tau_{F1i} = \tau_{h3i}$).

Зазор между пластинами А и Б контролируется пластинчатым щупом толщиной 0,02 мм. При меньшем зазоре возможно соприкосновение пластин, а значит нарушение процесса измерения, что проявляется в уменьшении сил, регистрируемых на пластине Б, изменяются также общие технологические составляющие силы резания P_y и P_z , измеряемые с помощью упругих измерительных элементов 4. Большая величина зазора приводит к попаданию обрабатываемого материала в щель, что приводит к выкрашиванию рабочих пластин и изменению технологических составляющих силы резания P_y и P_z , измеряемых с помощью упругих измерительных элементов 4. В ходе исследований отсутствие контакта пластин контролируется также на просвет.

При исследовании распределения контактных напряжений на фаске задней поверхности (на искусственной фаске износа) выяснилось, что наибольшие контактные напряжения могут находиться как у режущей кромки (см. рис. 3.11), так и на некотором расстоянии от неё (рис. 3.17).

В целях выяснения причин расхождения экспериментальных данных в исследованиях, проведенными разными авторами, Козловым В.Н. были проведены опыты по свободному точению дисков из разных обрабатываемых

материалов с использованием разрезного резца. 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. 3.18).

По мнению Полетики М.Ф. и Козлова В.Н. [4] экстремальный характер эпюр нормальных контактных нагрузок связан с прогибом поверхности резания (среза) от действия радиальной составляющей силы резания на передней поверхности инструмента, действующей как жёсткий штамп на упругую полуплоскость (рис. 3.19).

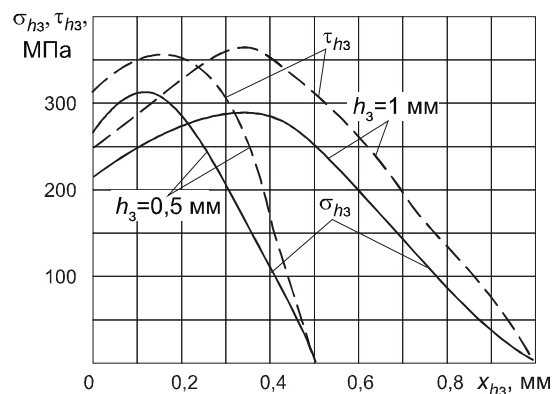


Рис. 3.17. Распределение контактных нагрузок на фаске задней поверхности резца при точении алюминиевого диска [4]. $\gamma=10^\circ$; $\alpha_\phi=0^\circ$; $v=0,6$ м/мин; $s=0,2$ мм/об, $h_3=1$ мм и $h_3=0,5$ мм

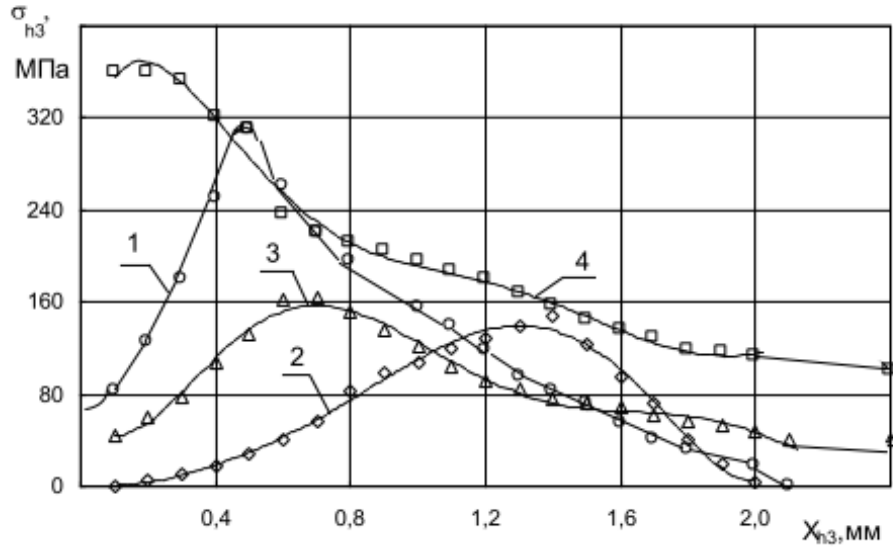


Рис. 3.18. Распределение нормальных контактных нагрузок на фаске задней поверхности инструмента, $\gamma=0^\circ$, $\alpha_\phi=0^\circ$: Л63-Р6М5: 1 - $S=0,06$ мм/об, $V=100$ м/мин; 2 - $S=0,21$ мм/об, $V=100$ м/мин; 3 - $S=0,21$ мм/об, $V=217$ м/мин. 4 - ЛМЦА 57-3-1 - Р6М5, $S=0,41$ мм/об, $V=100$ м/мин.

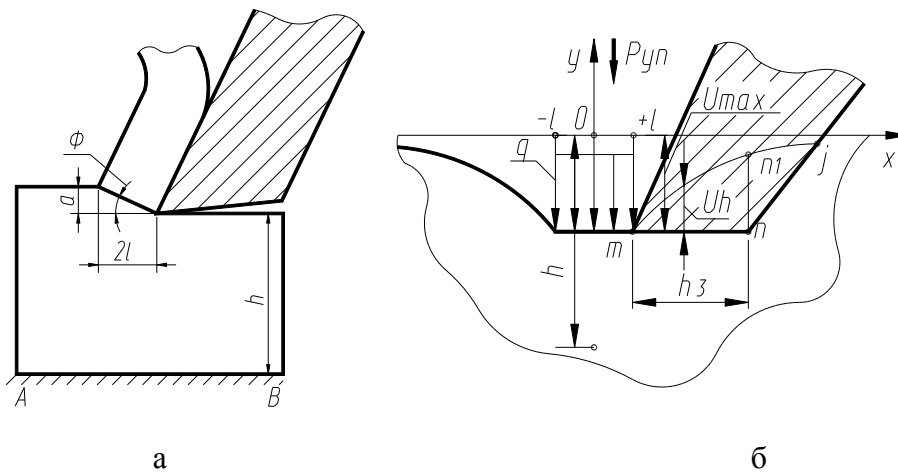


Рис. 3.19. Прогиб обработанной поверхности под действием силы P_{yn} на передней поверхности

Влияние характера стружкообразования проявляется и при резании титанового сплава ВТ3-1, дающего элементную стружку (рис. 3.20).

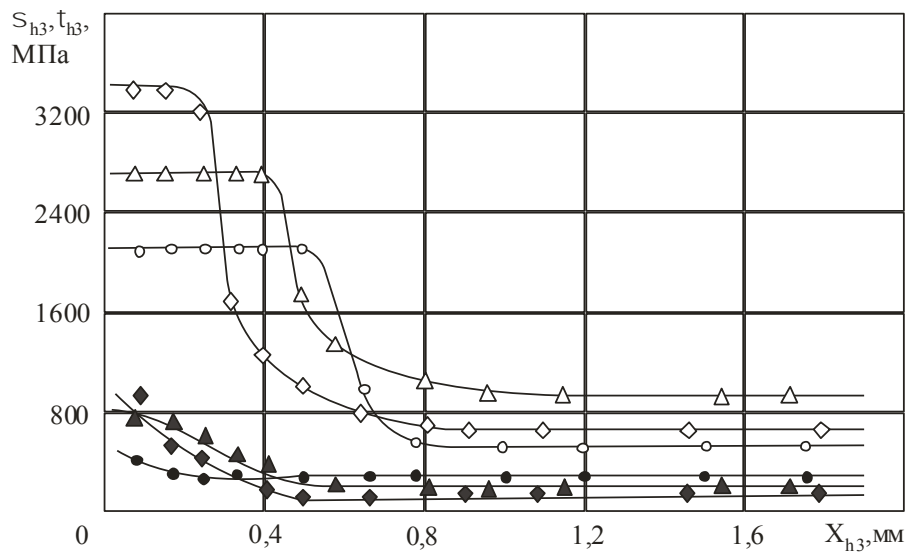


Рис.3.20. Распределение нормальных σ_{h_3} (\diamond , Δ , \circ) и касательных τ_{h_3} (\blacklozenge , \blacktriangle , \bullet) контактных нагрузок на фаске задней поверхности инструмента при резании титанового сплава. ВТЗ-1 - ВК8, $\gamma=0^0$, $\alpha_\phi=0^0$, $V=60$ м/мин.: \diamond, \blacklozenge - $S=0,41$ мм/об.; Δ, \blacktriangle - $S=0,21$ мм/об.; \circ, \bullet - $S=0,11$ мм/об.

Обращает на себя внимание большая величина нормального контактного напряжения у режущей кромки ($\sigma_{h_3} = 3400-2200$ МПа), которые быстро уменьшаются ($\sigma_{h_3} = 1000-600$ МПа) при удалении от режущей кромки, что объясняет особенность изнашивания твёрдосплавных резцов: очень высокая интенсивность износа в начальный период до $h_3 \approx 0,2-0,5$ мм и работоспособность инструмента даже при большом износе $h_3 > 1,2..2,5$ мм.

Быстрое уменьшение нормальных контактных напряжений и малая величина касательных контактных напряжений объясняется высокой температурой обрабатываемого материала на фаске задней поверхности (до 1200 °С, что подтверждается плавлением приконтактного слоя у титанового сплава ВТЗ-1 при большом износе. Из-за малого коэффициента теплопроводности титанового сплава выделяющееся тепло концентрируется в местах контакта с инструментом и создаётся эффект появления слоя по состоянию близкому к вязкой жидкости.

3.5. Исследование распределения внутренних напряжений в режущем клине

Существует несколько основных методов исследования распределения внутренних напряжений в инструменте.

1. Поляризационно-оптический метод.
2. Интерференционный метод
3. Метод конечных элементов и другие численные методы.

3.5.1. Поляризационно-оптический метод

При исследованиях напряжённого состояния поляризационно-оптическим методом применяют образцы из однородного, изотропного прозрачного материала, например, оргстекла. При действии напряжений эти материалы становятся

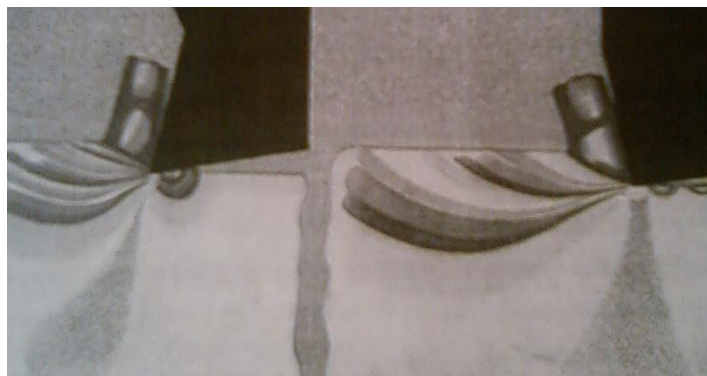


Рис. 3.21. Изохромы при резании целлулоида резцами с различными передними углами

двоякопреломляющими. Если пропустить пучок поляризованного света через прозрачную модель, находящуюся в напряжённом состоянии, получается окрашенное изображение, по которому можно найти распределение напряжений (рис. 3.21).

Лучи, проходящие через образец, в разных точках и разных направлениях будут иметь разную скорость прохождения, в результате получится сдвиг фаз световых колебаний. опыты показывают, что разность скоростей света пропорциональна разности напряжений.

Важным достоинством поляризационно-оптического метода является то, что картины распределения напряжений, получаемые оптическим методом на прозрачных веществах, и все выводы остаются справедливыми для любых непрозрачных однородных материалов. Иначе говоря, картина распределения

напряжений, получаемая оптическим методом, не зависит от природы испытуемого материала. Вследствие этого оптический метод может применяться для моделирования процесса резания с разной геометрией в главной секущей плоскости и толщиной среза.

3.5.2. Интерференционный метод (метод лазерной интерферометрии)

Для исследований процессов при резании стали и других прочных и твёрдых материалов может быть использован метод лазерной интерферометрии.

Сущность этого метода заключается в том, что на боковую поверхность заготовки и инструмента направляется поляризованный монохроматический луч лазера (рис. 3.22). Отражённый от резца и заготовки свет попадает

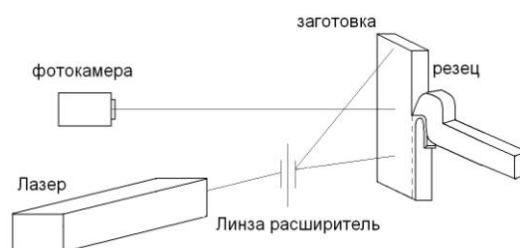


Рис. 3.22. Схема съемки спекл-фотографии

на экран, где происходит интерференция волн света (наложение) базового и отражённого излучения. При деформации боковая поверхность резца и заготовки немного уширяется и расстояние до лазера уменьшается на сотые и тысячные доли микрометра, что и отражается на экране. Чем больше деформация объекта исследования, тем больше количество полос будет наблюдаться на экране.

3.5.3. Метод конечных элементов

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 (рис. 3.23). 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.

Это связано и с большей точностью расчета, и с наличием готовых универсальных программ для его реализации.

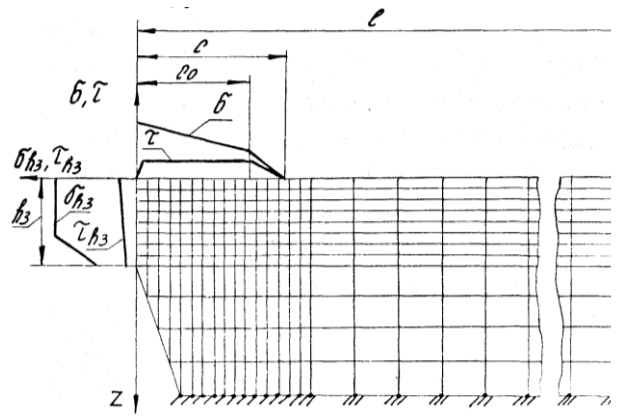


Рис. 3.23. Исходная схема расчёта напряжённно-деформированного состояния режущего клина изношенного инструмента

3.6. Оценка прочности режущего инструмента

Для оценки прочности режущего инструмента необходимо выбрать определённый критерий прочности, с которым будут сравниваться рассчитанные главные напряжения. При всестороннем действии нагрузок материал может выдержать напряжение намного большее, чем при одноосном нагружении. Поэтому необходимо учитывать все нагрузки, действующие одновременно на образец (элемент инструмента), а также и температуру в рассматриваемой области.

В настоящее время широко используется критерий предельного состояния, разработанный в институте проблем прочности АН УССР Г.С. Писаренко и А.А. Лебедевым. Основанный на современных представлениях о кинетике деформирования и разрушения материалов, критерий Писаренко-Лебедева обладает высокой достоверностью (выше 92%) и описывается следующим выражением:

$$\sigma_{\text{н}} = \chi \times \sigma_{\tau} + (1 - \chi) \times \sigma \times P \leq \sigma_{\text{в}}, \quad (3.21)$$

где: $\chi = \sigma_{\text{с}} / \sigma_{\text{-с}}$ - 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_i - интенсивность напряжений в рассматриваемой точке:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (3.22)$$

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

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

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

$$\sigma_{\eta} = 0,24 \cdot \sigma_i + 0,76 \cdot \sigma_1 \cdot 0,8^{1 - \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_1}} \leq \sigma_{\eta}; \quad (3.23)$$

Запас прочности инструментального материала:

$$n = \sigma_{\epsilon} / \sigma_{\eta} \quad (3.24)$$

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.

3.7. Постановка задачи на основе литературного обзора

На основе литературного обзора были сформулированы следующие основные задачи исследований:

1. Определение распределения внешних контактных нагрузок на поверхностях инструментов.
2. Создание 3D - модели режущего инструмента.

3. Изучение напряжённо-деформированного состояния (НДС) и прочности режущего клина с использованием метода конечных элементов.
4. Выявление причин отказа режущих инструментов при обработке по результатам исследований.
5. Исследование НДС инструмента при разном характере распределения контактных нагрузок на передней и задней поверхностях инструмента.
6. Исследование влияния формы и геометрических параметров фрезы на НДС режущего клина.
7. Исследование влияния подачи, глубины и скорости резания на НДС режущего клина.
8. Исследование влияния инструментального материала на НДС режущего клина.
9. Исследование влияния обрабатываемого материала на НДС режущего клина.
10. Определение оптимальной геометрии режущего клина с точки зрения его прочности при черновой обработке стали.

4. Методика выполнения работы

4.1. Приложение внешней нагрузки на заднюю и переднюю поверхности

При использовании программы ANSYS задавать приложение внешней нагрузки надо на **всю** поверхность. При действии неравномерной нагрузки на участке контакта стружки с передней поверхностью возникает необходимость поверхность контакта инструмента со стружкой делить на множество поверхностей (ступенек), при этом перепад ступенек задаём небольшой, 0,001 мм, чтобы это не сказывалось на изменении геометрии передней поверхности резца.

4.2. Влияние вида распределения контактных нагрузок на передней поверхности на НДС режущего клина

При исследовании НДС резца будем рассматривать три вида распределения контактных нагрузок на передней и задней поверхностях.

1-й вид: сосредоточенная нагрузка на передней и задней поверхностях (рис.4.1, а);

2-й вид: равномерное распределение контактных нагрузок на передней и задней поверхностях (рис.4.1, б);

3-й вид: реальное распределение контактных нагрузок на передней и задней поверхностях, т.е. распределение по установленному (выявленному) закону (рис.4.1, в).

В любом из трёх видов на передней поверхности нормальная сила равна 25386 Н, касательная сила равна 5412 Н. При ширине фаски износа по задней поверхности $h_3 = 0,24$ мм на задней поверхности нормальная сила равна 3072 Н, касательная равна 768 Н.

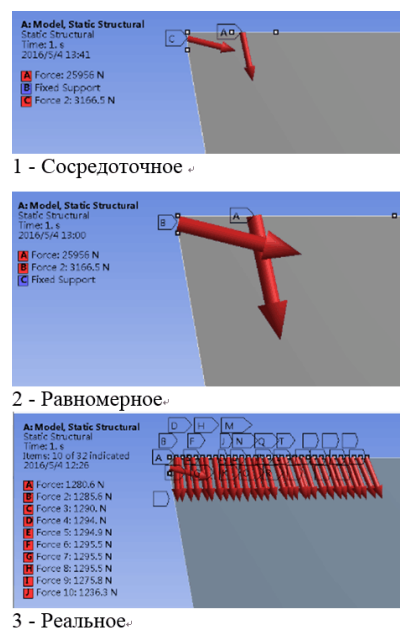


Рис. 4.1. Виды приложения контактных нагрузок на поверхностях режущей пластины

4.3. Создание модели режущего инструмента

Для упрощения исследования НДС режущего клина, мы создали модель резца как маленькую часть режущего инструмента (рис.5.4), у которой можно изменять параметры (передний угол, задний угол, толщину режущей пластины, износ на задней поверхности, образование округления режущей кромки радиусом ρ и т.д.)

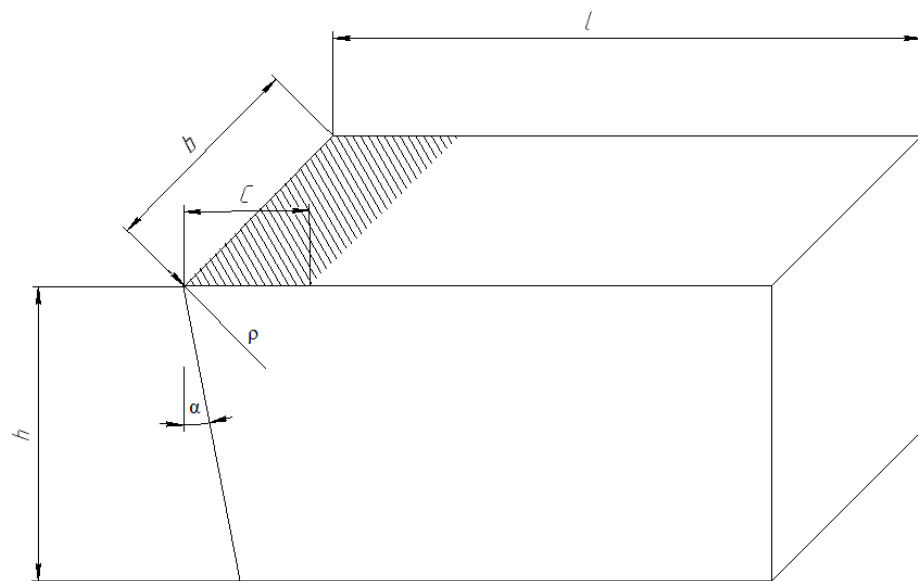

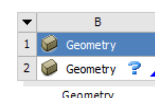


Рис. 4.2. Модель резца для исследования. a – ширина режущей пластины (режущего клина), ширина режущей пластины $b = 4,2$ мм; h – толщина модели резца, $h = 6$ мм; ρ – радиус округления режущей кромки, $\rho = 0$ мм; α – задний угол, $\alpha = 10^\circ$; γ – передний угол, $\gamma = 0^\circ$; C – длина контакта стружки с передней поверхностью, $C = 3$ мм; l – длина модели резца, $l = 9$ мм

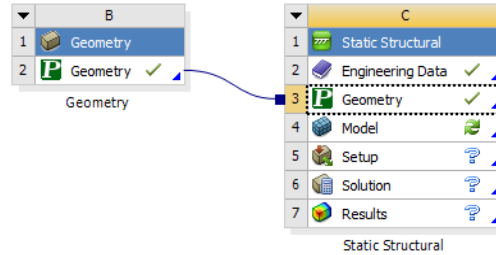
Моделирование резца в среде ANSYS выполняем в соответствии с выбранными параметрами.

Открываем программу ANSYS 14.0 (workbench).

Выбираем  Geometry и появляется значок



Щёлкаем правой кнопкой мыши **Geometry**. Импортируем файл **Резец проходной прямой x_t**. в ANSYS14.0 (workbench). Вызываем команду **Открыть**. Программа может потребовать выполнение диагностики импортирования детали: нажимаем **ОК**.



Шаг второй: пусть **Static Structural** и **Geometry** соединены. Появляется запрос: назначим материал резца, шелкнув клавишей мыши по **Engineering Data**, вводим модуль Юнга и коэффициент Пуассона, потом нажимаем



The screenshot displays the ANSYS Workbench Engineering Data interface. The 'Outline of Schematic C2: Engineering Data' shows a table with the following data:

	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data	source		Description
2	Material			
3	Structural Steel			Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5 -110.1

The 'Properties of Outline Row 3: Structural Steel' table is also visible:

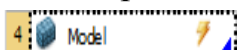
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's M...			
8	Young's Modulus	2E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.3			
10	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa		
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			

On the right, the 'Table of Properties Row 2: Density' shows:

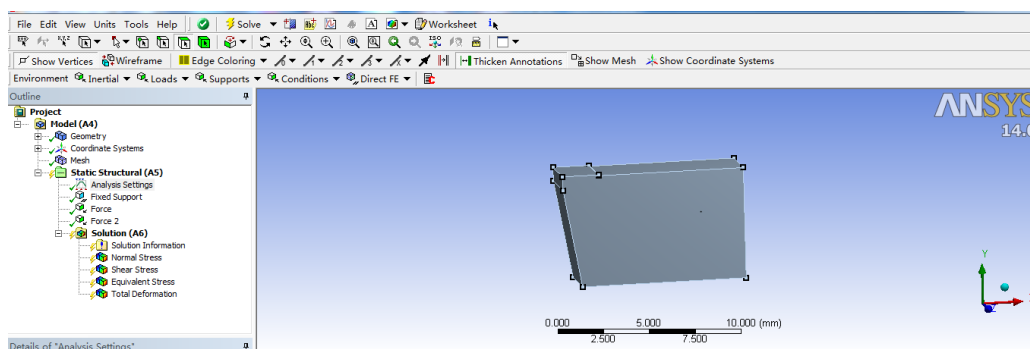
	A	B
1	Temperature (C)	Density (kg m^-3)
2		7850

Below the table is a 'Chart of Properties Row 2: Density' showing a constant density of 7850 kg m^-3 across a temperature range from -1 to 1 °C.


После завершения этих операций, щелкнув клавишей мыши.



После этого появляется окно:



В верхней части рабочего окна ANSYS 14.0 располагается основное меню и пиктограммы команд, слева браузер, а справа от браузера рабочая область, в которой происходит построение детали.

В основном меню вызываем команду геометрия  Geometry и делаем размещение параметров, которые были заданы выше.

4.4. Задание физико-механических характеристик инструментального и обрабатываемого материалов

Твёрдые сплавы, или так называемые металлокерамические сплавы, – это материалы, состоящие из карбидов вольфрама (однокарбидные), вольфрама и титана (двухкарбидные) и с добавлением тантала, ниобия и др. (трехкарбидные), связанных между собой связкой – кобальтом. Металлокерамическими их называют по способу изготовления из мелкодисперсных порошков прессованием с последующим спеканием при температуре 1 000...2 000 °С, что характерно для производства керамики.

Сплавы ВК8 из вольфрамовой группы применяется для обработки материалов резания:

1) для чернового точения при неравномерном сечении среза и прерывистом резании, строгании;

2) для черногого фрезерования, сверления, черногого рассверливания, черногого зенкерования серого чугуна, цветных металлов и их сплавов и неметаллических материалов;

3) для обработки нержавеющей высокопрочных трудно обрабатываемых сталей и сплавов, в том числе сплавов титана.

Материал твердосплавной сменной пластины инструмента выбирается ВК8, его состав: карбид вольфрама $WC = 92\%$, $Co = 8\%$. Предел прочности при изгибе, не менее 1700 Н/мм^2 ; плотность $14,5-14,8 \times 10^3 \text{ кгс/м}^3$; твердость не менее $88,0 \text{ HRA}$.

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

При создании модели в среде ANSYS, мы учитываем модуль Юнга равным $0,56\text{e}6 \text{ МПа}$ ($0,56 \times 10^6 \text{ МПа}$), и коэффициент Пуассона равным $0,2$.

Обрабатываемый материал, выберем титановый сплав ВТЗ-1 (Ti-6Al-2Mo-2Cr), т.е. основной материал – титан Ti, добавлены: алюминий $Al = 6\%$, молибден $Mo = 2\%$, хром $Cr = 2\%$.

Титановый сплав имеют хорошие физико-механические характеристики:

1) плотность титана обычно составляет около 4.51 г/см^3 , что составляет 60% от плотности стали, некоторые высокопрочные титановые сплавы по прочности не уступают многим конструкционным сталям, поэтому соотношение прочности титана (прочность / плотность) гораздо больше, чем у других конструкционных сталей;

2) высокая термическая прочность: при умеренных температурах титановые сплавы могут сохранять высокую прочность, допускают длительную работу при температуре $450 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$;

3) высокая устойчивость к коррозии, что позволяет их использовать во влажной атмосфере и в морской воде; стойкость к коррозии намного выше, чем у нержавеющей стали, обладают стресс-коррозионной стойкостью, стойкостью к щелочам, хлоридам, хлор-органических веществ, азотной и серной кислоте;

4) титановые сплавы на низкой и сверхнизкой температуре сохраняют свои механические свойства. Даже при $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ может сохранять определенную степень пластичности.

Таким образом, титан также является важным конструкционным материалом.

5. Измерение сил резания

Для измерения сил резания будем использовать высокожесткий токарный трёхкомпонентный динамометр Kistler (рис. 5.1). На мониторе компьютера, обрабатывающего результаты измерений (рис. 5.2), в окне «Edit Acquisition», вкладке «Parameter», задается время измерения, частота дискретизации, количество циклов, задержка перед началом измерения. Есть возможность выбора, сохранять и показывать результат или нет. Программа автоматически вычисляет, сколько памяти необходимо для данных параметров измерения. Так же указывается имя файла и путь к папке, в которую он будет сохранен. В окне «Edit Acquisition», вкладке «Channels & Trigger» задаются каналы, которые будут включены во время измерения и выбирается способ старта измерения. Возможен старт измерения с помощью нажатия клавиши Enter, два типа цифрового включения и аналоговый.



Рис. 5.1. Установка динамометра Kistler на токарном станке, настройка резца по высоте центров и его электроизоляция для измерения естественной термо-ЭДС

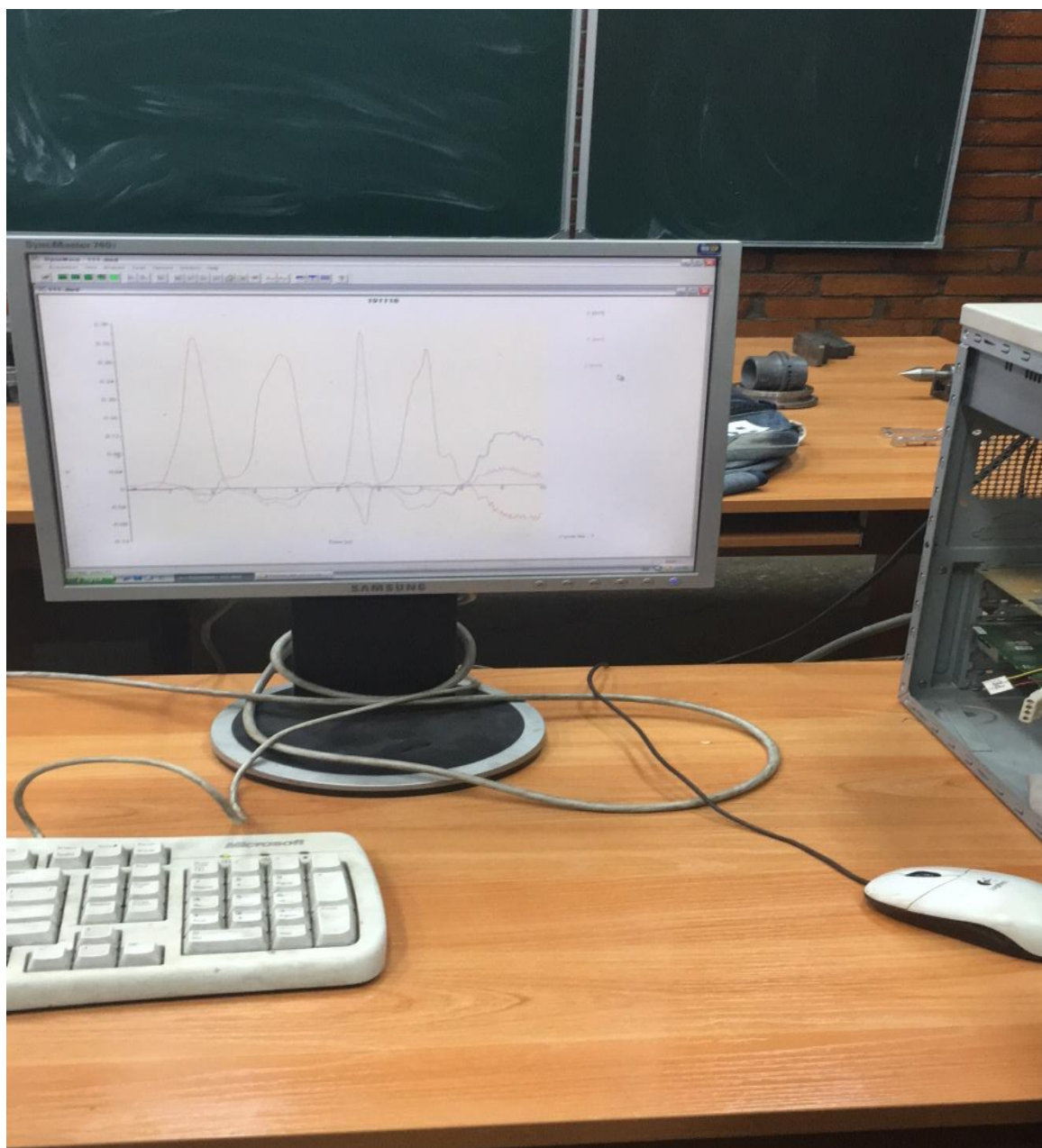


Рис. 5.2. Вывод результатов измерений на монитор компьютера, обрабатывающего электрические сигналы от динамометра Kistler после усилителя

Тарирование динамометра Kistler

Выполняли предварительную тарировку при установленных пределах измерения 1 кН в **настройках** в окне **Hardware**, в колонке «**Measuring Range**», но предельную силу при измерении установили в блоке усилителя **5 кН по всем каналам** (Таблица 5.1). Так делать не надо: необходимо, чтобы пределы измерения по каналам (максимальная нагрузка по соответствующему каналу) в настройках в «**Measuring Range**» и в блоке усилителя были одинаковыми.

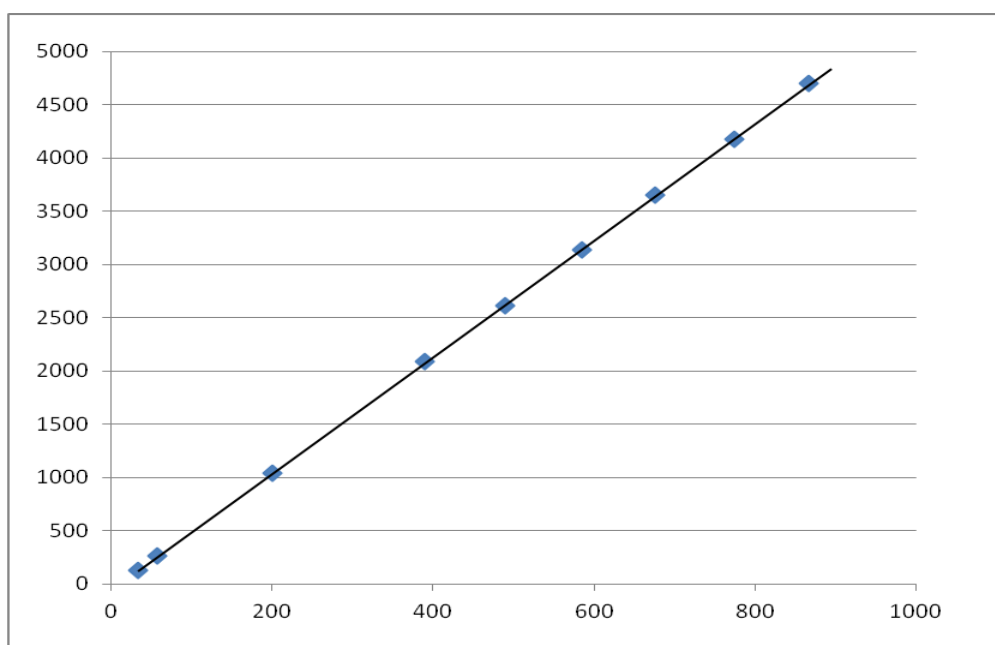
Таблица 5.1. Тарировка динамометра «Kistler» при установленных пределах **5 кН** по всем каналам усилителя и при установленных пределах измерения 1 кН в «Measuring Range». Жесткость эталонного динамометра $j_{эт}=2613$ н/мм

N	Показание индикатора эталонного динамометра Δ_i , мм	$P_{эт}=\Delta_i \times j_{эт}$, Н	$Pz_{дин}$, Н	$Pу_{дин}$, Н	$Px_{дин}$, Н
0	0				
1	0,05	130,6	33	24	8
2	0,1	261,3	58	34	22
3	0,4	1045	200	116	32
4	0,8	2090	390	263	104
5	1,0	2613	489		152
6	1,2	3135	585		173
7	1,4	3658	676		200
8	1,6	4181	775	405	249
9	1,8	4703	867	450	297

Примечание: $P_{эт}$ – величина силы на эталонном динамометре, Н;

$Pz_{дин}$, $Pу_{дин}$, $Px_{дин}$ – величина силы мониторе компьютера для динамометра **Kistler**, Н.

Сила Pz (Н) на эталонном динамометре ($Pz_{эт}$)

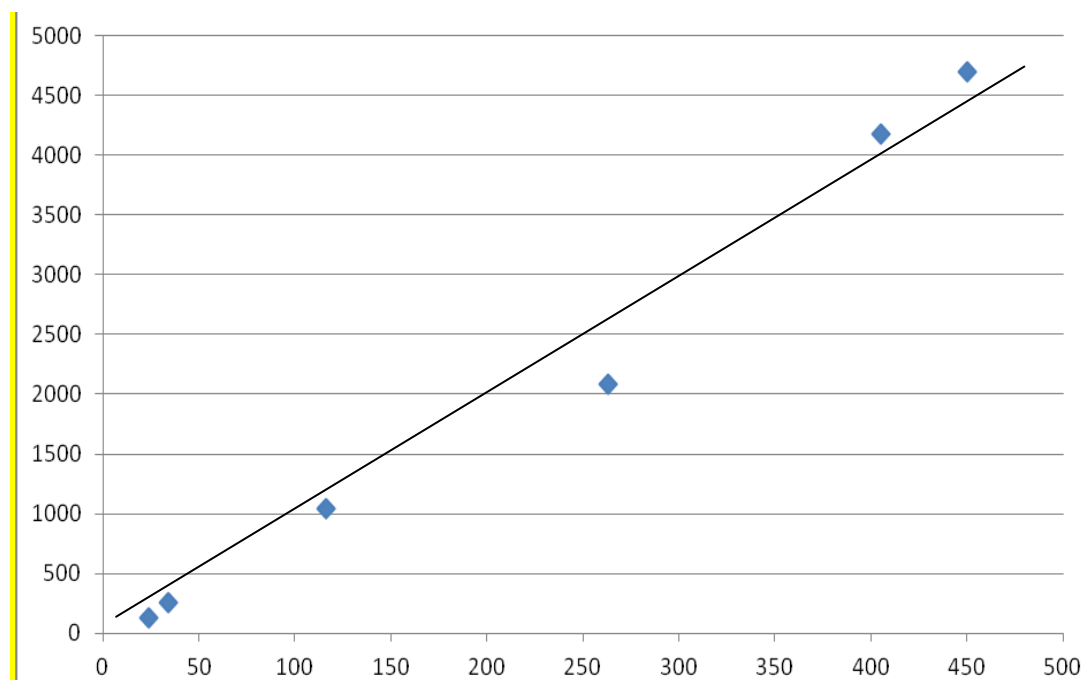


Сила по каналу Pz (Н) на экране дисплея ($Pz_{дин}$)

Рис. 5.3. Тарировочный график канала Pz

По каналу Pz тарировочный коэффициент $K_{Pz} = Pz_{эт} / Pz_{дин} = 5,0188$.

Сила P_y (Н) на эталонном динамометре (P_y эт)

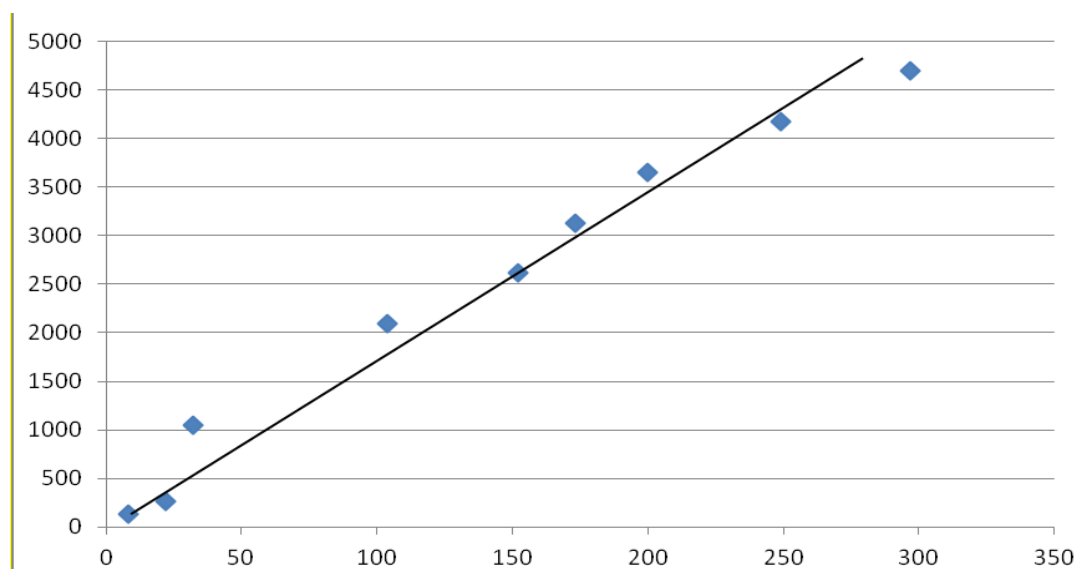


Сила по каналу P_y (Н) на экране дисплея (P_y д)

Рис. 5.4. Тарировочный график канала P_y

По каналу P_y тарировочный коэффициент $K_{Py} = P_y \text{ эт} / P_y \text{ д} = 8,4762$

Сила P_x (Н) на эталонном динамометре (P_x эт)



Сила по каналу P_x (Н) на экране дисплея (P_x д)

Рис. 5.5. Тарировочный график канала P_x

По каналу P_x тарировочный коэффициент $K_{P_x} = P_x \text{ эт} / P_x \text{ д} = 18,5759$

Для избегания расчёта сил через тарировочный коэффициент установили в усилителе пределы измерения **5 кН по всем каналам**. Соответствующие пределы установили на мониторе в окне **Hardware**, в колонке **«Measuring Range»**. При правильной работе динамометра тарировочный коэффициент должен быть равен 1.

Таблица 5.2. Тарировка динамометра «Kistler» при установленных пределах **5 кН по всем каналам усилителя** и при установленных пределах измерения **5 кН в «Measuring Range»**. Жесткость эталонного динамометра $j_{\text{эт}} = 2613 \text{ н/мм}$

№ п/п	показания индикатора эталонного динамометра $\Delta_{\text{инд эт}}, \text{ мм}$	Сила по эталонному динамометру, $P_{\text{эт}} = \Delta_{\text{и}} \times j_{\text{эт}}, \text{ Н}$	Сила по монитору Kistler , Н		
			$P_z \text{ дин}, \text{ Н}$	$P_y \text{ дин}, \text{ Н}$	$P_x \text{ дин}, \text{ Н}$
0	0		50	330	120 (130; 110)
1	0,05	130,6	177	467	235 (258)
2	0,1	261,3	300	570	350
3	0,4	1045	1020	1290	1080
4	0,8	2090	1970	2240	2020 (2032)
5	1,0	2613	2440	2700	2500
6	1,2	3135	3000	3185	2980 (3000)
7	1,4	3658	3380	3658	3470 (3480)
8	1,6	4181	3870	4180	
9	1,8	4703	4350	4580	
10	0,05	130,6	170	430	260
11	0	0	40*	380	148 (127-148)

Примечание: 1) 40* Н – это вес самого эталонного динамометра при $\Delta_{\text{инд эт}} = 0 \text{ мм}$ при тарировании по каналу P_z ;

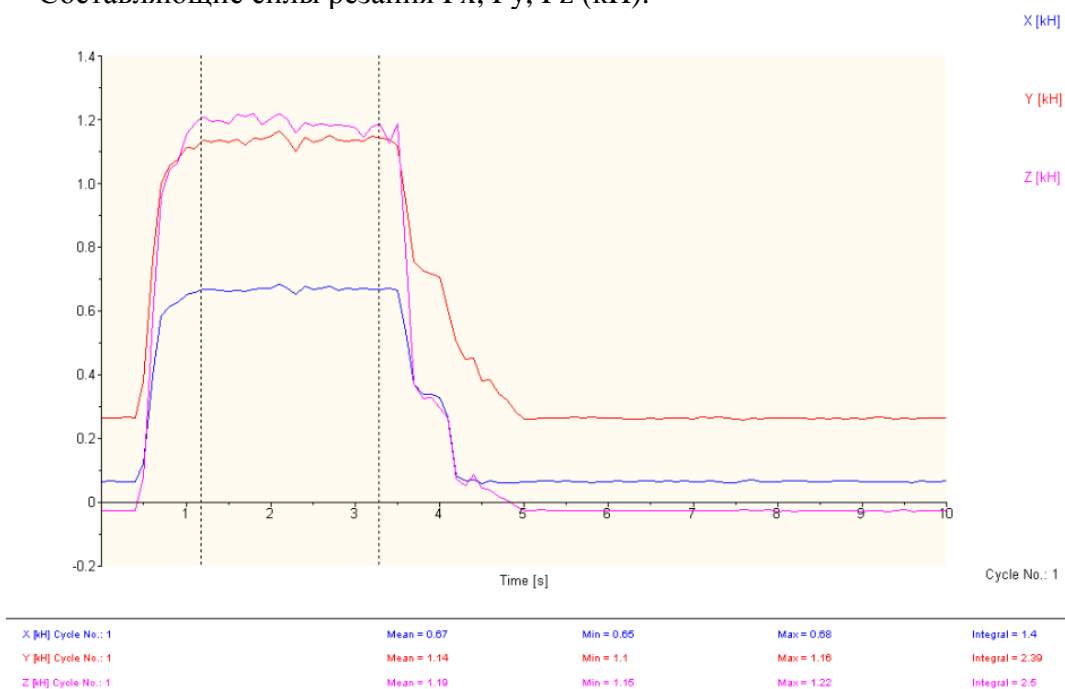
2) при тарировании по каналу P_y $P_{y \text{ дин}} = 380 \text{ Н}$ – предварительный натяг (на эталонном динамометре ноль, но на **Kistler** действует эта сила 380 Н).

После проверки соответствия показаний динамометра действительным (эталонным) силам при нагружении динамометра (при тарировке динамометра) выполняем отработку (получения навыков) методики измерения сил резания с помощью динамометра Kistler.

Обработка методики измерения сил резания с помощью динамометра Kistler при точении вала

Измерение составляющих силы резания при обработке стали **40X** токарным проходным резцом с напайной режущей пластиной из твёрдого сплава **T15K6**. **Режим резания:** глубина резания $t=2$ мм, продольная подача $s=0,21$ мм/об, частота вращения шпинделя $n=630$ об/мин, диаметр заготовки $d=61$ мм, скорость резания $v=120$ м/мин. **Геометрические параметры режущей части резца:** главный угол в плане $\phi=45^\circ$, вспомогательный угол в плане $\phi_1=45^\circ$, радиус при вершине $r=0,01$ мм, главный передний угол $\gamma=7^\circ$, главный задний угол $\gamma=10^\circ$.

Составляющие силы резания P_x , P_y , P_z (кН).



время
точения τ , мин

Рис. 5.6. Изменение составляющих силы резания от времени точения τ , мин.
Сталь **40X** – **T15K6**, $t=2$ мм, $s=0,21$ мм/об, $v=120$ м/мин

По результатам измерений записываем величину составляющих силы резания: $P_x=670$ Н, $P_y=1130$ Н, $P_z=1200$ Н.

После получения навыков измерения сил резания с помощью динамометра Kistler выполняем исследования сил резания для получения информации о внешних нагрузках при резании.

6. Измерение сил резания при точении вала

Силы резания при обработке стали 40Х токарным проходным резцом Т15К6

1) Режим резания $t=2$ мм, $s=0,21$ мм/об, $n=630$ об/мин, $d=61$ мм, $v=120$ м/мин

Составляющие силы резания P_x , P_y , P_z (кН).

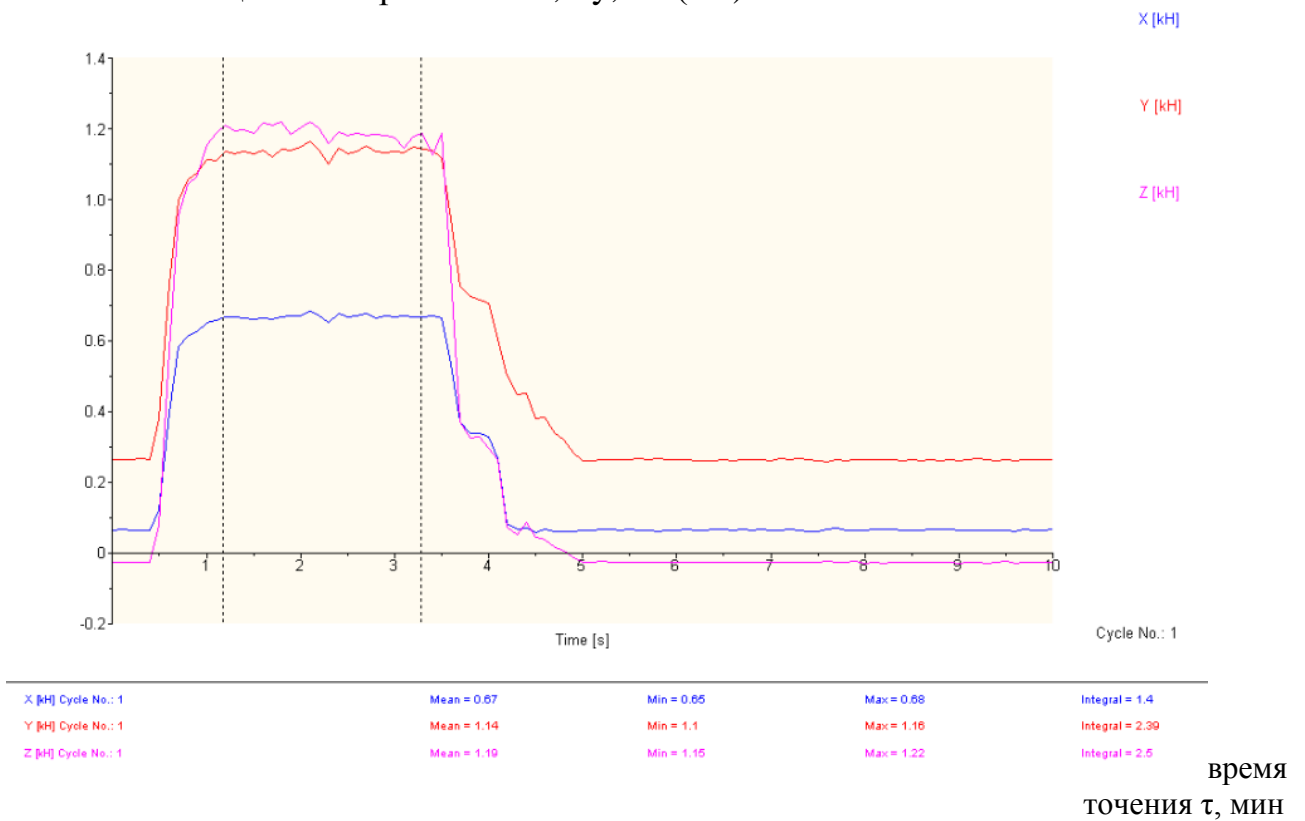


Рис. 6.1. Изменение составляющих силы резания от времени точения τ , мин.
Сталь 40Х – Т15К6, $t=2$ мм, $s=0,21$ мм/об, $v=120$ м/мин

Составляющие силы резания: $P_x=670$ Н, $P_y=1130$ Н, $P_z=1200$ Н.

2) Изменили глубину резания $t=1$ мм. ($S=0,21$ мм/об, $n=630$ об/мин)

P_x, P_y, P_z (кН).

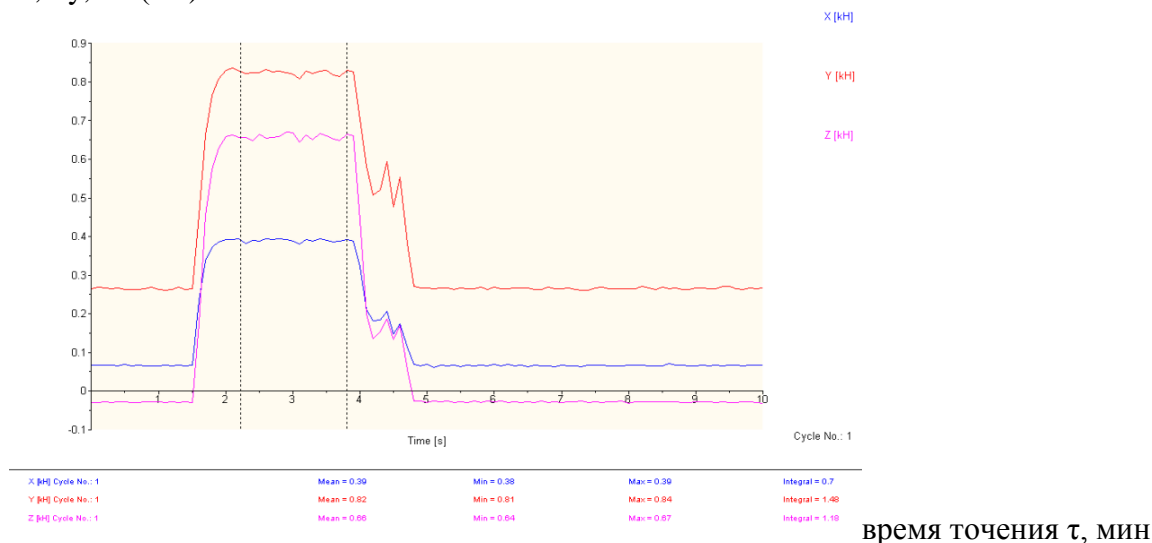


Рис. 6.2. Изменение составляющих силы резания от времени точения τ , мин.
Сталь 40X – Т15К6, $t=1$ мм, $s=0,21$ мм/об, $v=120$ м/мин

Составляющие силы резания: $P_x=390$ Н, $P_y=819$ Н, $P_z=650$ Н.

3) Изменили глубину резания $t=0,2$ мм ($S=0,21$ мм/об, $n=630$ об/мин)

P_x, P_y, P_z (кН).

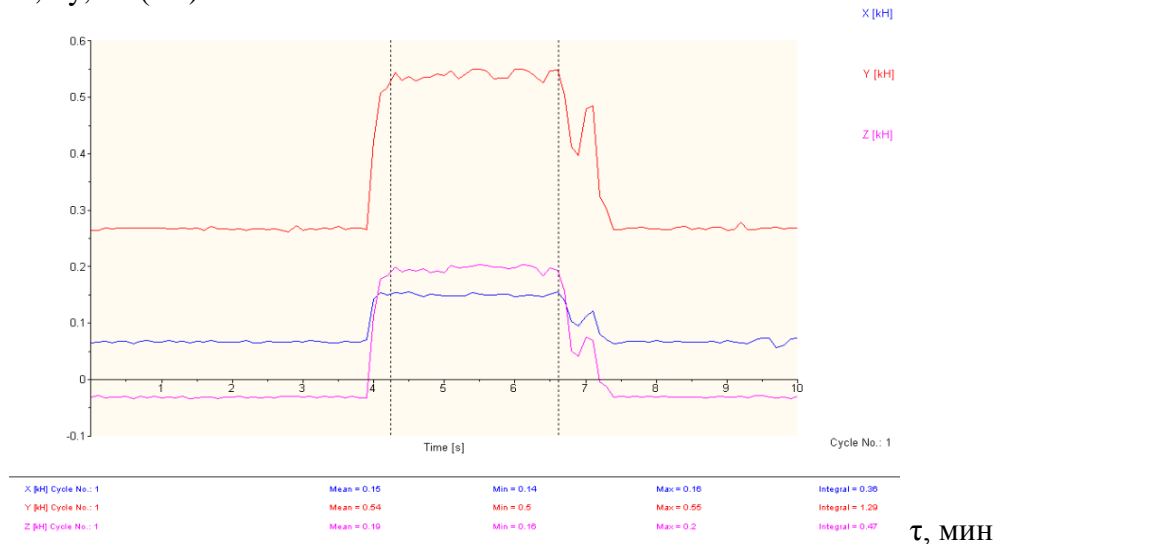


Рис. 6.3. Изменение составляющих силы резания по времени τ , мин.
Сталь 40X – Т15К6, $t=0,2$ мм, $s=0,21$ мм/об, $v=120$ м/мин

Составляющие силы резания: $P_x=150$ Н, $P_y=540$ Н, $P_z=190$ Н.

4) Режимы резания $S=0,41$ мм/об, $n=630$ мм/мин, глубина резания t меняется дискретно с 0,5 до 1 мм.

P_x, P_y, P_z (кН).

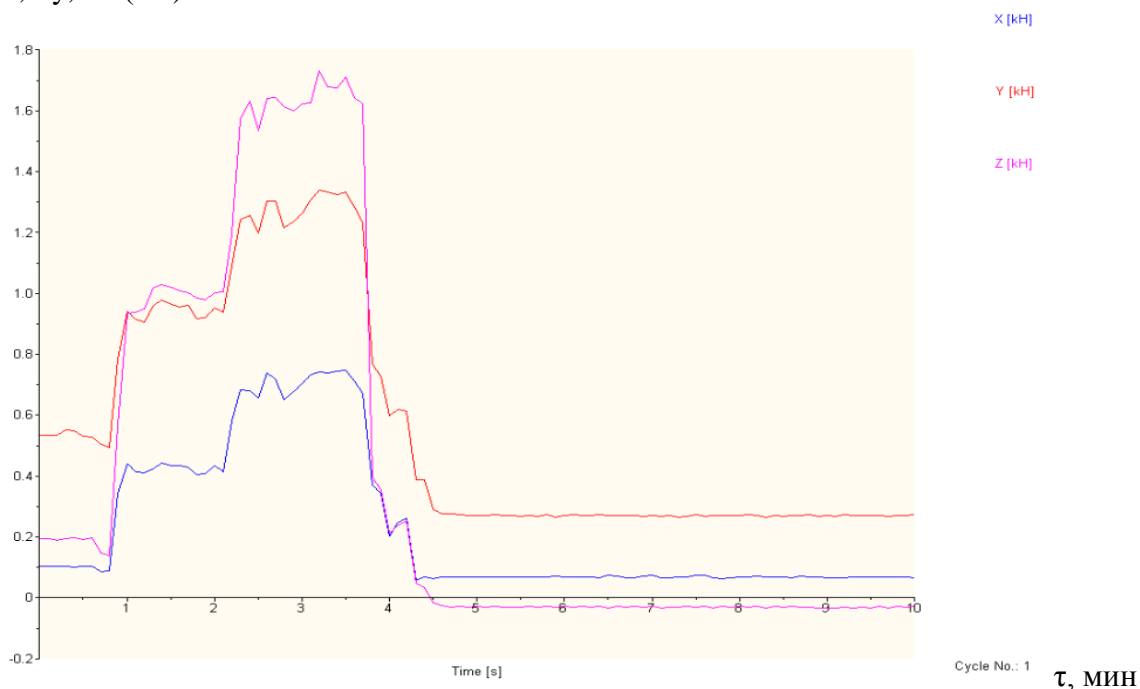


Рис. 6.4. Изменение составляющих силы резания по времени τ , мин.
Сталь 40Х – Т15К6, $t=0,5$, затем 1 мм, $s=0,41$ мм/об, $v=120$ м/мин

Составляющие силы резания: при $t=0,5$ мм. $P_x=430$ Н, $P_y=960$ Н, $P_z=1020$ Н.

Составляющие силы резания: при $t=1$ мм. $P_x=700$ Н, $P_y=1250$ Н, $P_z=1650$ Н.

По результатам экспериментов (рис. 6.1 - 6.4) определяем составляющие силы резания, которые заносим в таблицу 6.1.

Таблица 6.1. Влияние глубины резания на составляющие силы резания при постоянной подаче $s= 0.21$ мм/об

№ п/п	t , мм	P_x , Н	P_y , Н	P_z , Н
1	0,2	150	540	190
2	1,0	390	819	650
3	2,0	670	1130	1200

По данным таблицы 6.1 строим графики влияния глубины резания на составляющие силы резания при постоянной подаче $s = 0.21 \text{ мм/об}$ (рис. 6.5).

Сила резания, Н.

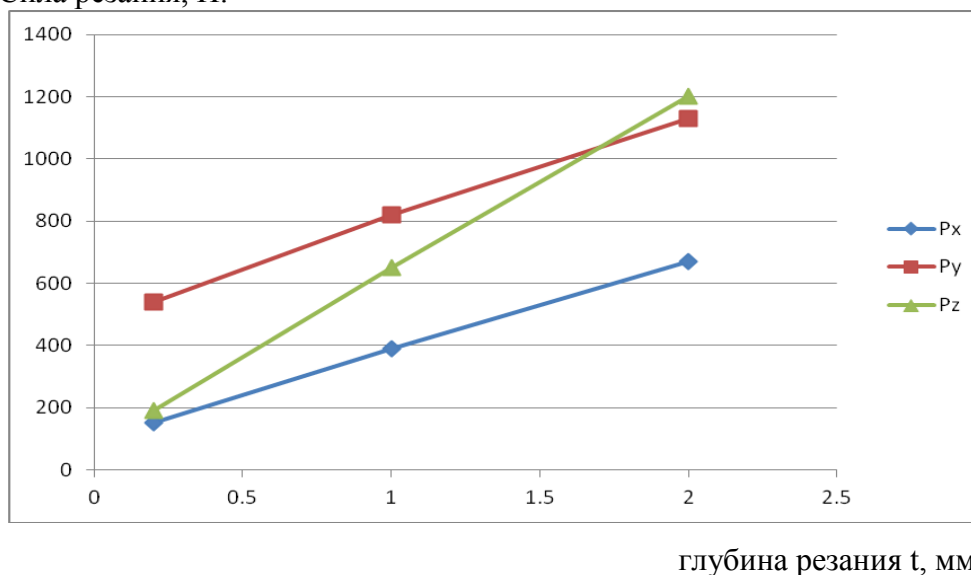


Рис. 6.5. Влияние глубины резания t (мм) на силы резания (Н). $s = 0.21 \text{ мм/об}$

Таблица. 6.2. Влияние подачи на составляющие силы резания при постоянной глубине резания $t = 1 \text{ мм}$

№ п/п	s , мм/об	P_x , Н	P_y , Н	P_z , Н
1	0,21	390	819	650
2	0,41	700	1250	1650

Сила резания, Н.

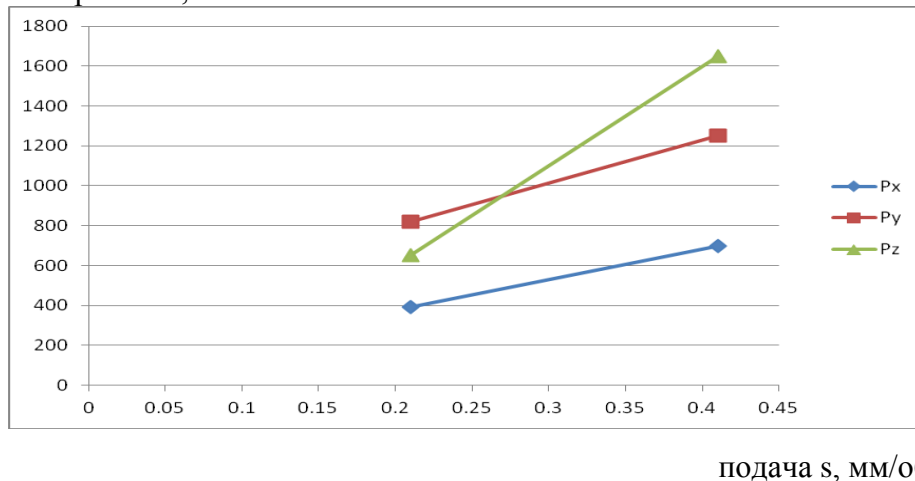
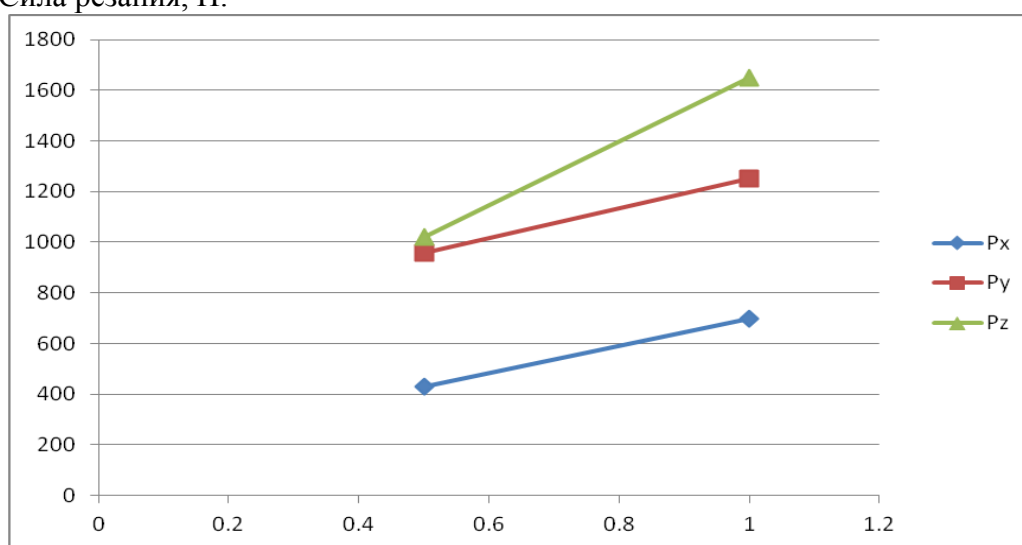


Рис. 6.6. Влияние подачи s (мм/об) на силы резания (Н). $t = 1 \text{ мм}$

Таблица 6.3. Влияние глубины резания на составляющие силы резания при постоянной подаче $S=0.41\text{мм/об}$

№ п/п	t, мм	P_x , Н	P_y , Н	P_z , Н
1	0,5	430	960	1020
2	1	700	1250	1650

Сила резания, Н.



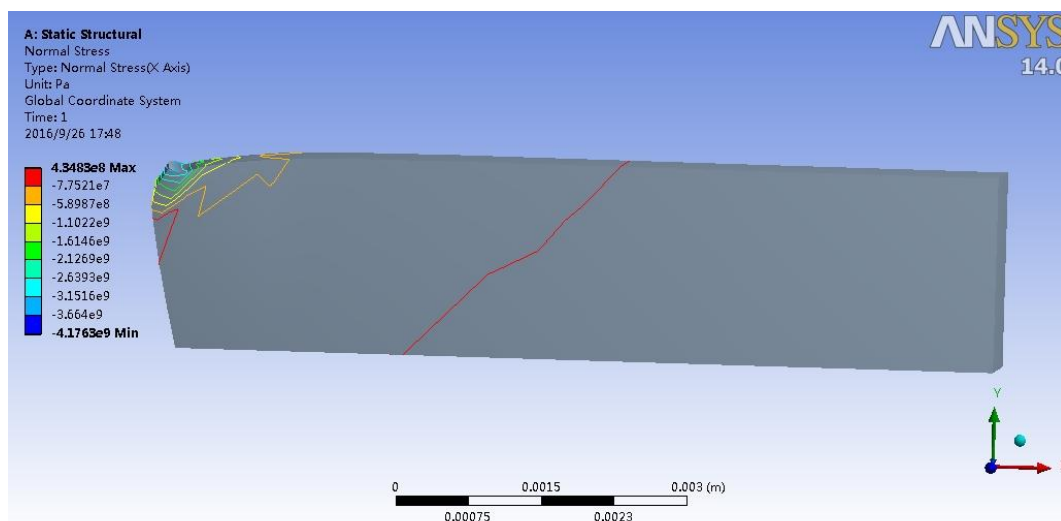
глубина резания t, мм

Рис. 6.7. Влияние глубины резания t (мм) на составляющие силы резания (Н).
 $S=0.41\text{мм/об}$

7. Исследование прочности реза

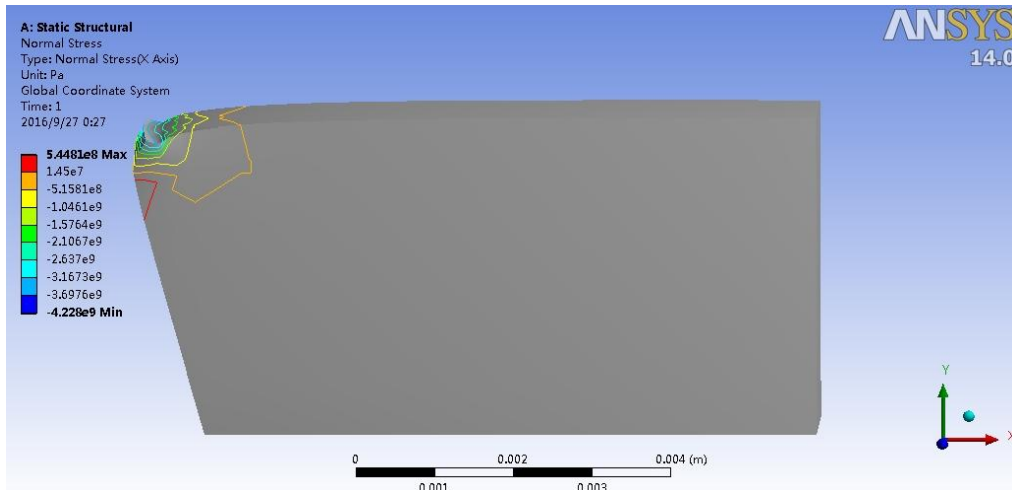
7.1. Расчёт внутренних напряжений в режущем клине при точении диска из титанового сплава ВТ3-1

Задача исследования: Определить распределение напряжений в режущем клине реза при обработке титанового сплава ВТ3-1 при различной толщине режущей пластины ($h=2\text{мм}$; $h=4\text{мм}$; $h=6\text{мм}$; $h=20\text{мм}$). Внешние нагрузки были получены ранее В.Н. Козловым при свободном прямоугольном точении диска шириной $b=2,3\text{ мм}$, т.е. когда действуют только силы P_z и P_y . При нагружении режущей части внешние нагрузки задаём не общими силами P_z и P_y , а равномерно распределёнными удельными нагрузками. На участке контакта стружки с **передней поверхностью** реза удельные **нормальные** и касательные контактные нагрузки $q_N=1533\text{ Н}$, $q_F=504\text{ Н}$ (длина контакта стружки с передней поверхностью реза задана $c=3\text{ мм}$); на участке контакта **фаски задней поверхности** с поверхностью диска **нормальные** и касательные контактные нагрузки $q_{Nh}=3400\text{ МПа}$, $q_{Fh}=600\text{ МПа}$ (длина фаски износа по задней поверхности реза $h_3=0,19\text{ мм}$). Результаты расчёта напряжений в режущем клине представлены на рис. 7.1.

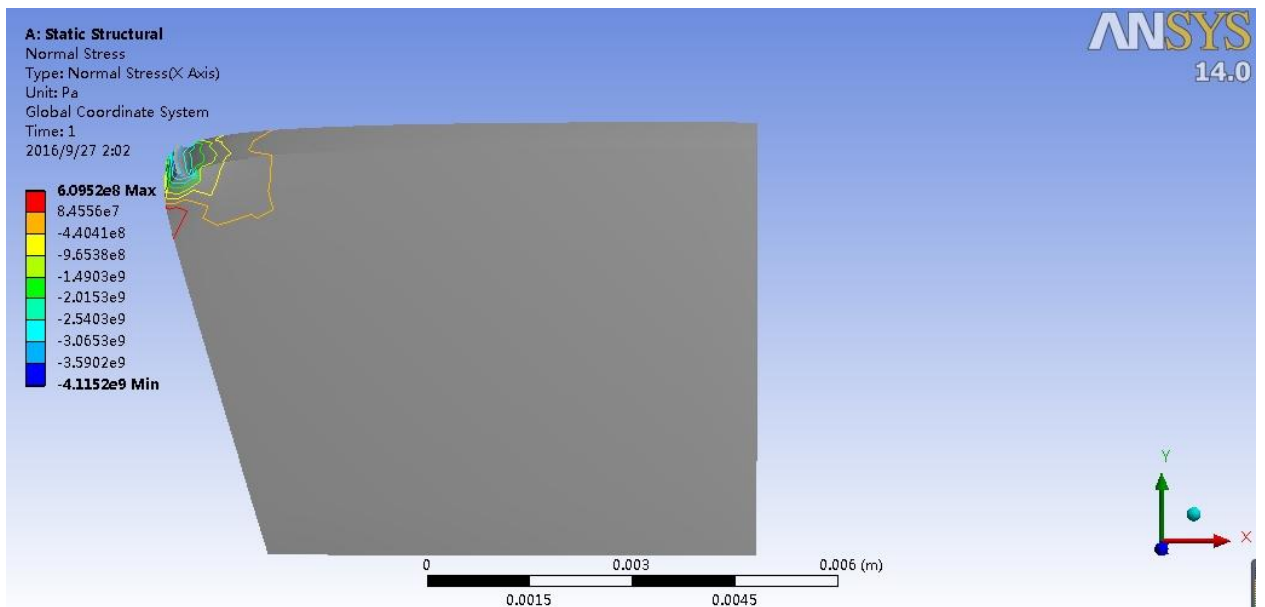


а) Распределение главного нормального напряжения σ (Па) в режущем клине при толщине пластины $h=2\text{ мм}$.

Рис. 7.1. Распределение главного нормального напряжения σ (Па) в режущем клине при толщине пластины h . ВТ3-1 – ВК8, $\alpha=18^\circ$; $\gamma=0^\circ$; $v=60\text{ м/с}$, $l=9\text{ мм}$, $s=0,41\text{ мм/об}$, $h_3=0,19\text{ мм}$, $b=2,3\text{ мм}$, $c=0.414\text{ мм}$.

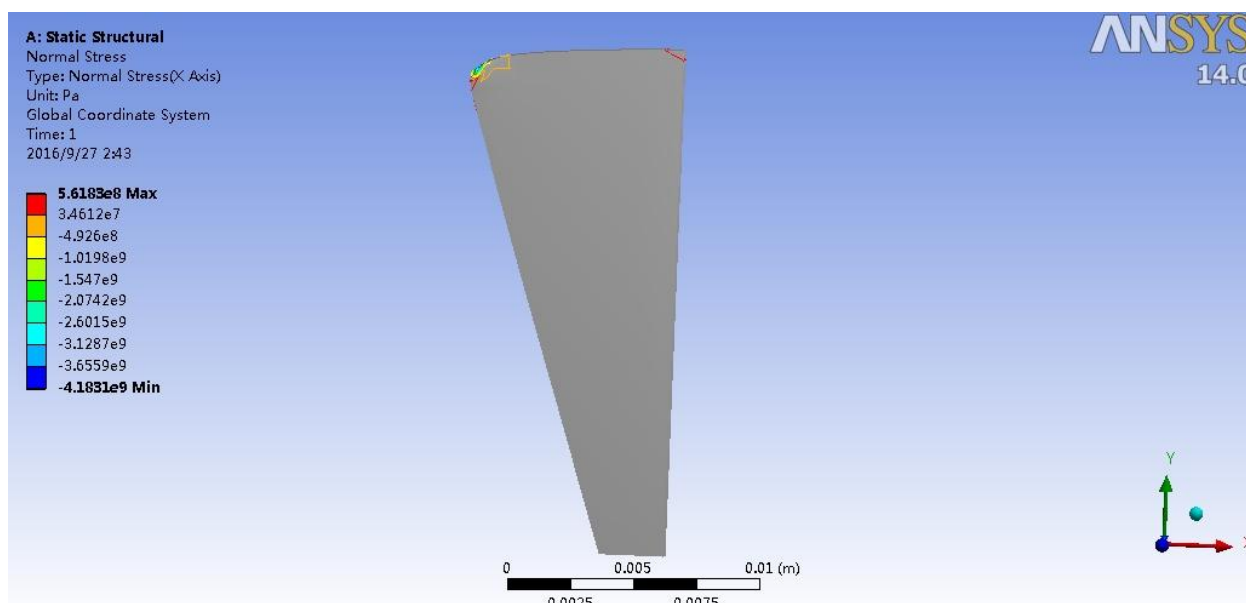


б) Распределение главного нормального напряжения σ (Па) в режущем клине при разной толщине пластины h . ВТ3-1 – ВК8, $\alpha=18^\circ$; $\gamma=0^\circ$; $v=60$ м\с, $l=9$ мм, $s=0,41$ мм\об, $h_3=0,19$ мм, $b=2,3$ мм, $c=0.414$ мм.



в) Распределение главного нормального напряжения σ (Па) в режущем клине при толщине пластины $h=6$ мм. ВТ3-1 – ВК8, $\alpha=18^\circ$; $\gamma=0^\circ$; $v=60$ м\с, $l=9$ мм, $s=0,41$ мм\об, $h_3=0,19$ мм, $b=2,3$ мм, $c=0.414$ мм.

Рис. 7.1 (продолжение). Распределение главного нормального напряжения σ (Па) в режущем клине при толщине пластины h . ВТ3-1 – ВК8, $\alpha=18^\circ$; $\gamma=0^\circ$; $v=60$ м\с, $l=9$ мм, $s=0,41$ мм\об, $h_3=0,19$ мм, $b=2,3$ мм, $c=0.414$ мм.



г) Распределение главного нормального напряжения σ (Па) в режущем клине при толщине пластины $h=20$ мм. ВТЗ-1 – ВК8, $\alpha=18^\circ; \gamma=0^\circ$; $v=60$ м\с, $l=9$ мм, $s=0,41$ мм\об, $h_3=0,19$ мм, $b=2,3$ мм, $c=0.414$ мм.

Рис. 7.1 (продолжение). Распределение главного нормального напряжения σ (Па) в режущем клине при толщине пластины h . ВТЗ-1 – ВК8, $\alpha=18^\circ; \gamma=0^\circ$; $v=60$ м\с, $l=9$ мм, $s=0,41$ мм\об, $h_3=0,19$ мм, $b=2,3$ мм, $c=0.414$ мм.

Анализ экспериментальных данных показывает что, толщина режущей пластины оказывает существенное влияние на наибольшие нормальные напряжения (рис. 7.2.).

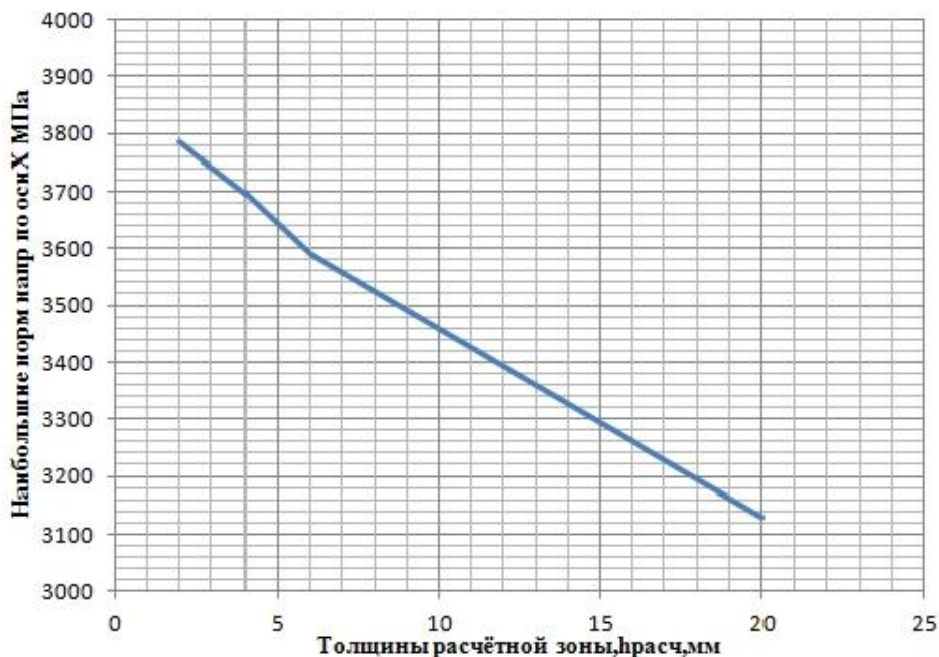


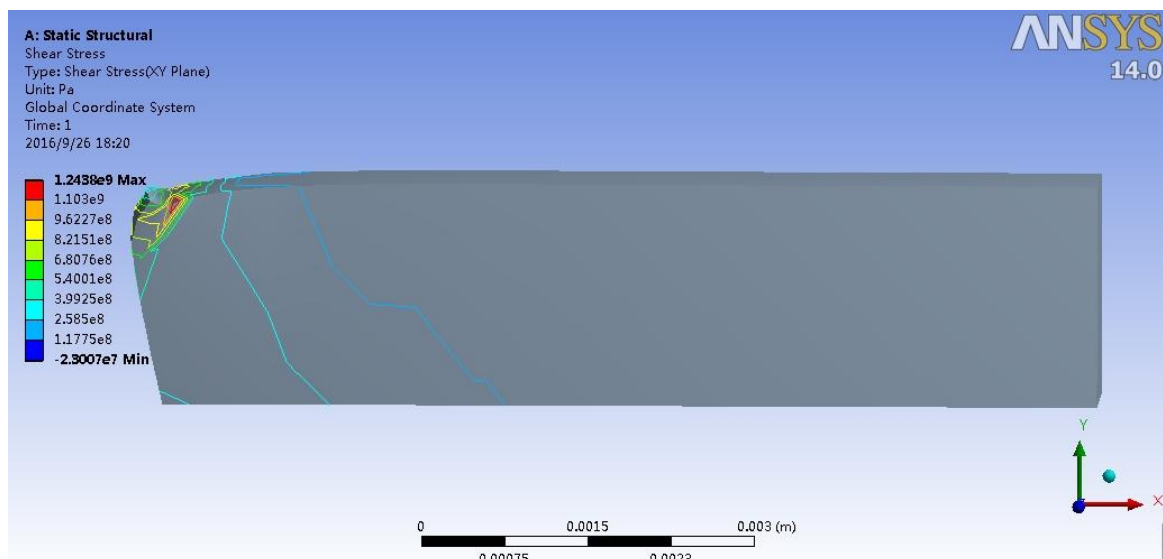
Рис. 7.2. Влияние толщины режущей пластины $h_{расч}$ (мм) на величину наибольшего нормального напряжения в режущем клине $\sigma_{z \max}$ (МПа) при обработке титанового сплава ВТЗ-1

По результатам исследования влияния толщины режущей пластины $h_{расч}$ (мм) на распределение нормального напряжения в режущем клине можно сделать следующие выводы:

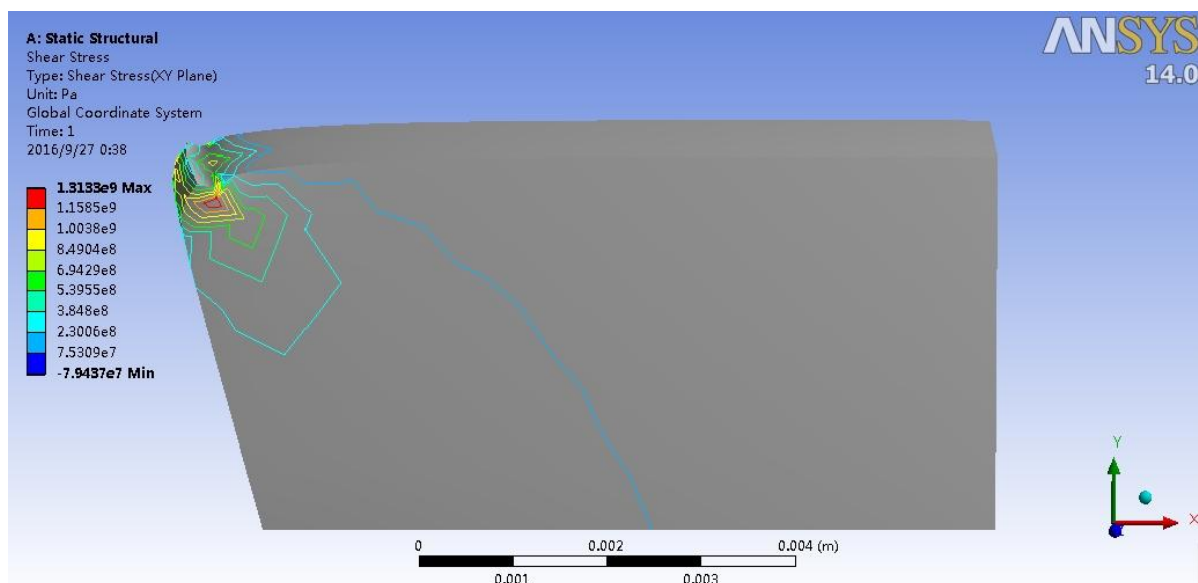
1. При обработке титанового сплава ВТЗ-1 режущей пластиной из ВК8 с толщиной менее 6 мм у главной режущей кромки возникают большие сжимающие напряжения, которые приближаются к пределу прочности твёрдого сплава на сжатие, что может привести к выкрашиванию главной режущей кромки.

2. При толщине режущей пластины более 6 мм наибольшее внутреннее напряжение уменьшается медленно.

Определяем распределение касательных напряжений τ в резце при различной толщине режущей пластины ($h=2$ мм; $h=4$ мм; $h=6$ мм; $h=20$ мм). Результаты расчёта главных касательных напряжений в режущем клине представлены на рис. 7.3.

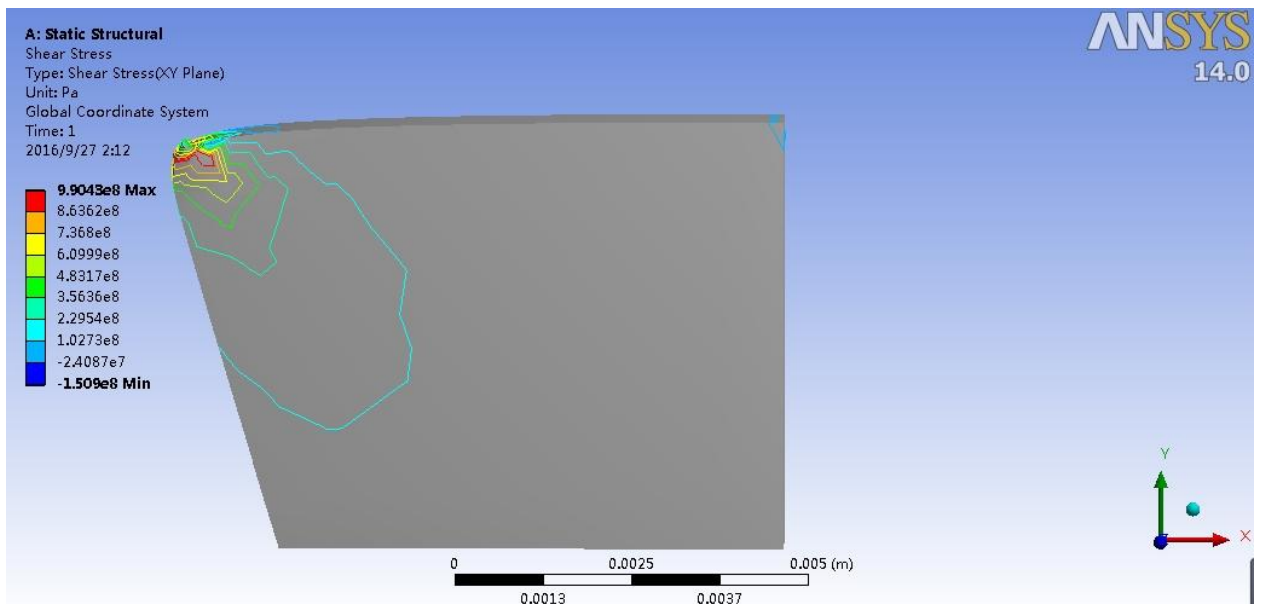


а) Распределение касательного напряжения τ (Па) в режущем клине при толщине пластины $h=2$ мм. ВТ3-1 – ВК8, $\alpha=18^\circ$; $\gamma=0^\circ$, $v=60$ м\с, $l=9$ мм, $s=0,41$ мм\об, $h_3=0,19$ мм, $b=2,3$ мм, $c=0.414$ мм.

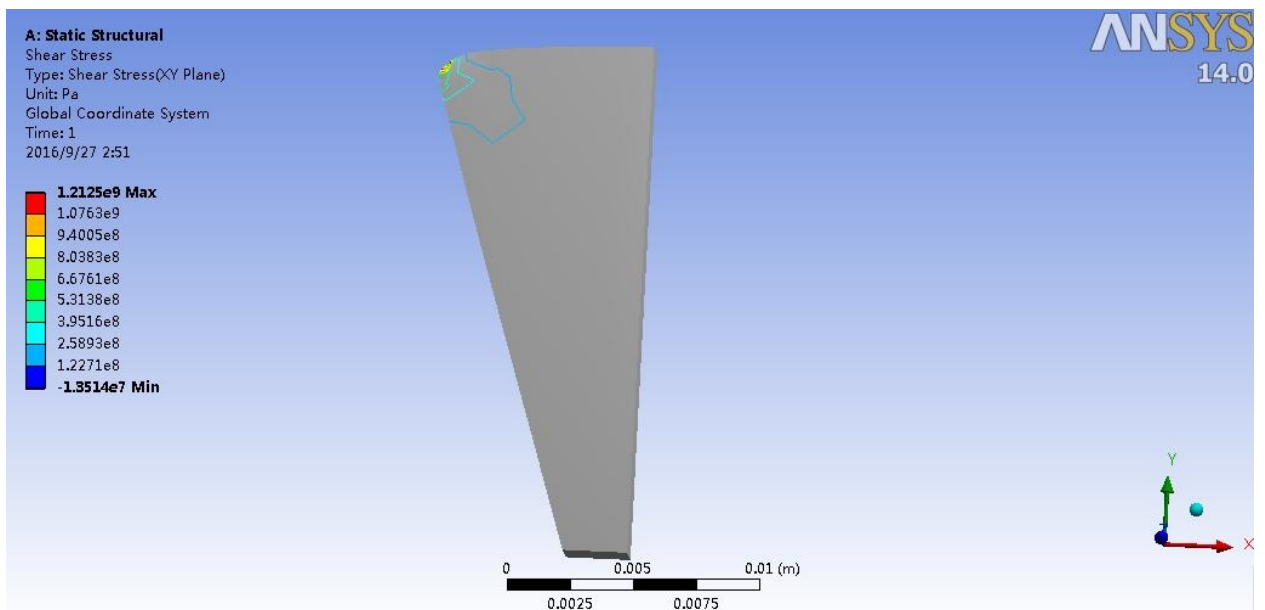


б) Распределение касательного напряжения τ (Па) в режущем клине при толщине пластины $h=4$ мм. ВТ3-1 – ВК8, $\alpha=18^\circ$; $\gamma=0^\circ$, $v=60$ м\с, $l=9$ мм, $s=0,41$ мм\об, $h_3=0,19$ мм, $b=2,3$ мм, $c=0.414$ мм.

Рис. 7.3. Распределение главного касательного напряжения τ в режущем клине при толщине пластины h . ВТ3-1 – ВК8, $\alpha=18^\circ$; $\gamma=0^\circ$, $v=60$ м\с, $l=9$ мм, $s=0,41$ мм\об, $h_3=0,19$ мм, $b=2,3$ мм, $c=0.414$ мм



в) Распределение касательного напряжения σ (Па) в режущем клине при толщине пластины $h=6\text{мм}$. ВТЗ-1 – ВК8, $\alpha=18^\circ; \gamma=0^\circ$, $v=60\text{ м\c{s}}$, $l=9\text{мм}$, $s=0,41\text{ мм\ob}$, $h_3=0,19\text{ мм}$, $b=2,3\text{мм}$, $c=0.414\text{мм}$.



г) Распределение касательного напряжения σ (Па) в режущем клине при толщине пластины $h=20\text{мм}$. ВТЗ-1 – ВК8, $\alpha=18^\circ; \gamma=0^\circ$, $v=60\text{ м\c{s}}$, $l=9\text{мм}$, $s=0,41\text{ мм\ob}$, $h_3=0,19\text{ мм}$, $b=2,3\text{мм}$, $c=0.414\text{мм}$.

Рис. 7.3. (продолжение). Распределение главного касательного напряжения τ в режущем клине при толщине пластины h . ВТЗ-1 – ВК8, $\alpha=18^\circ; \gamma=0^\circ$, $v=60\text{ м\c{s}}$, $l=9\text{мм}$, $s=0,41\text{ мм\ob}$, $h_3=0,19\text{ мм}$, $b=2,3\text{мм}$, $c=0.414\text{мм}$.

Анализ экспериментальных данных показывает что, толщина режущей пластины оказывает существенное влияние на наибольшие касательные напряжения (рис. 7.4.).

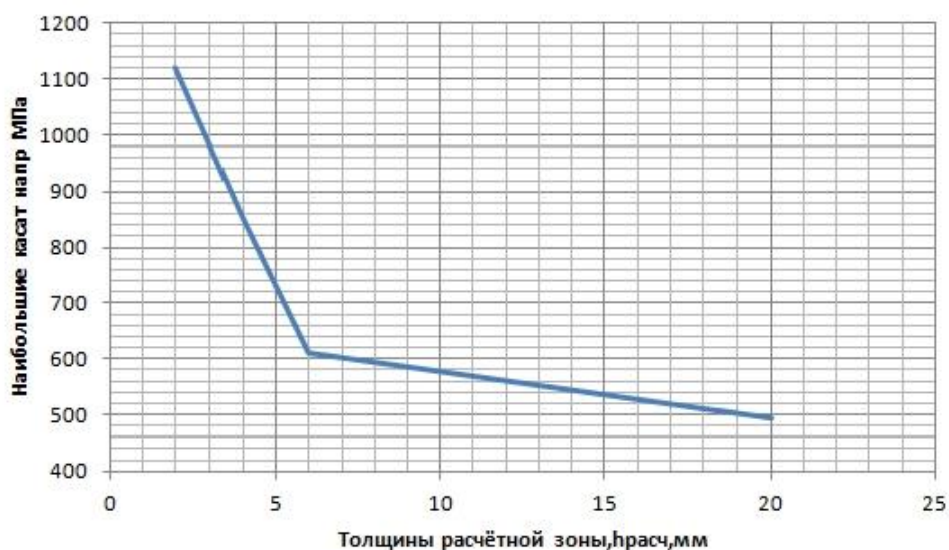


Рис.7.4. Влияние толщины режущей пластины $h_{расч}$ (мм) на величину наибольшего касательного напряжения в режущем клине $\sigma_{з\ max}$ (МПа) при обработке титанового сплава ВТЗ-1

По результатам исследования влияния толщины режущей пластины $h_{расч}$ на распределение касательного напряжения в режущем клине можно сделать следующие выводы:

1. При обработке титанового сплава ВТЗ-1—ВК8 режущей пластиной с толщиной менее 6 мм у главной режущей кромки возникают большие сжимающие напряжения, которые приближаются к пределу прочности твёрдого сплава на сжатие, что может привести к выкрашиванию главной режущей кромки.

2. При толщине режущей пластины более 6 мм напряжение уменьшается медленно.

7.2. Расчёт внутренних напряжений в режущем клине при точении вала из стали 30X

Для расчёта внутренних напряжений в режущем клине используем программу ANSYS. Внешние нагрузки задаём по результатам экспериментов (см. раздел 6). Принимаем их как **равномерно распределённые средние** удельные нагрузки на участке контакта стружки с передней поверхностью резца $q_N=357$ МПа, $q_F=498$ МПа (длина контакта стружки с передней поверхностью резца $c=3$ мм); на участке контакта фаски задней поверхности с поверхностью диска $q_{Nh}=600$ Н, $q_{Fh}=300$ Н (длина фаски износа по задней поверхности резца $h_3=0,1$ мм). Усадка стружки $k \approx \text{const} \approx 3$.

Результаты расчёта главных нормальных напряжений в режущем клине представлены на рис. 7.5.

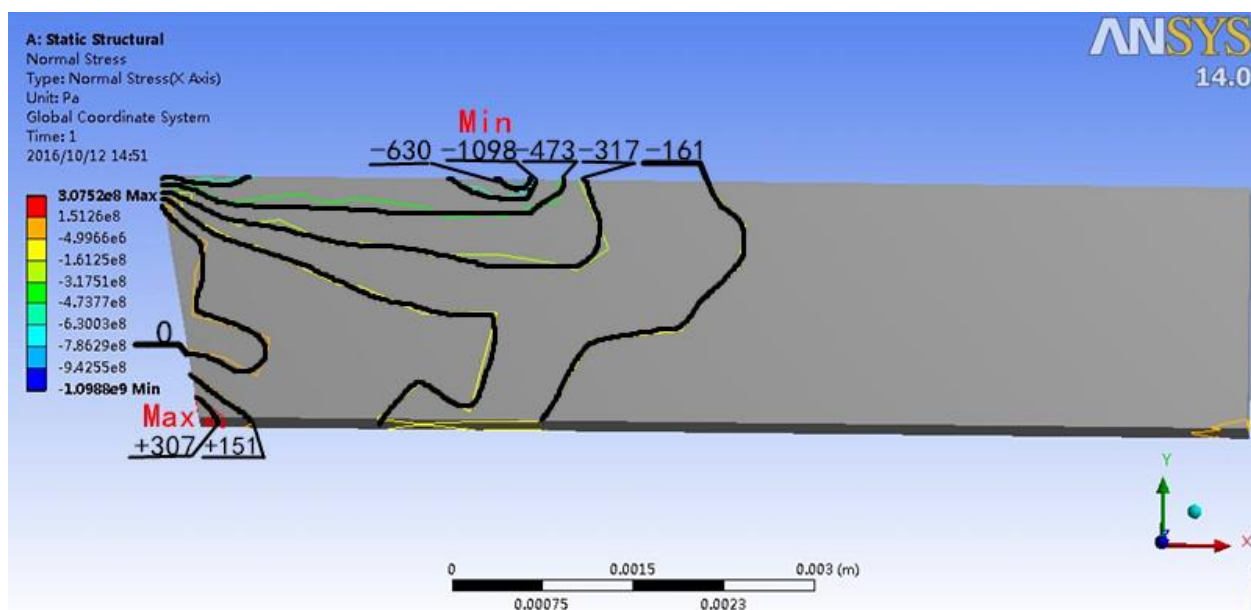


Рис. 7.5. Распределение внутренних нормальных напряжений σ (МПа) в режущем клине при толщине пластины $h=2$ мм. сталь 30X-T15K6 $v=124$ м/мин, $s=0,41$ мм/об, $t=1$ мм, $\varphi=45^\circ$, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=10^\circ$; $c=1,3$ мм, $k=3$; $h_3=0,2$ мм.

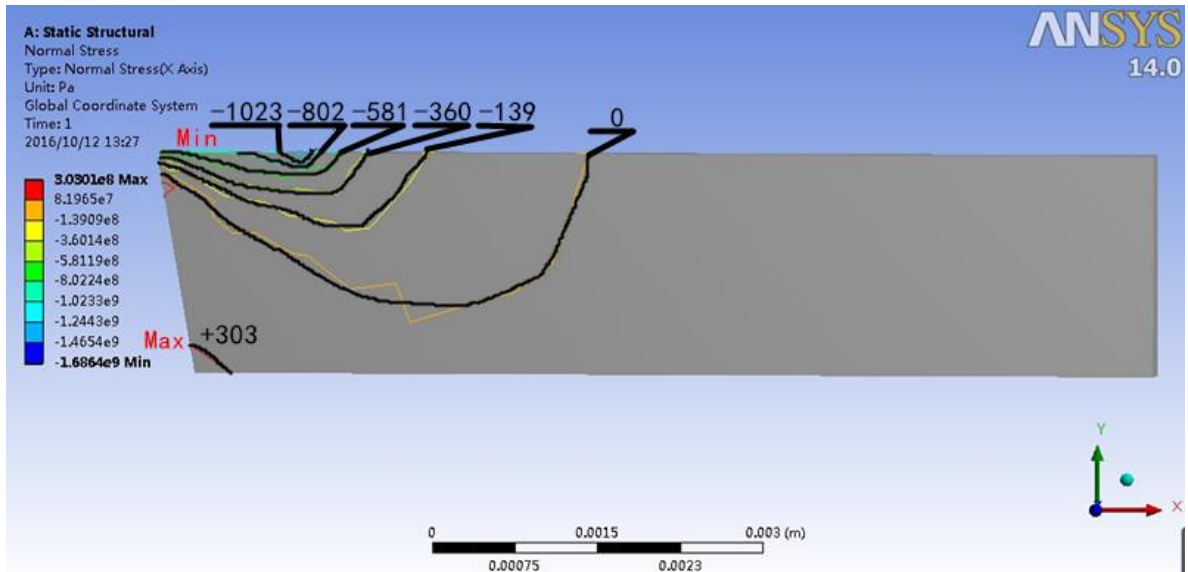


Рис. 7.5. Распределение внутренних нормальных напряжений σ (МПа) в режущем клине при толщине пластины $h=2$ мм. сталь 40Х-Т15К6 $v=124$ м/мин, $s=0,21$ мм\об, $t=1$ мм, $\varphi=45^\circ$, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=10^\circ$; $c=3$ мм, $k=3$; $h_3=0,2$ мм.

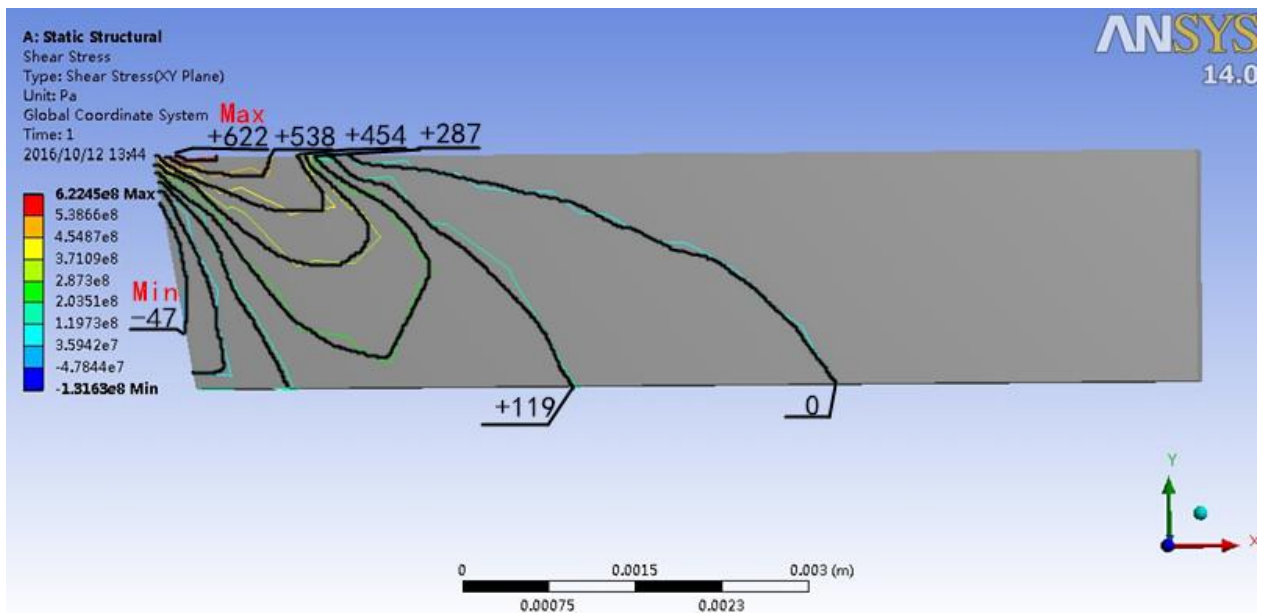


Рис. 7.6. Распределение внутренних касательных напряжений σ (МПа) в режущем клине при толщине пластины $h=2$ мм. сталь 40Х-Т15К6 $v=124$ м/мин, $s=0,41$ мм\об, $t=1$ мм, $\varphi=45^\circ$, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=10^\circ$; $c=1,3$ мм, $k=3$; $h_3=0,2$ мм.

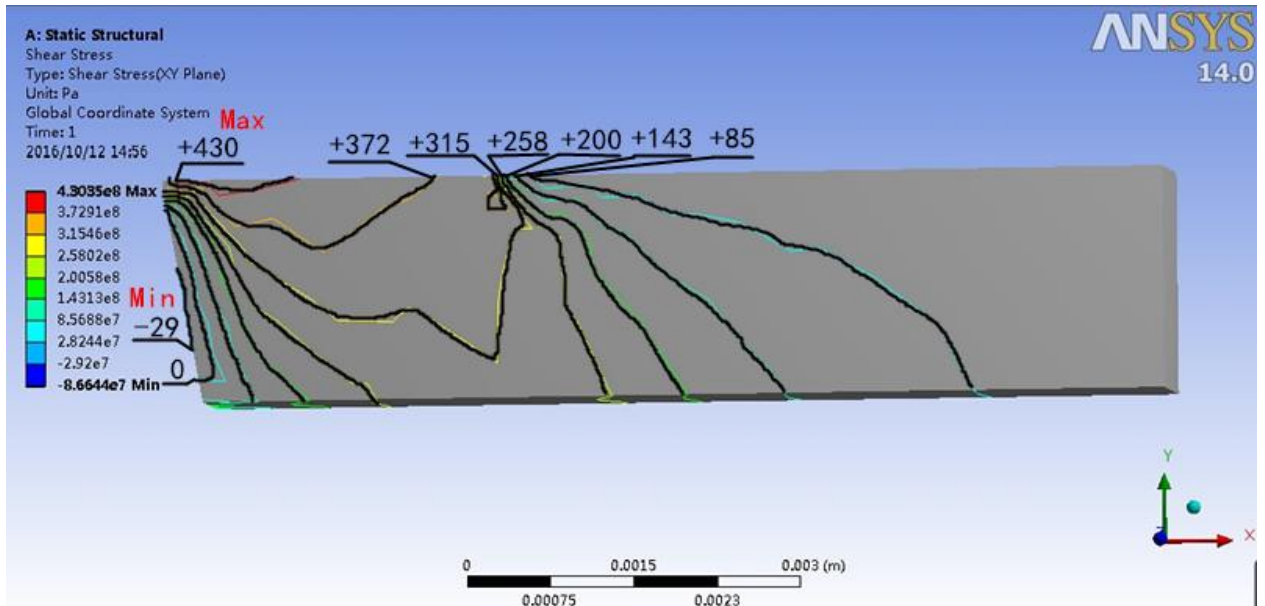


Рис. 7.7. Распределение внутренних касательных напряжений σ (МПа) в режущем клине при толщине пластины $h=2$ мм. сталь 40Х-Т15К6 $v=124$ м/мин, $s=0,21$ мм\об, $t=1$ мм, $\varphi=45^\circ$, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=10^\circ$; $c=3$ мм, $k=3$; $h_3=0,2$ мм.

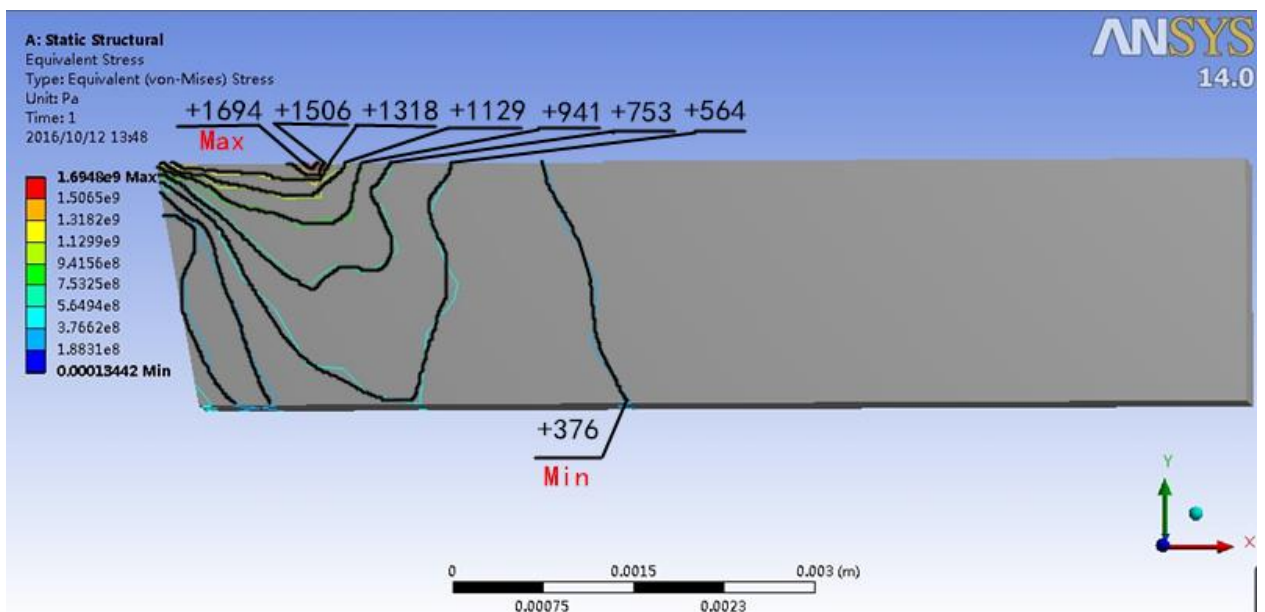


Рис. 7.8. Распределение внутренних эквивалентных напряжений σ (МПа) в режущем клине при толщине пластины $h=2$ мм. сталь 40Х-Т15К6 $v=124$ м/мин, $s=0,41$ мм\об, $t=1$ мм, $\varphi=45^\circ$, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=10^\circ$; $c=1,3$ мм, $k=3$; $h_3=0,2$ мм.

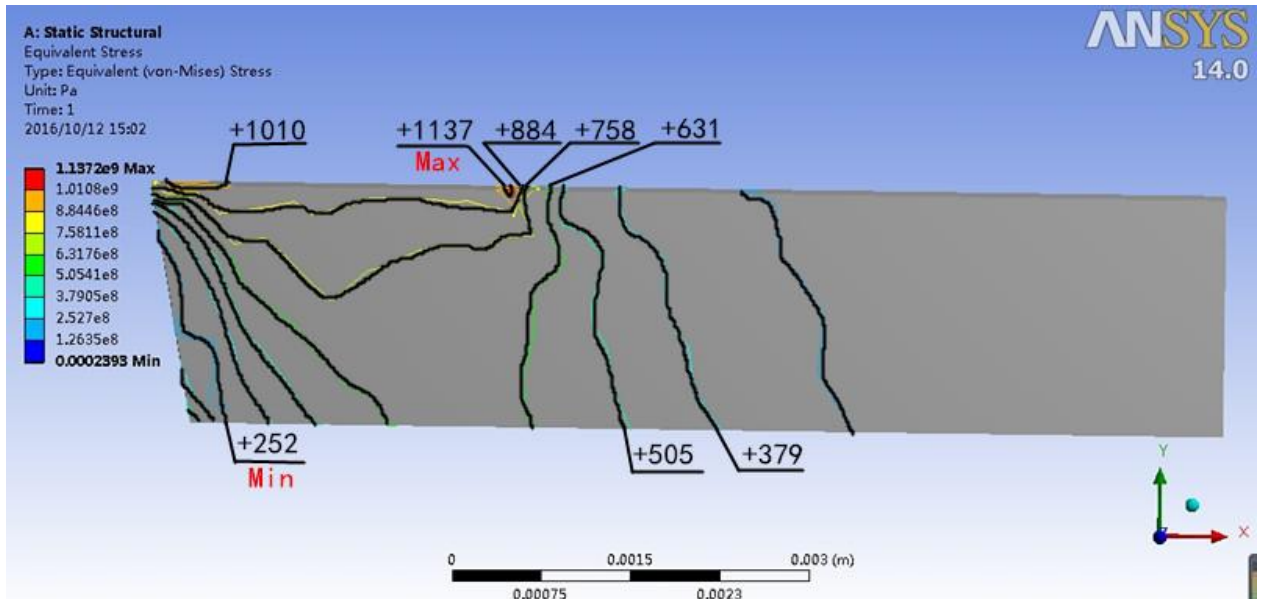


Рис. 7.9. Распределение внутренних эквивалентных напряжений σ (МПа) в режущем клине при толщине пластины $h=2$ мм. сталь 40X-T15K6 $v=124$ м/мин, $s=0,21$ мм\об, $t=1$ мм, $\varphi=45^\circ$, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=10^\circ$; $c=3$ мм, $k=3$; $h_3=0,2$ мм.

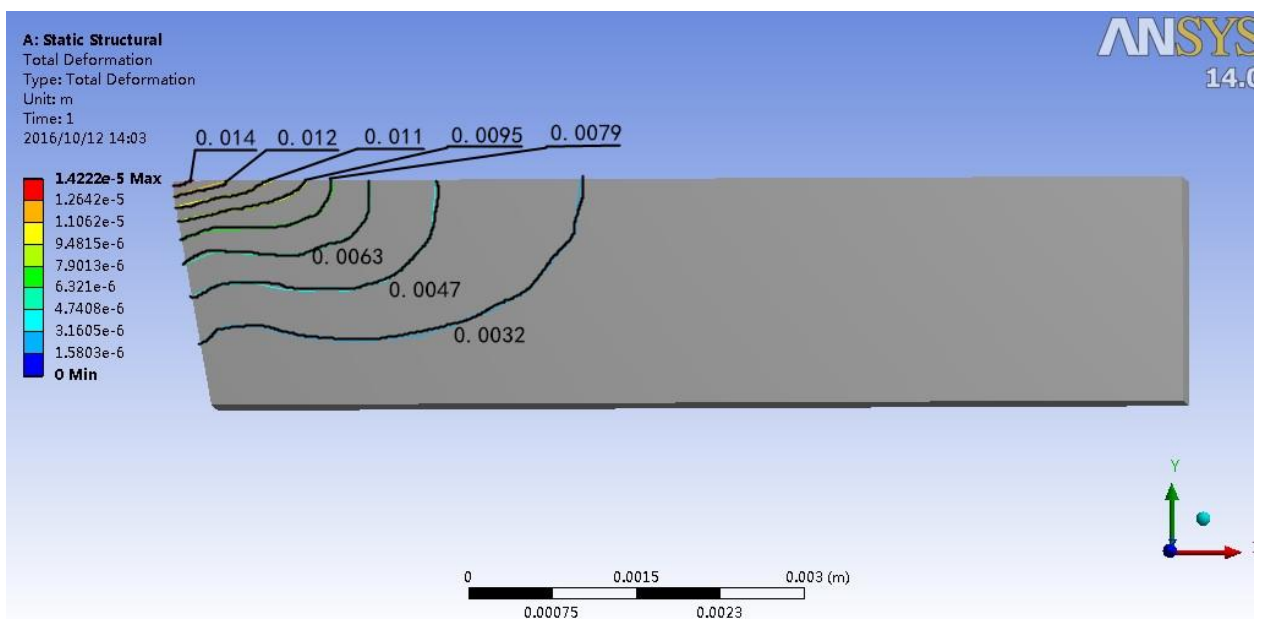


Рис. 7.10. Распределение деформации при сосредоточенной нагрузке, мм, в режущем клине при толщине пластины $h=2$ мм. сталь 40X-T15K6 $v=124$ м/мин, $s=0,41$ мм\об, $t=1$ мм, $\varphi=45^\circ$, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=10^\circ$; $c=1,3$ мм, $k=3$; $h_3=0,2$ мм.

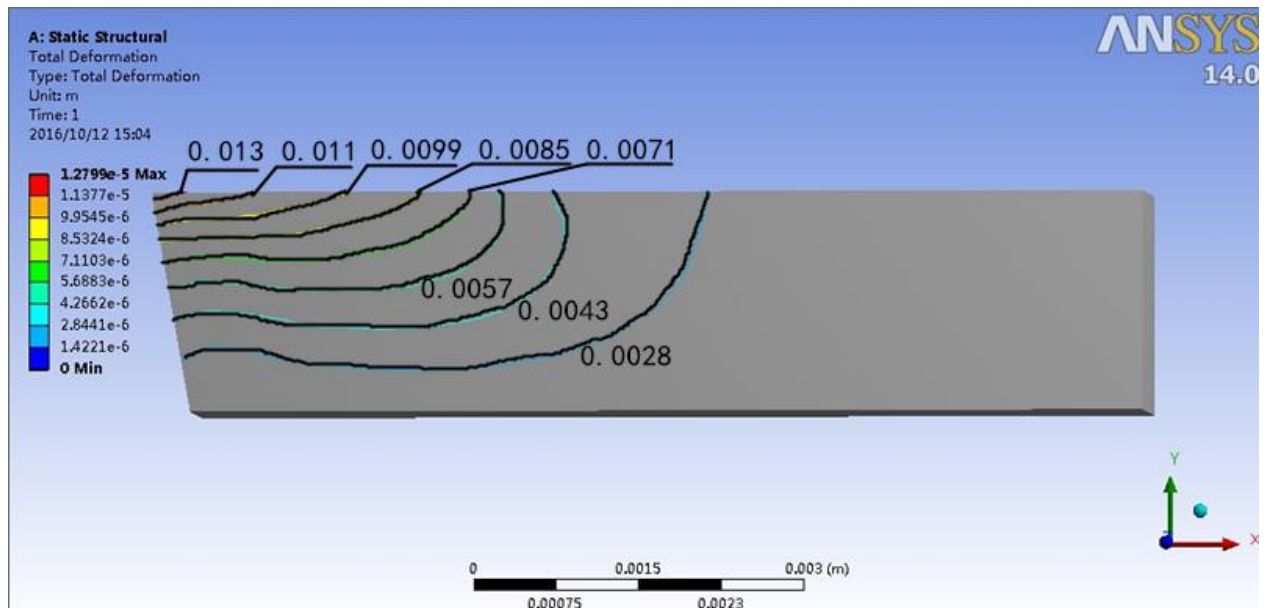


Рис. 7.11. Распределение деформации при сосредоточенной нагрузке ,мм. в режущем клине при толщине пластины $h=2$ мм. сталь 40Х-Т15К6 $v=124$ м/мин, $s=0,21$ мм\об, $t=1$ мм, $\varphi=45^\circ$, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=10^\circ$; $c=3$ мм, $k=3$; $h_3=0,2$ мм.

Анализ экспериментальных данных показывает что, подача режущей пластины оказывает существенное влияние на наибольшие нормальные напряжения.

Таблица 7.1. Влияние подача резания на наибольшие нормальные напряжения при глубины резания $t=1$ мм

№ п/п	Подача s , мм\об	Наибольшие нормальные напряжения σ_{max} , МПа	R_y , Н	Q_{py} , МПа	P_z , Н	Q_{pz} , МПа	R_{xy} , Н	Q_{pxy} , МПа
1	0,21	303	819	450	650	357	907	504
2	0,41	307	1250	687	1650	393	1433	796

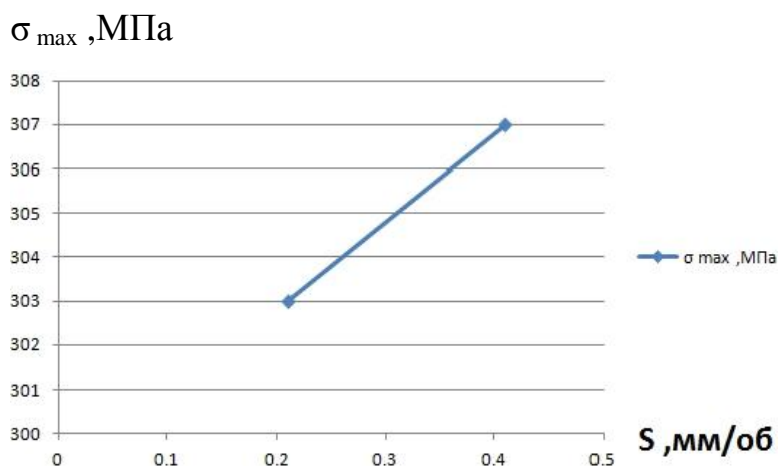


Рис.7.12. Влияние подачи S (мм/об) на величину наибольшего нормального напряжения в режущем клине σ_{\max} (МПа)

Анализ экспериментальных данных показывает что, подача режущей пластины оказывает существенное влияние на наибольшие касательные напряжения.

Таблица .7.2. Влияние подача резания на наибольшие касательные напряжения при глубины резания $t=1$ мм

№п/п	s, мм\об	наибольшие касательные напряжения τ_{\max} , МПа	R_y , Н	Q_{py} , МПа	P_z , Н	Q_{pz} , МПа	R_{xy} , Н	Q_{pxy} , МПа
1	0,21	430	819	450	650	357	907	504
2	0,41	622	1250	687	1650	393	1433	796

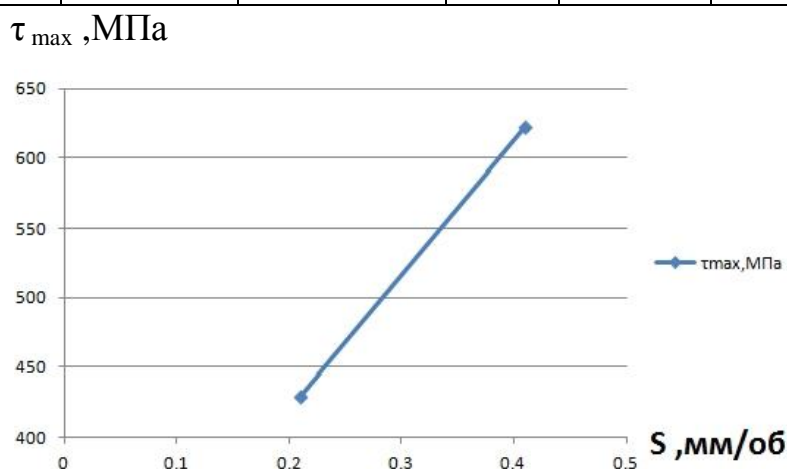


Рис. 7.13. Влияние подачи S (мм/об) на величину наибольшего касательного напряжения в режущем клине τ_{\max} (МПа)

Анализ экспериментальных данных показывает что, подача оказывает существенное влияние на наибольшие эквивалентные напряжения.

Таблица 7.3. Влияние подача резания на наибольшие эквивалентные напряжения при глубины резания $t=1\text{мм}$

№ п/п	$s, \text{мм/об}$	наибольшие эквивалентные напряжения $\sigma_{\max}, \text{МПа}$
1	0,21	1137
2	0,41	1695

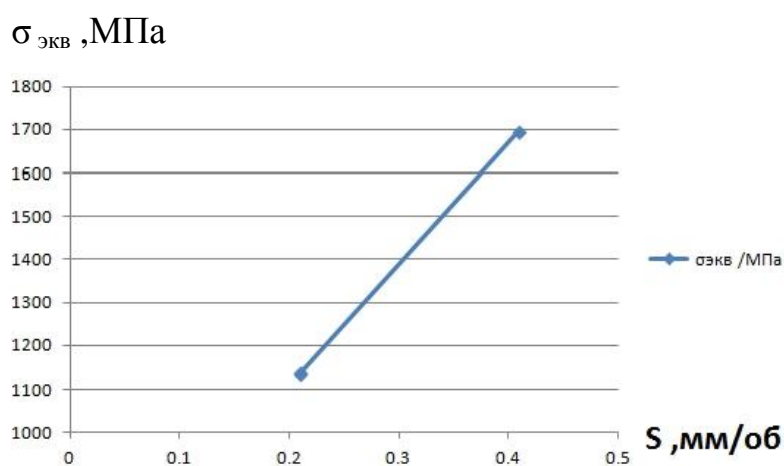


Рис. 7.14. Влияние подачи S (мм/об) на величину наибольшего эквивалентного напряжения в режущем клине $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа)

Анализ экспериментальных данных показывает что, подача режущей пластины оказывает существенное влияние на наибольшие деформации.

Таблица 7.4. Влияние подача резания на наибольшие деформации при глубине резания $t=1\text{мм}$

№ п/п	подача $s, \text{мм/об}$	наибольшие деформации $e_{\max}, \text{мм}$
1	0,21	0,013
2	0,41	0,014

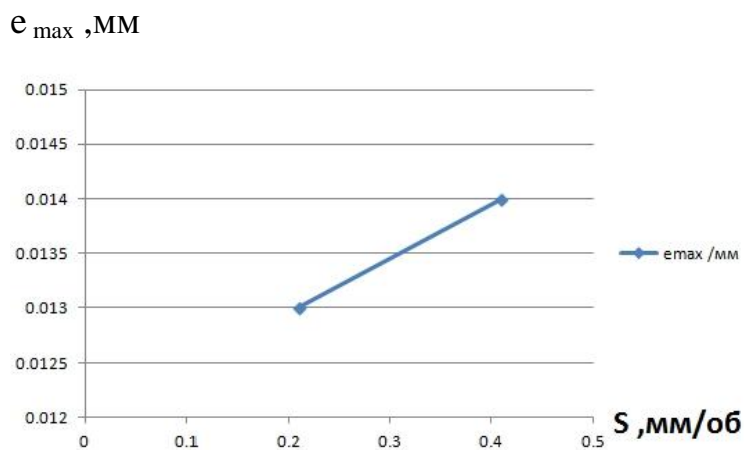


Рис. 7.15. Влияние подачи режущей пластины S (мм/об) на величину наибольшей деформации в режущем клине e_{\max} (мм)

По результатам исследования влияния подачи режущей пластины S (мм/об) на распределение напряжения и деформации в режущем клине можно сделать следующие выводы:

1. При обработке стали 30Х-Т15К6: чем больше подачи режущей пластины, тем меньше нормального, касательного и эквивалентного напряжения в режущем клине.
2. При обработке стали 30Х-Т15К6: чем больше подачи режущей пластины, тем меньше деформации в режущем клине.

8. Исследование прочности торцевой фрезы

Фреза торцевая является широко используемым в машиностроении металлорежущим инструментом, предназначенным для обработки различных плоскостей, уступов, пазов и фасонных поверхностей сложной геометрии. Основной особенностью этого инструмента выступает возможность одновременной обработки двух перпендикулярно расположенных плоскостей, благодаря наличию зубьев как на цилиндрической, так и на торцевой поверхности фрезы.

Используются на станках фрезерных вертикального типа. Ось инструмента расположена перпендикулярно оси рабочей поверхности заготовки. Работают здесь в основном вершины рабочих поверхностей зубьев. Торцевые части помогают, режут в основном боковые рабочие поверхности, находящиеся снаружи.

В связи с тем, что профилирующими являются только вершины кромок, формы кромок отличаются разнообразием. Наиболее удобны инструменты с рабочими кромками в виде окружности или ломаной. С помощью торцового инструмента работа выполняется плавно при минимальном размере припуска. В данном случае величина припуска никак не влияет на угол соприкосновения с деталью, важны лишь диаметр инструмента и ширина фрезерования. По сравнению с другими видами торцовый может обладать большими габаритами и жесткостью, поэтому режущие зубья крепятся надежно и дополнены пластинами из твердых сплавов. Этот инструмент обладает большей производительностью, нежели цилиндрический.

Торцевые фрезы широко применяются при обработке плоскостей на вертикально-фрезерных станках. Ось их устанавливается перпендикулярно обработанной плоскости детали. В отличие от цилиндрических фрез, где все точки режущих кромок являются профилирующими и формируют обработанную поверхность, у торцовых фрез только вершины режущих кромок зубьев являются профилирующими. Торцевые режущие кромки

являются вспомогательными. Главную работу резания выполняют боковые режущие кромки, расположенные на наружной поверхности.

Торцевые фрезы применяются для фрезерования плоскостей, расположенных под прямым углом к оси фрезы. Торцевые фрезы обеспечивают при обработке больших открытых плоскостей более высокую производительность процесса, чем цилиндрические фрезы.

По сравнению с цилиндрическими фрезами торцевые фрезы имеют следующие преимущества: более жесткое крепление на консольной оправке или непосредственно на шпинделе станка; более надежное крепление вставных ножей, что дает возможность чаще изготавливать такие фрезы сборными.

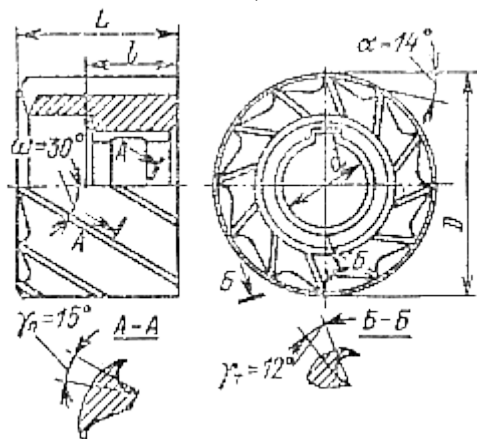
Недостаток – торцевое фрезерование имеет менее плавную работу, хотя угол контакта зависит не от припуска на обработку, а от ширины фрезерования и диаметра фрезы. Но врезание зуба фрезы происходит с ударом, что и сказывается на плавности. Особенно большая проблема возникает при малой ширине фрезеруемой заготовки, особенно когда окружной шаг зубьев торцевой фрезы больше ширины заготовки или сопоставим с шириной заготовки. В этом случае в контакте с заготовкой одновременно находятся всего один или два зуба.

8.1. Конструкции и размеры торцевой фрезы

Табл. 8.1. Торцевые фрезы, конструкции и размеры, мм

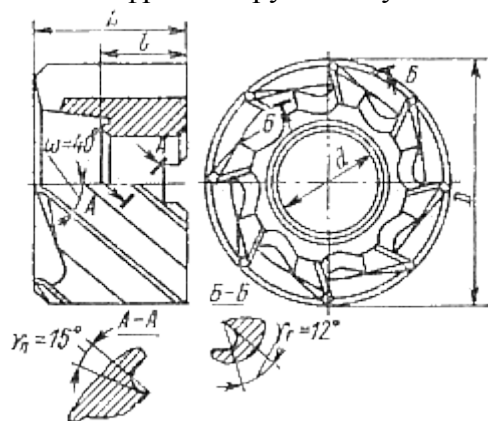
Фрезы торцевые насадные из быстрорежущей стали (ГОСТ 09304 — 69*, СТ СЭВ 1175 — 78) для обработки стали и чугуна

Тип 1 — фрезы мелкозубые с креплением на продольной и на торцевой шпонке (на эскизе не показаны)



D	d	L	l	z	Обозначение фрез	
					праворежущих	леворежущих
С креплением на продольной шпонке						
40	16	32	18	10	2210-0061	2210-0062
50	22	36	20	12	2210-0063	2210-0064
С креплением на торцевой шпонке						
63	27	40	22	14	2210-0071	2210-0072
80	32	45	25	16	2210-0073	2210-0074
100	32	50	28	18	2210-0075	2210-0076

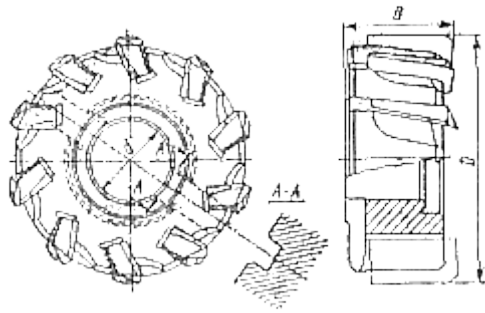
Тип 2 — фрезы с крупным зубом



D	d	L	l	z	Обозначение фрез	
					праворежущих	леворежущих
63	27	40	22	8	2210-0081	2210-0082
80	32	45	25	10	2210-0083	2210-0084
100	32	58	28	12	2210-0085	2210-0086

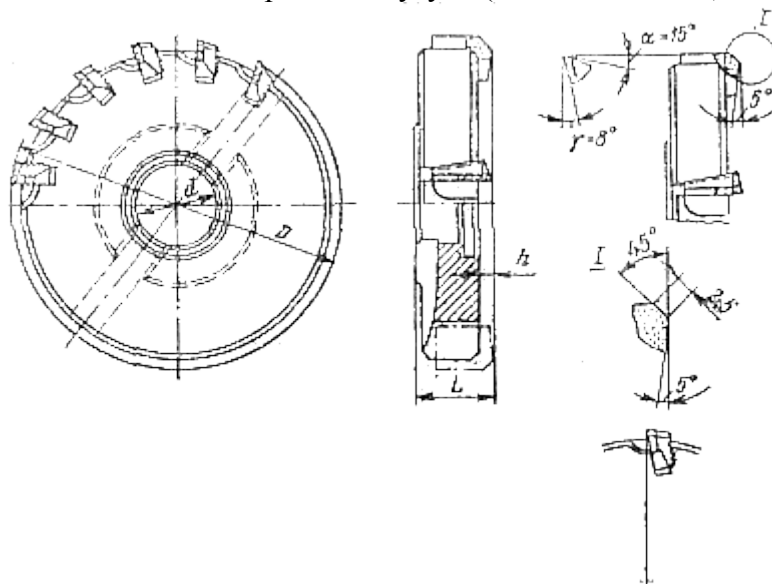
Фрезы торцевые насадные со вставными ножами из быстрорежущей стали диаметром

100—250 мм (ГОСТ 1092-80, СТ СЭВ 200-75)

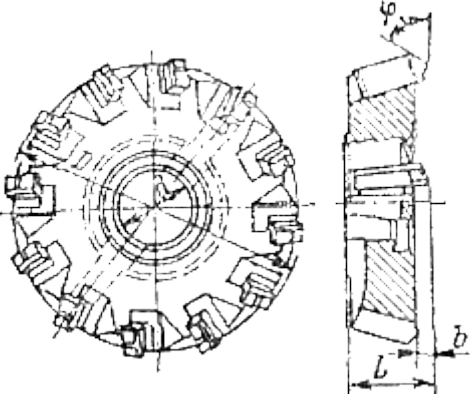
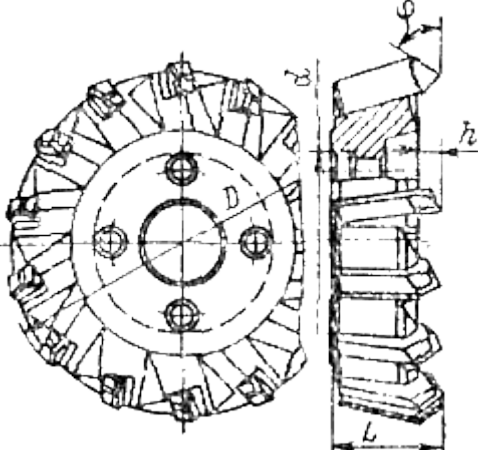


D	l	B	Число ножей z	Углы фрез		Обозначение фрез	
				v	ан	праворежущих	леворежущих
100	32	40	10	15	12	2214-0133	2214-0134
125	40	44	14			2214-0135	2214-0136
160	50	49	16			2214-0137	2214-0138
200	50	49	20			2214-0139	2214-0140
250	50	49	26			2214-0141	2214-0142

Фрезы торцевые насадные со вставными ножами, оснащенными твердосплавными пластинками для обработки чугуна (ГОСТ 9473—80)



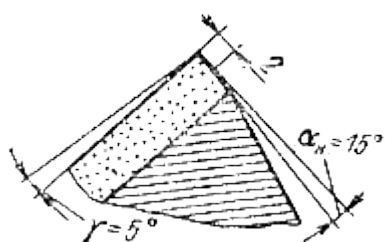
D	d	L	h	Число ножей z	Обозначение фрез	
					праворежущих	леворежущих
100	32	39	4	1	2214-0153	2214-0154
125	40	42	4	12	2214-0155	2214-0156
160	50	46	5	16	2214-0157	2214-0158
200	50	46	5	20	2214-0159	2214-0160
250	60	47	5	24	2214-0161	2214-0162
315	60	66	6	30	2214-0313	2214-0314
400	60	66	6	36	2214-0315	2214-0316
500	60	71	6	36	2214-0317	2214-03148

630	60	71	6	40	2214-0319	2214-0320		
<p>Фрезы торцевые насадные со вставными ножами, оснащёнными твёрдосплавными пластинками (ГОСТ 24359-80) Диаметром 100-200 мм</p> 								
D	d	L	φ, ...°		Число ножей z	Обозначение фрез		
			45, 60, 75	90		праворежущих	леворежущих	
100	32	50	10	7	8 10 12	2214-0001	22147-0002	
125	40	55	12	8,5		2214-0003	2214-0004	
160	50	60				2214-0005	2214-0006	
200						22144-0007	2214-0008	
<p>Диаметром 250-630 мм</p> 								
D	d	L	φ, ...°		Число ножей z	Обозначение фрез		
	Исполнение		45, 60, 75	90		праворежущих	леворежущих	
	I		II					
250	128,57	-	75	15	14	2214-0301	2214-0302	
315					18	2214-0303	2214-0304	
400		221,44	85	17	20	2214-0305	2214-0306	
500					26	2214-0307	2214-0308	

630				30	2214-0309	2214-0310
-----	--	--	--	----	-----------	-----------

Форма заточки ножа

Эскиз

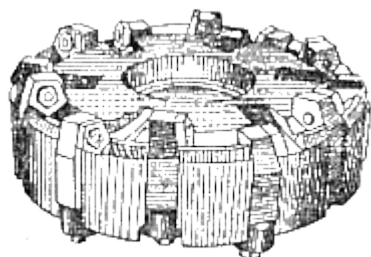


Параметры заточки

В централизованном порядке фрезы изготавливаются с углом в плане $\varphi=60^\circ$ и показанной на эскизе формой I заточки ножа; фрезы с углами в плане φ , равными 45, 75, 90°, и с другой формой заточки ножа — только по заказу.

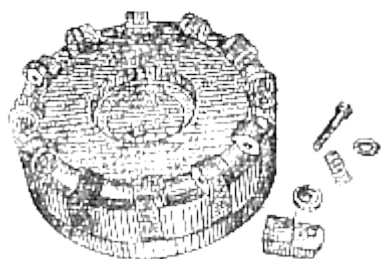
Форма I заточки предназначена для обработки преимущественно чугуна с HB 1800—3000 и стали с $\sigma_{\text{в}} < 800$ МПа. Форма II заточки — для обработки $\sigma_{\text{в}} = 80 \div 1200$ МПа

Фрезы торцевые насадные с механическим креплением пятигранных неперетачиваемых твердосплавных пластин (ГОСТ 22085 — 76*)



D	d	z	Обозначение фрез	
			праворежущих	леворежущих
100	32	10	2214-0291	2214-0295
125	40	12	2214-0292	2214-0296
160	50	14	2214-0293	2214-0297
300	50	16	2214-0234	2214-0298

Фрезы торцевые насадные повышенной жесткости с механическим креплением пятигранных твердосплавных пластин (ГОСТ 20861 — 75)



D	d	h	Число ножей z	Обозначение фрез	
				праворежущих	леворежущих
100	32	10,5	6	2214-0251	2214-0252
	32	11,5	6	2214-0253	2214-0254
125	40	10,5	3	2214-0255	2214-0256
	40	11,5	8	2111-0257	2214-0258
160	50	10,5	10	2214-0261	2214-0262
	50	11,5	10	2214-0263	2214-0264

200	50	10.5	12	2214-0265	2214-0266
	50	11.5	12	2214-0267	2214-0268

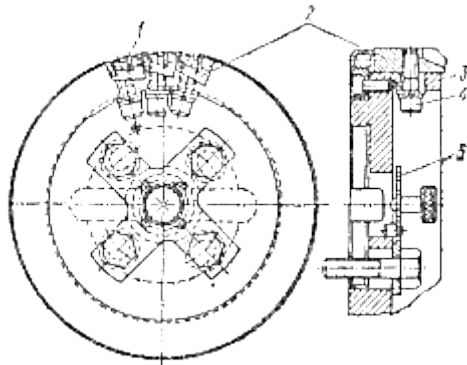
Фрезы торцевые концевые с механическим креплением пятигранных твердосплавных пластин (ГОСТ 22087 — 76*)

D	L	z	Конус Морзе	Обозначение
63	172	5	4	2214-0311
80	202	6	5	2214-0312

Фрезы торцевые концевые г механическим креплением круглых твердосплавных пластин (ГОСТ 22088—76*)

D	L	z	Конус Морзе	Обозначение
50	167	5	4	2214-0321
63	167	6	4	2214-0322
80	197	8	5	2214-0323

Торцевые фрезы ненормализованных конструкций



Фреза для черновой обработки чугуна

Группой инженеров СКБ создана конструкция торцевой, многозубой фрезы без перемычек в корпусе между ножами.

Здесь по окружности корпуса 3 фрезы сделаны угловые гнезда, в которых болтами 1 крепятся широкие ножи 2, имеющие каждый по два зуба 1. Благодаря этому удастся разместить значительно больше зубьев, чем во фрезах обычной конструкции. Большая ширина ножей и малый вылет их из корпуса придают конструкции высокую жесткость, что позволяет заметно увеличить подачу на зуб. При прочих равных условиях фреза новой конструкции по сравнению с обычными фрезами дает возможность увеличить подачу с 6 до 22 мм/об.

Фреза снабжена поворотной прорезной шайбой 5, общей для всех четырех винтов, с помощью которых она крепится на шпинделе. Для съема фрезы со шпинделя станка достаточно ослабить винты и повернуть шайбу. Благодаря этому уменьшается время простоев станка при смене фрез.

8.2. Расчёт режима резания для фрезерования

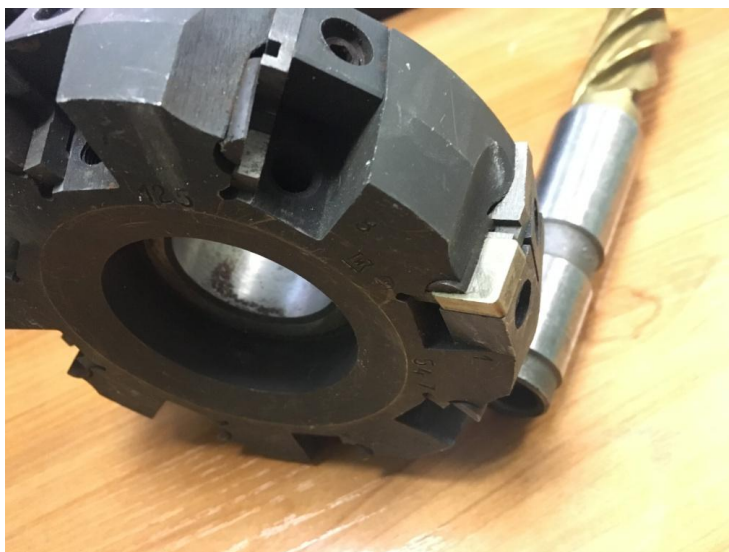


Рис 8.1. Фотография торцевой и концевой фрез

Выбираем торцевую фрезу с углом $\varphi=90^\circ$, т.к. такая торцевая фреза может фрезеровать и широкую плоскость, и уступ, режущая пластина фрезы имеет длинную режущую кромку.

Табл. 8.2. Геометрические параметры фрезы

Наружный диаметр фрезы D	100 мм
Число зубьев z	8

При торцовом фрезеровании для достижения производительных режимов резания диаметр фрезы D должен быть больше ширины фрезерования B , т.е. $D = (1,25 \dots 1,5) \times B$, а при обработке заготовок обязательным является их несимметричное расположение относительно фрезы: для заготовок из конструкционных углеродистых и легированных сталей – сдвиг их в направлении

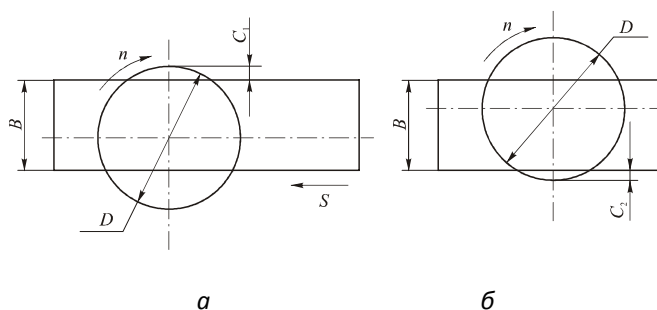


Рис. 8.2. Расположение заготовки при торцовом фрезеровании относительно фрезы: *а* – врезание зуба фрезы при $c_1 = (0,03 \dots 0,05) D$; *б* – выход зуба фрезы при $c_2 = (0,03 \dots 0,05) D$.

врезания зуба фрезы (рис. 8.2, а), чем обеспечивается начало резания при малой толщине срезаемого слоя; для заготовок из конструкционных углеродистых и легированных сталей– сдвиг заготовки в сторону выхода зуба фрезы из резания (рис. 8.2, б), чем обеспечивается выход зуба из резания с минимально возможной толщиной срезаемого слоя. Несоблюдение указанных правил приводит к значительному снижению стойкости инструмента.

Глубина фрезерования t и ширина фрезерования B – понятия, связанные с размерами слоя заготовки, срезаемого при фрезеровании. Во всех видах фрезерования, за исключением торцового, t определяет продолжительность контакта зуба фрезы с заготовкой; t измеряется в направлении, перпендикулярном к оси фрезы. Ширина фрезерования B определяет длину лезвия зуба фрезы, участвующую в резании; B измеряется в направлении, параллельном оси фрезы. При торцовом фрезеровании эти понятия меняются местами.

Подача. При фрезеровании различают подачу на один зуб s_z , подачу на один оборот фрезы s и подачу минутную s_m , мм/мин, которые находятся в следующем соотношении:

$$s_m = s \times n = s_z \times z \times n$$

где n – частота вращения фрезы, об/мин; z – количество зубьев фрезы.

Исходной величиной подачи при черновом фрезеровании является величина ее на один зуб s_z , при чистовом фрезеровании – на один оборот фрезы s , по которой для дальнейшего использования вычисляют величину подачи на один зуб $s_z = s/z$.

Рассчитываем скорость резания – окружную скорость фрезы, м/мин:

$$V_{расч} = \frac{C_v D^q}{T^m t^x s_z^y B^u z^p} K_v \quad (8.1)$$

где C_v, q, x, y, u, p, m – коэффициент и показатели степени в формуле (8.1), которые определяем в табл. 39 (40, стр. 286) и заносим в табл. 8.2;

T – стойкость фрезы, $T = 180$ мин (40, стр. 290);

K_v – коэффициент, зависящий от марки обрабатываемого и инструментального материалов, состояния обрабатываемой поверхности.

$$K_v = K_{mv} \cdot K_{pv} \cdot K_{iv} \quad (8.2)$$

где $K_{mv} = K_g \left(\frac{750}{\sigma_B} \right)^{n_v}$, (40, стр. 261). Для обрабатываемого материала – стали 35ХГСА, – предел прочности на растяжение $\sigma_B = 1650$ МПа. Тогда:

$$K_{mv} = 1 \cdot \left(\frac{750}{1650} \right) = 0,45$$

$$K_v = K_{mv} \cdot K_{pv} \cdot K_{iv} = 0,45 \cdot 1 \cdot 1 = 0,45.$$

По таблице (43, стр. 261). получаем $T=180$ мин

По таблице (43, стр. 261). получаем $C_v=332, q_x=0,2, x=0,1,$
 $y=0,4, i=0,2, p=0, m=0,2.$

По формуле расчета скорости резания:

$$V_{расч} = \frac{C_v D^q}{T^m t^x s_z^y B^u z^p} K_v$$

$$= \frac{332 \cdot 100^{0,2}}{180^{0,2} \cdot 3^{0,1} \cdot 0,18^{0,4} \cdot 80^{0,2} \cdot 8^0} \times 0,45 = 98 \text{ м/мин}$$

Рассчитываем частоту вращения фрезы

$$n = 1000 \cdot V_{расч} / (\pi \cdot D) = 1000 \cdot 98 / (\pi \cdot 100) = 312 \text{ об/мин.}$$

Принимаем $n = 312$ об/мин.

Рассчитываем минутную подачу: $s_{мин} = s_z \cdot z \cdot n = 0,18 \cdot 8 \cdot 312 = 449,28$ мм/мин.

Сила резания. Главная составляющая силы резания при фрезеровании - окружная сила P_z , Н

$$P_z = \frac{10 C_p t^x s_z^y B^u z}{D^q n^w} \times K_p \quad (8.3)$$

где z – количество зубьев фрезы; n – частота вращения фрезы, об/мин.

Значения коэффициента C_p и показателей степени, поправочный коэффициент на качество обрабатываемого материала K_{Mp} для стали и чугуна, а для медных и алюминиевых сплавов. Величины остальных составляющих силы резания: горизонтальной (сила подачи) P_h , вертикальной P_v , радиальной P_y , осевой P_x рассчитывают из соотношения с главной составляющей P_z по табл. (42, стр. 263).

Составляющая, по которой рассчитывают оправку на изгиб, $P_{yz} = \sqrt{P_y^2 + P_z^2}$.

По таблице(46, стр. 266).получаем $C_p=825, x=1, y=0,75, u=1,1, q=1,3, w=0,2$.

По таблице(47, стр. 267).получаем $K_{Mp} = \left(\frac{\sigma_B}{750}\right) = \frac{1650}{750} = 2,2; K_{\varphi p}=1,1; K_{\lambda p}=1$.

$$K_p = K_{Mp} K_{\varphi p} K_{\lambda p} = 2,2 \cdot 1,1 \cdot 1 = 2,42$$

Рассчитываем тангенциальную составляющую силы резания:

$$P_z = \frac{10 C_p f^x s_z^y B^u z}{D^q n^w} \times K_p = \frac{10 \cdot 825 \cdot 3^1 \cdot 0,3^{0,75} \cdot 80^{1,1} \cdot 8^1}{100^{1,3} \cdot 312^{0,2}} \cdot 2,42 = 19\,182 \text{ Н}$$

Из соотношений в таблице 48, [2, стр. 268], получил другие составляющие силы резания :

$$P_h/P_z = 0,8 \quad P_h = 19182 \cdot 0,8 = 15\,345 \text{ Н}$$

$$P_v/P_z = 0,95 \quad P_v = 19182 \cdot 0,95 = 18\,223 \text{ Н}$$

$$P_y/P_z = 0,4 \quad P_y = 19182 \cdot 0,4 = 7\,673 \text{ Н}$$

$$P_x/P_z = 0,55 \quad P_x = 19182 \cdot 0,55 = 10\,550 \text{ Н}$$

8.3. Расчёт удельных сил резания и контактных нагрузок при фрезеровании и точении

Сталь 40X – Т15К6, $v = 120$ м/мин, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$,

длина контакта стружки по п.п.: при $s = 0,41$ мм/об $c = 3$ мм, $K_a = 0,14$:

при $s = 0,07$ мм/об $c = x$ мм

Рассчитываем длину контакта стружки с передней поверхностью резца при $s = 0,07$ мм/об: $x = 3 \times 0,07 / 0,41 = 0,51$ мм, т.е. $c = 0,51$ мм при $s = 0,07$ мм/об. Результаты расчётов подставляем в таблицу 1.

Удельная сила резания при $s = 0,07$ мм/об, $t = 1,775$ мм:

$$q_{Pz} = P_z / (b \times a) = 885 / (2,51 \times 0,05) = 7051 \text{ Н/мм}^2 = 7051 \text{ МПа};$$

$$\text{или: } q_{Pz} = P_z / (t \times s) = 885 / (1,775 \times 0,07) = 7122 \text{ Н/мм}^2 = 7122 \text{ МПа};$$

$$q_{P_{xy}} = P_{xy} / (b \times a) = 1043 / (2,51 \times 0,05) = 8310 \text{ Н/мм}^2 = 8310 \text{ МПа}$$

$$\text{или: } q_{P_{xy}} = P_{xy} / (t \times s) = 1043 / (1,775 \times 0,07) = 8394 \text{ Н/мм}^2 = 8394 \text{ МПа}.$$

Удельная контактная нагрузка на п.п. при $s = 0,07$ мм/об, $t = 1,775$ мм, $c = 0,51$ мм:

$$q_N = P_z / (b \times c) = 885 / (2,51 \times 0,51) = 691 \text{ Н/мм}^2 = 691 \text{ МПа};$$

$$q_F = P_{xy} / (b \times c) = 1043 / (2,51 \times 0,51) = 815 \text{ Н/мм}^2 = 815 \text{ МПа}.$$

Средний коэффициент трения на передней поверхности резца $\mu = q_F / q_N = 815 / 691 = 1,18$

Таблица 8.3. Удельные силы резания и контактные нагрузки при резании **острым резцом** (без фаски на задней поверхности) (по результатам экспериментов)

N	Под ача s, мм/об	Тол ши на сре за a, мм	Длина кон так та стружк и с передн ей пов. c	Глуб ина рез. t, мм	Шир ина среза b, мм	Pz, Н (точение)	Уд. сила рез., q _{Pz} , Н/мм ²	Уд. норм. сила на п.п. q _N , Н/мм ²	P _{xy} , Н (точение)	Уд. сила рез. q _{P_{xy}} , Н/мм ²	Уд. касат . сила на п.п. q _F , Н/мм ²	Коэ фф. тре ния μ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1.	0,07	0,05	0,51	1,775	2,51	885	7051	691	1043	8310	815	1,18
2.	0,11	0,08	0,79	1,775	2,51	975	4856	492	1045	5204	527	1,07
3.	0,23	0,16	1,64	1,775	2,51	368	916	89	938	2336	228	2,56
4.	0,34	0,24	2,43	1,775	2,51	382	634	63	1000	1660	164	2,60
5.	0,52	0,37	3,71	1,775	2,51	388	418	42	1021	1099	110	2,62
6.	0,07	0,05	0,51	0,8	1,13	255	4513	442	627	11097	1088	2,46
7.	0,11	0,08	0,79	0,8	1,13	258	2854	289	633	7002	709	2,45

8.	0,11	0,08	0.79	1,35	1,9	304	2000	203	703	4625	787	3,88
9.	0,07	0,05	0.51	1,825	2,58	205	1589	156	489	3790	372	2,38
10.	0,11	0,08	0.79	1,825	2,58	179	867	88	410	1986	201	2,28
11.	0,07	0,05	0.51	3	4,24	843	3976	163	776	3660	359	2,20
12.	0,23	0,16	1.64	3	4,24	918	1353	132	1222	1801	176	1,33
13.	0,07	0,05	0.51	2	2,83	659	4657	457	714	5046	495	1,08
14.	0,11	0,08	0.79	2	2,83	663	2928	297	880	3887	394	1,33
15.	0,23	0,16	1.64	2	2,83	689	1522	148	920	2032	198	1,34
16.	0,34	0,24	2.43	2	2,83	720	1060	105	840	1237	122	1,16
17.	0,07	0,05	0.51	2,025	2,86	517	3615	354	379	2650	260	0,73
18.	0,11	0,08	0.79	2,025	2,86	672	2937	297	420	1836	186	0,63
19.	0,23	0,16	1.64	2,025	2,86	1207	2638	257	749	1637	160	0,62
20.	0,34	0,24	2.43	2,025	2,86	1606	2340	231	900	1311	130	0,56
21.	0,52	0,37	3.71	2,025	2,86	2151	2033	203	1031	974	97	0,48
22.	0,07	0,05	0.51	2,075	2,93	462	3153	309	298	2034	199	0,64
23.	0,11	0,08	0.79	2,075	2,93	630	2688	272	403	1719	174	0,64
24.	0,23	0,16	1.64	2,075	2,93	1222	2607	254	745	1589	155	0,61
25.	0,34	0,24	2.43	2,075	2,93	1591	2263	223	881	1252	124	0,56
26.	0,52	0,37	3.71	2,075	2,93	2114	1950	194	1020	941	94	0,48

Из таблицы 8.3 рассчитываем влияние толщины среза на удельные силы резания и заносим в табл. 8.4:

Таблица 8.4. Влияние толщины среза на удельные силы резания ($t = \text{const} = 1,775 \text{ мм}$)

Толщина среза a , мм	Уд. сила рез., q_{pz} , Н/мм ²	Уд. сила рез. q_{pxy} , Н/мм ²
0,05	7051	8310
0,08	4856	5204
0,16	916	2336
0,24	634	1660
0,37	418	1099

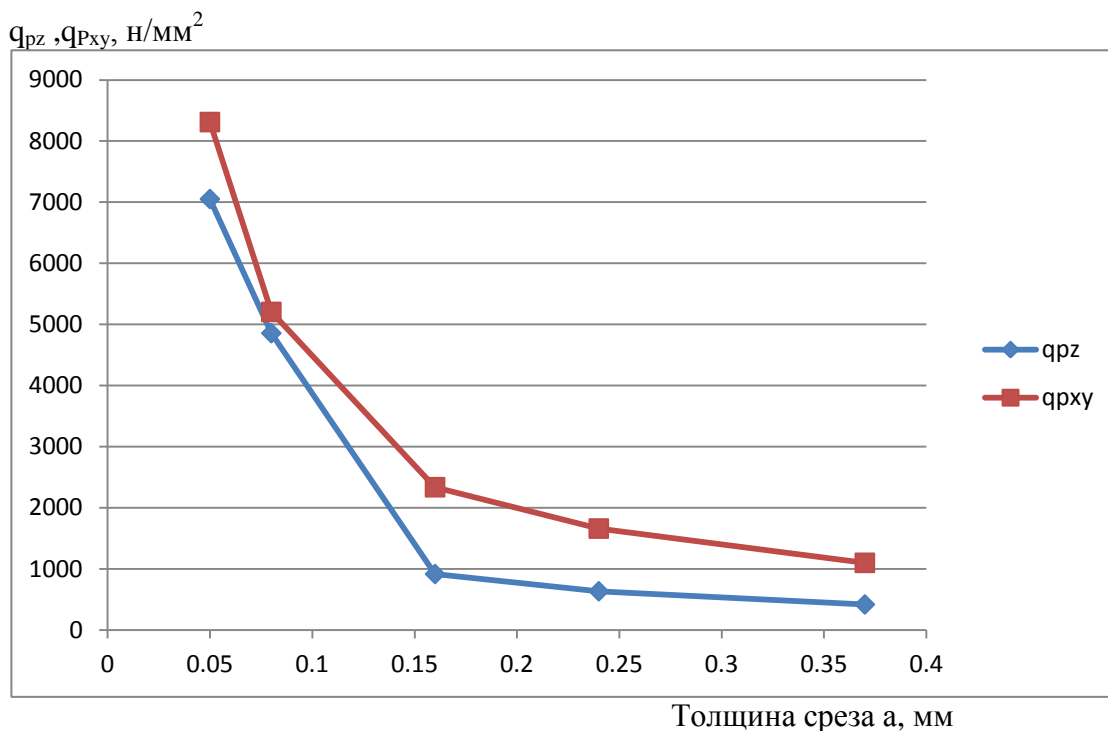


Рис. 8.3. Влияние толщины среза на удельные силы резания ($t=\text{const}=1,775\text{мм}$)

Таблица 8.5. Влияние толщины среза на удельные силы резания ($t=\text{const}=2,025\text{мм}$)

Толщина среза а, мм	Уд. сила рез., q _{pz} , Н/мм ²	Уд. сила рез. q _{pxy} , Н/мм ²
0,05	3615	2650
0,08	2937	1836
0,16	2638	1637
0,24	2340	1311
0,37	2033	974

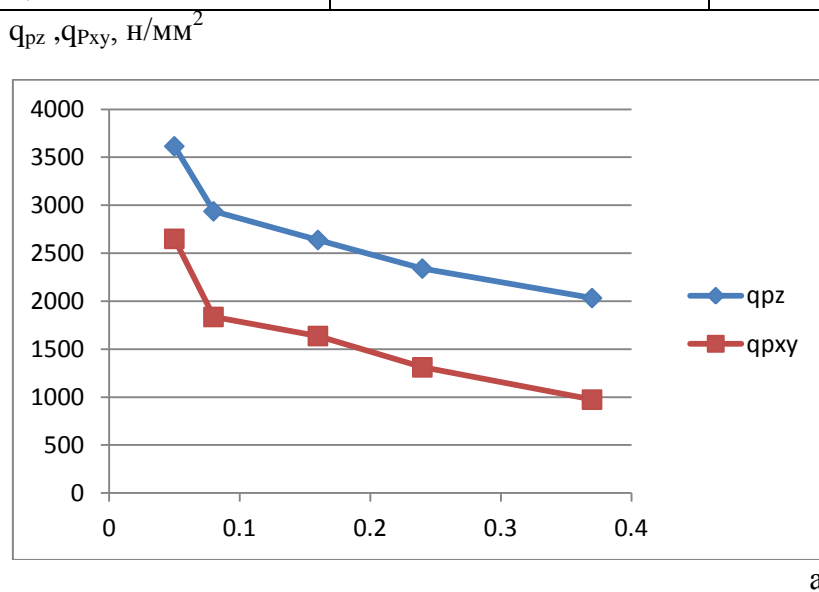


Рис. 8.4. Влияние толщины среза на удельные силы резания ($t=\text{const}=2,025\text{ мм}$)

Таблица 8.6. Влияние толщины среза на удельные силы резания $t=\text{const}=2,075\text{мм}$

Толщина среза a, мм	Уд. сила рез., q_{pz} , Н/мм ²	Уд. сила рез. q_{pxy} , Н/мм ²
0,05	3153	2034
0,08	2688	1719
0,16	2607	1589
0,24	2263	1252
0,37	1950	941

$q_{pz}, q_{pxy}, \text{Н/мм}^2$

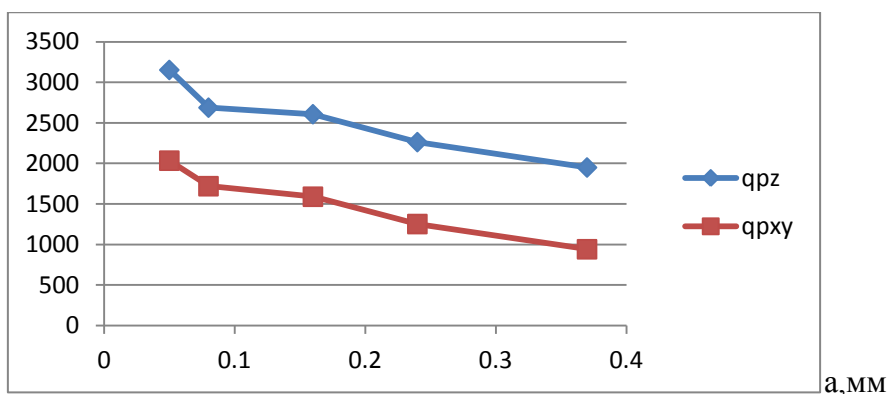


Рис. 8.5. Влияние толщины среза на удельные силы резания ($t=\text{const}=2,075 \text{ мм}$)

Таблица .8.7. Влияние ширины среза (глубины резания) на удельные силы резания ($s=\text{const}=0,07\text{мм/об}$)

Ширина среза b, мм	Уд. сила рез., q_{pz} , Н/мм ²	Уд. сила рез. q_{pxy} , Н/мм ²
2,51	7051	8310
2,58	1589	3790
2,83	4657	5046
2,86	3615	2650
2,93	3153	2034
4,24	3976	3660

$q_{pz}, q_{pxy}, \text{Н/мм}^2$

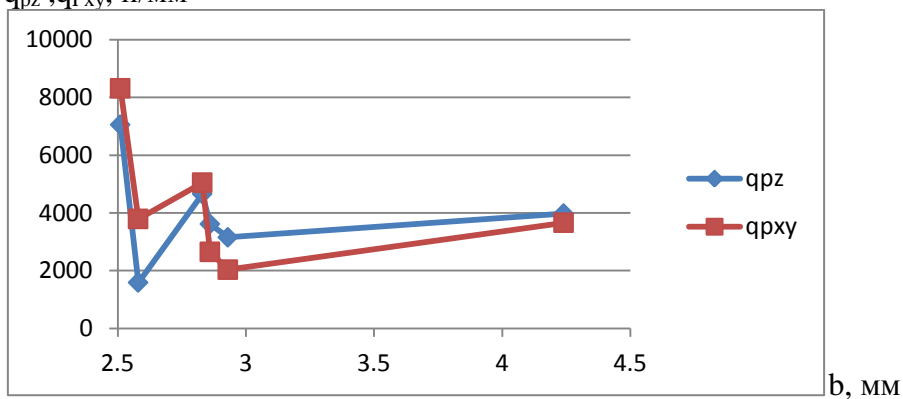


Рис. 8.6. Влияние ширины среза на удельные силы резания ($s=\text{const}=0,07\text{мм/об}$)

1) $s=\text{const}=0,11\text{мм/об}$

Ширина среза b , мм	Уд. сила рез., q_{pz} , Н/мм ²	Уд. сила рез. $q_{рху}$, Н/мм ²
1.9	2000	4625
2.51	4856	5204
2.58	867	1986
2.83	2928	3887
2.86	2937	1836
2.93	2688	1719

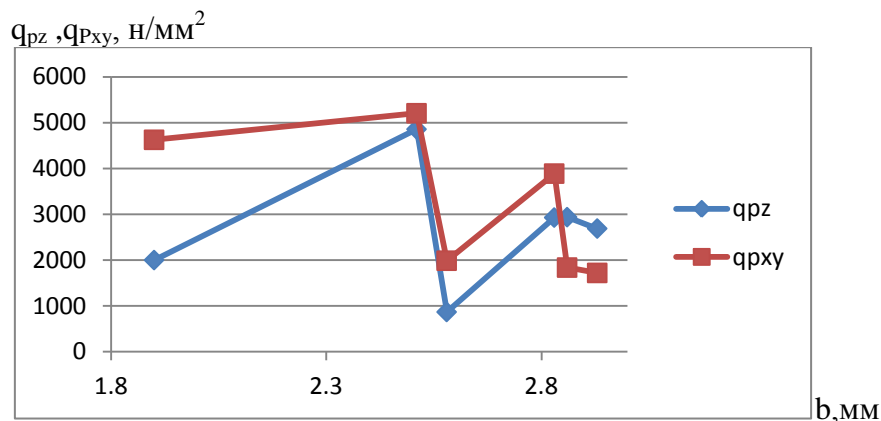


Рис. 8.7. Влияние ширины среза на удельные силы резания ($s=\text{const}=0,11\text{мм/об}$)

2) $s=\text{const}=0,23\text{мм/об}$

Ширина среза b , мм	Уд. сила рез., q_{pz} , Н/мм ²	Уд. сила рез. $q_{рху}$, Н/мм ²
2.51	916	2336
2.83	1522	2032
2.86	2638	1637
2.93	2607	1589
4.24	1353	1801

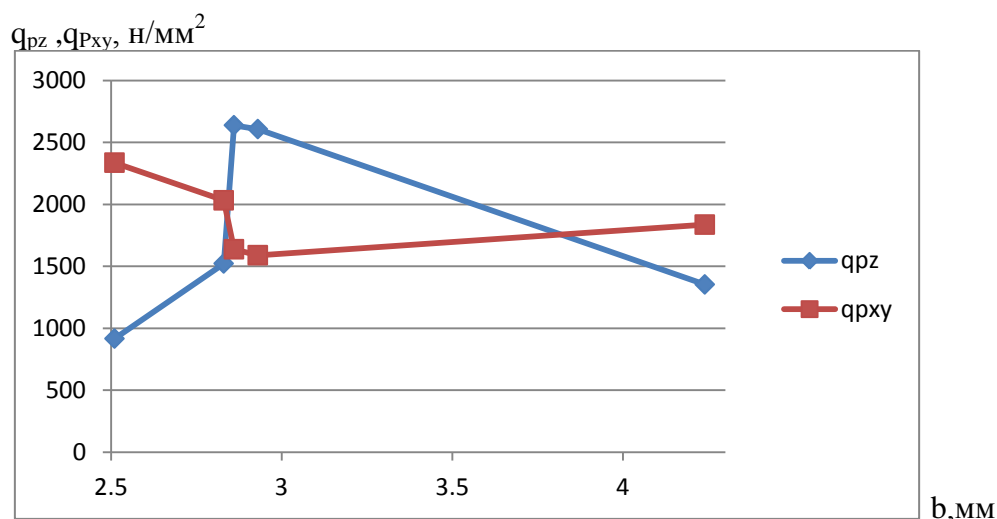


Рис. 8.8. Влияние ширины среза на удельные силы резания ($s=\text{const}=0,23\text{мм/об}$)

Вывод: При постоянной глубине резания ($t=\text{const}$) чем больше толщины среза a , тем меньше удельная сила резания. Изменение глубины резания (ширины среза) неоднозначно влияет на удельную силу резания.

8.4. Расположение заготовки при фрезеровании торцевой фрезой

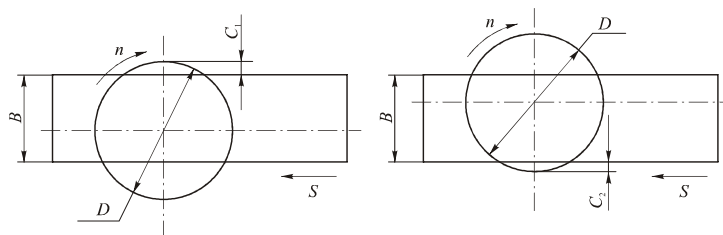


Схема расположения стальной заготовки при торцовом фрезеровании относительно фрезы

$$a = a_{\max} = S_z = 0.18 \text{ (мм)}$$

Рассчитываем силу резания при фрезеровании торцевой фрезой:

$$P_{z_i} = q p_z t a_i$$

$$P_{z_{\max}} = q p_z t a_{\max} = q p_z t S_z$$

$$P_{xy_i} = q p_{xy} t a_i$$

$$P_{xy_{\max}} = q p_{xy} t a_{\max} = q p_{xy} t S_z$$

Таблица .8.8. Удельные силы резания и контактные нагрузки при фрезеровании торцевой фрезой (без фаски на задней поверхности) (по результатам экспериментов)

N	Под ача s, мм/об	Тол ши на сре за a, мм	Длина контак та стружк и с передн ей пов. с	Глуб ина рез. t, мм	Шир ина среза b, мм	Pz, Н (фрезе ровани е)	Уд. сила рез., q _{pz} , Н/мм ²	Уд. норм. сила на п.п. q _N , Н/мм ²	P _{xy} , Н (фрезе ровани е)	Уд. сила рез. q _{Pxy} , н/мм ²	Уд. касат . сила на п.п. q _F , Н/мм ²	Коэ фф. тре ния μ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1.	0,07	0,05	0,51	1,775	2,51	2253	7051	1760	2655	8310	2074	1,18
2.	0,11	0,08	0,79	1,775	2,51	1551	4856	782	1663	5204	839	1,07
3.	0,23	0,16	1,64	1,775	2,51	293	916	71	746	2336	181	2,55
4	0,34	0,24	2,43	1,775	2,51	203	634	33	530	1660	87	2,64
5	0,52	0,37	3,71	1,775	2,51	134	418	14	351	1099	38	2,71
6	0,07	0,05	0,51	0,8	1,13	650	4513	1128	1598	11097	2773	2,46
7	0,11	0,08	0,79	0,8	1,13	411	2854	460	1008	7002	1129	2,45
8	0,11	0,08	0,79	1,35	1,9	486	2000	324	1124	4625	749	2,31
9	0,07	0,05	0,51	1,825	2,58	522	1589	397	1245	3790	946	2,38
10	0,11	0,08	0,79	1,825	2,58	285	867	140	652	1986	320	2,29
11	0,07	0,05	0,51	3	4,24	2147	3976	993	1976	3660	914	0,92
12	0,23	0,16	1,64	3	4,24	731	1353	105	972	1801	140	1,33
13	0,07	0,05	0,51	2	2,83	1677	4657	1162	1816	5046	1258	1,08
14	0,11	0,08	0,79	2	2,83	1054	2928	471	1399	3887	626	1,33
15	0,23	0,16	1,64	2	2,83	548	1522	328	731	2032	158	0,48
16	0,34	0,24	2,43	2	2,83	382	1060	56	445	1237	65	1,16
17	0,07	0,05	0,51	2,025	2,86	1318	3615	904	966	2650	662	0,73

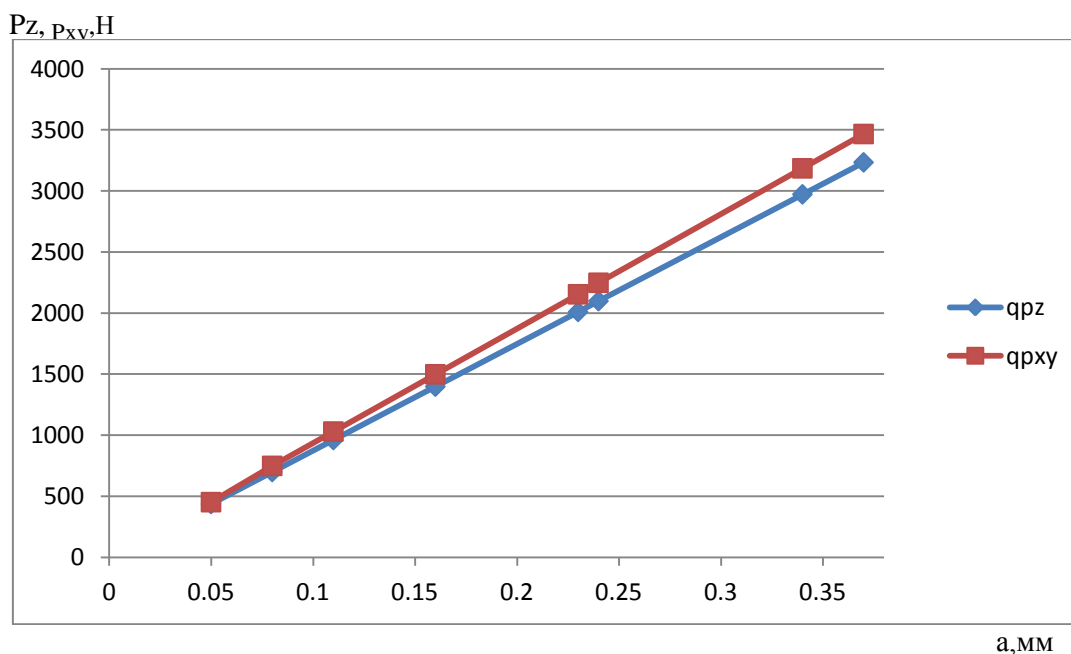
18	0,11	0,08	0.79	2,025	2,86	1071	2937	474	669	1836	296	0,62
19	0,23	0,16	1.64	2,025	2,86	962	2638	205	597	1637	127	0,62
20	0,34	0,24	2.43	2,025	2,86	853	2340	123	478	1311	69	0,56
21	0,52	0,37	3.71	2,025	2,86	741	2033	70	355	974	33	0,47
22	0,07	0,05	0.51	2,075	2,93	1178	3153	788	760	2034	509	0,64
23	0,11	0,08	0.79	2,075	2,93	1004	2688	434	642	1719	277	0,64
24	0,23	0,16	1.64	2,075	2,93	974	2607	203	593	1589	123	0,61
25	0,34	0,24	2.43	2,075	2,93	845	2263	119	468	1252	66	0,55
26	0,52	0,37	3.71	2,075	2,93	728	1950	67	351	941	32	0,48

При $q_{pz}=4856 \text{ Н/мм}^2=\text{const.}$ $q_{pxy}=5204 \text{ Н/мм}^2=\text{const.}$

По формуле: $Pz_i=q_{pz} \cdot t \cdot a_i$

где $t=1,8\text{мм}=\text{const.}$

No	Толщина рез. а,мм	$Pz_{\text{max}}, \text{Н}$ (фрезерование)	$P_{xy}, \text{Н}$ (фрезерование)
1	0,05	437	452
2	0,08	699	749
3	0,11	961	1030
4	0,16	1398	1499
5	0,23	2010	2154
6	0,24	2098	2248
7	0,34	2972	3185
8	0,37	3234	3466



Данные размеров пластины торцевой фрезы:

Длина пластины: 7,94мм; Ширина пластины: 11мм; Толщина пластины: 4,76мм

Длина контакта нагрузки $c=1,3\text{мм}$, Ширина контакта нагрузки $t = 1,8\text{мм}$.

Условное обозначения фрезы: FRAS-100N32-R8ZP1,8/11

1. Тип обработки: Фрезерование плоскости и уступов
2. Вид обработки: Черновая
3. Угол в плане: 90°
4. Применение: Стандартные (фрезы общего применения)
5. Диаметр фрезы: 100мм
6. Вид посадки: Насадная
7. Диаметр посадки: 32мм
8. Направление обработки: Правое
9. Количество зубьев: 8
10. Форма пластины: ZPHT 1506..R;
11. Длина контакта режущей кромки с заготовкой: 1,8 мм
12. Суммарная длина режущей кромки: 11 мм

8.5. Создание 3D модели зубы торцевой фрезы:

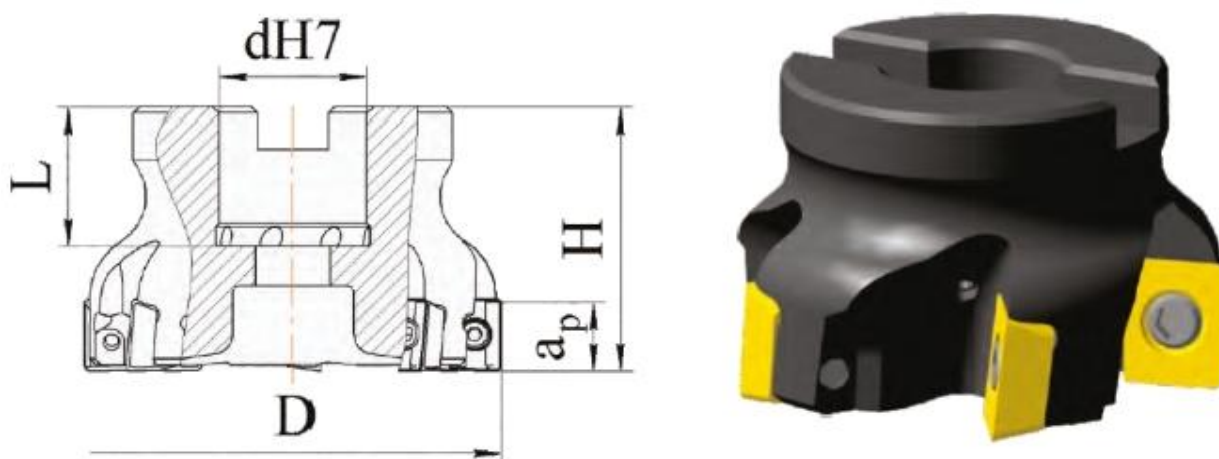


Рис.8.5. Эскиз и фотография торцевой фрезы

Обозначение	Диаметр фрезы D, мм	Диаметр посадки d, мм	Высота фрезы H, мм	Высота посадки L, мм	Ширина пластины a_p , мм	Кол-во зубьев Z, мм	Пластина
FRAS-100N32-R8ZP15	100	32	50	25	11	8	ZPHT 1506..R

Пластины и рекомендуемые режимы резания:

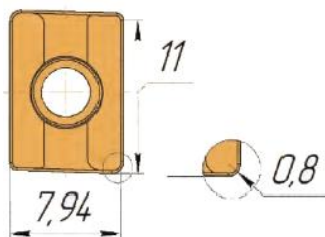



Рис.8.6. Размеры режущей пластины (ZPNT 1506..R)

Длина, мм	Ширина, мм	Фаска, мм	Подача Sz, мм/зуб	Глубина ар, мм	Скорость резания v, м/мин
7,94	11	0,8	0,18	1,8	120

Вид износа и его причина:

Износ по задней поверхности	Причины износа	Решение
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Большая скорость резания; 2. Сплав с низкой износостойкостью; 3. Малая подача; 4. Несоответствие геометрии пластины 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Снизить скорость резания; 2. Использовать более износостойкий сплав; 3. Увеличить подачу на зуб; 4. Использовать пластины с другой геометрией

Выбор вида фрезерования:

При встречном фрезеровании направление подачи заготовки и направление вращения фрезы не совпадают. Толщина среза изменяется от нуля при входе зуба до максимум при выходе из обрабатываемого материала. Данный вид обработки рекомендуется применять при черновой обработки по корке, а так же на не жестком разбитом оборудовании.

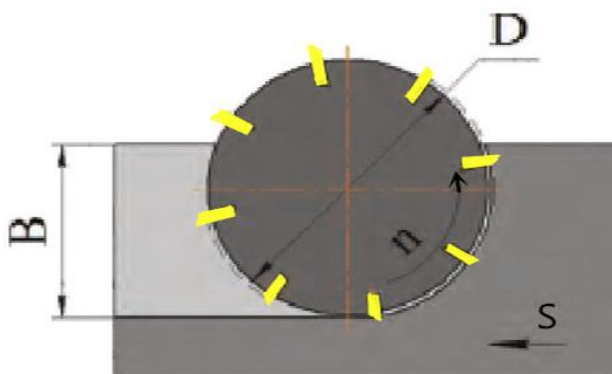


Рис.8.7. Встречное фрезерование при левом вращении фрезы

Режим фрезерования:

Диаметр торцевой фрезы $D=100$ мм, Ширина фрезерования $B=80$ мм, Частота вращения фрезы $n=312$ об/мин.

При $S_z=a=0.18$ мм/зуб по графику получили:

$$y_{Pz}=8743x+0.8; y_{Pxy}=9357x+1.8$$

$$Pz=1575\text{Н}. Pxy=1686\text{Н}$$

$$c=1.3\text{мм}, b=1.8\text{мм}$$

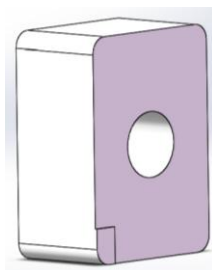
Для материала 40Х ($\sigma_x=1000$ МПа) удельная контактная нагрузка на п.п.

при $s=0,18$ мм/об, $t=1,8$ мм, $c=1,3$ мм:

$$q_N = Pz / (b \times c) = 1575 / (1,8 \times 1,3) = 673 \text{ Н/мм}^2 = 673 \text{ МПа};$$

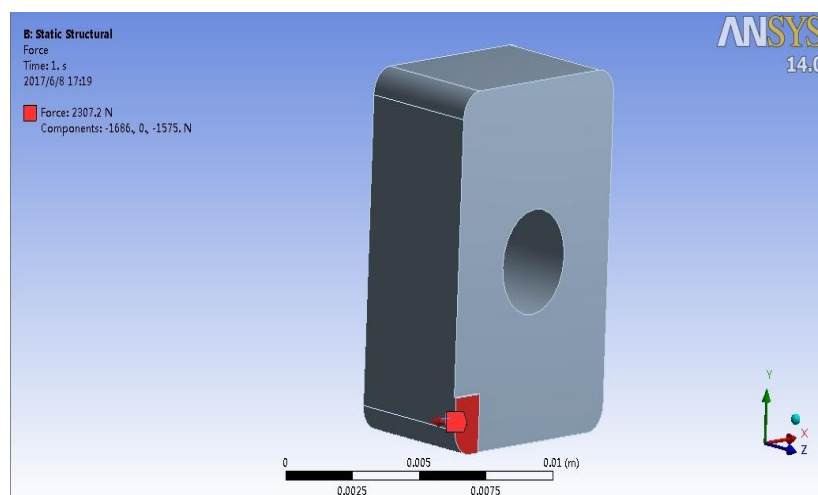
$$q_F = P_{xy} / (b \times c) = 1686 / (1,8 \times 1,3) = 721 \text{ Н/мм}^2 = 721 \text{ МПа}.$$

По программе Solid Works создаём 3D модель режущей пластины с выступом (высотой 0.001 мм) в левом нижнем углу (на передней поверхности) для приложения там внешней нагрузки.



3D модель режущей пластины

8.6 По программе ANSYS введение 3D модели пластины



8.7. Влияние подачи резания на НДС режущего клина

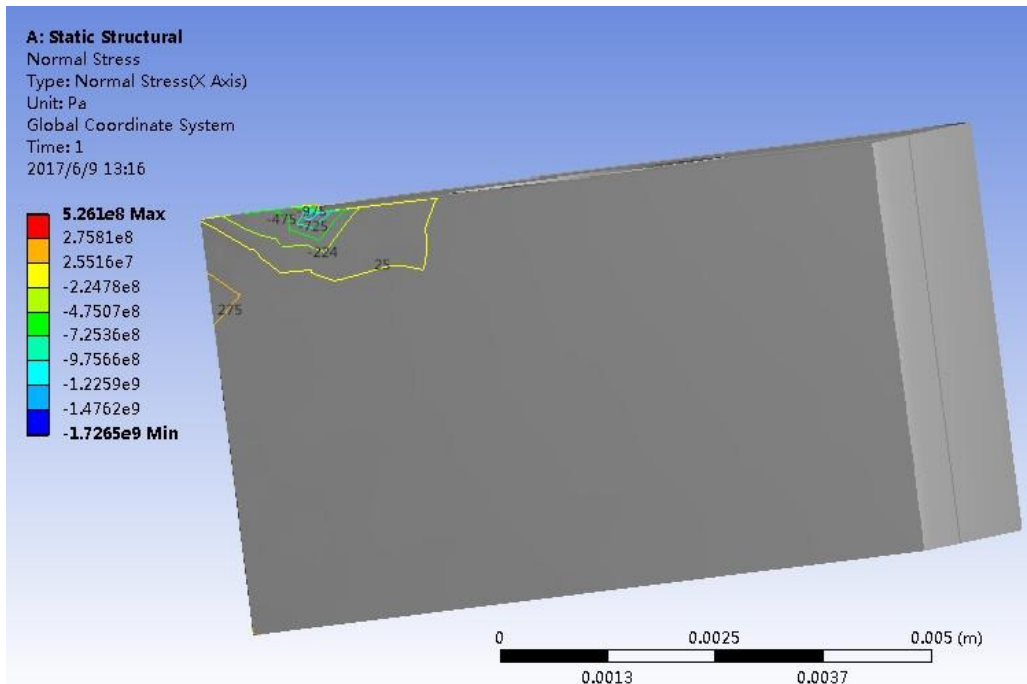


Рис.8.8. Распределение внутренних нормальных напряжений σ_x , МПа, (вдоль оси, параллельной передней поверхности) в режущем клине. Сталь 40X –Т15К6, $s_z=0,18$ мм/зуб, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

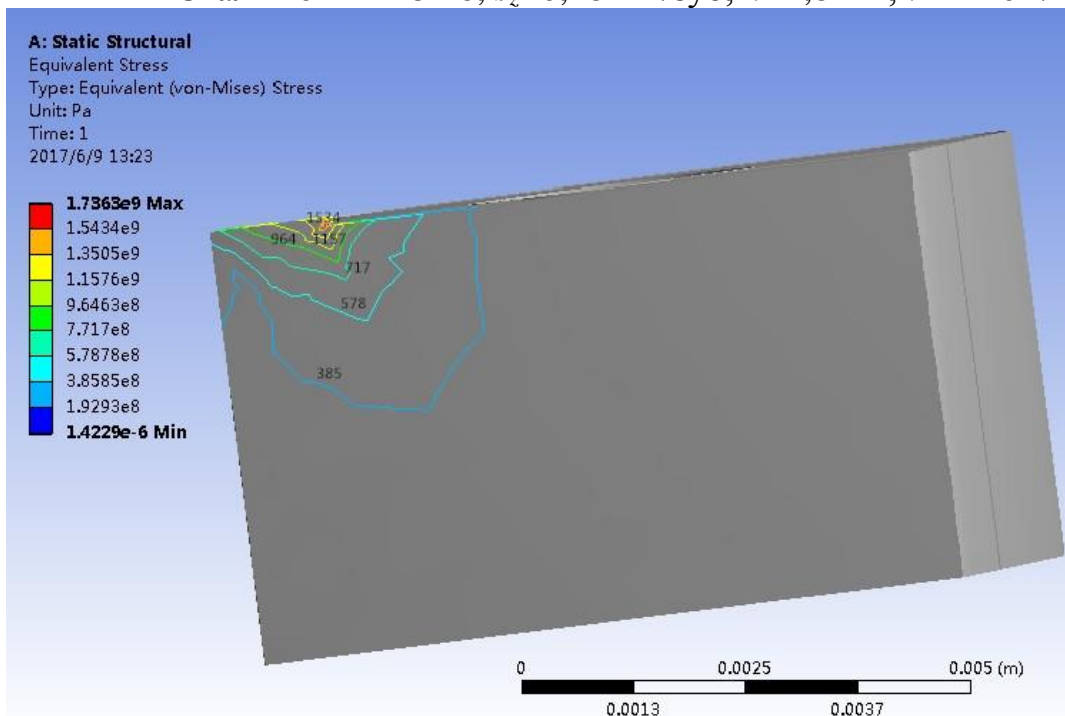


Рис.8.9. Распределение внутренних эквивалентных напряжений в режущем клине. Сталь 40X–Т15К6, $s_z=0,18$ мм/зуб, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

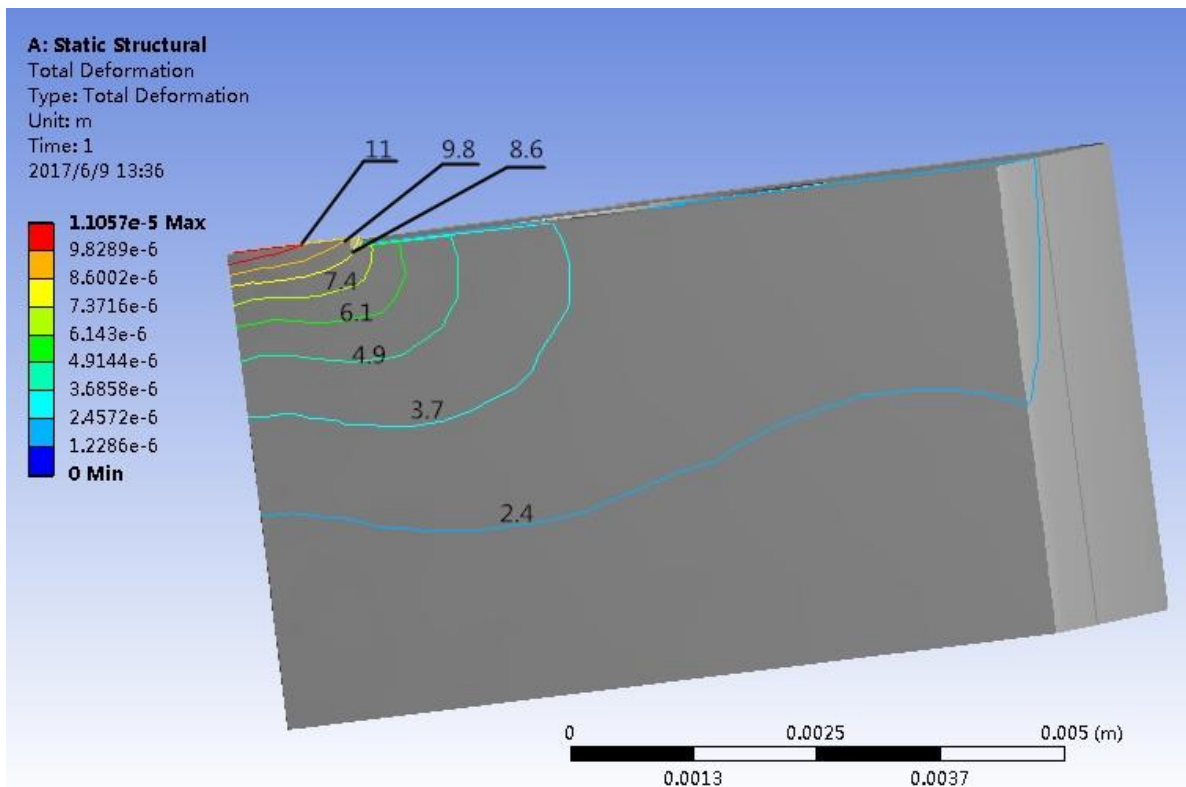


Рис. 8.10. Деформация режущего клина (мкм). Сталь 40Х–Т15К6, $s_z=0,18\text{мм/зуб}$, $t=1,8\text{ мм}$, $v = 120\text{м/мин}$

При $s=0,07\text{ мм/об}$, $t = 1,8\text{мм}$, $c= 1,3\text{ мм}$ по таблице получаем:

$$P_z=885\text{ Н}, P_{xy}=1043\text{Н};$$

$$q_N = P_z / (b \times c) = 885 / (1,8 \times 1,3) = 378\text{ Н/мм}^2 = 378\text{ МПа};$$

$$q_F = P_{xy} / (b \times c) = 1043 / (1,8 \times 1,3) = 721\text{Н/мм}^2 = 446\text{ МПа}.$$

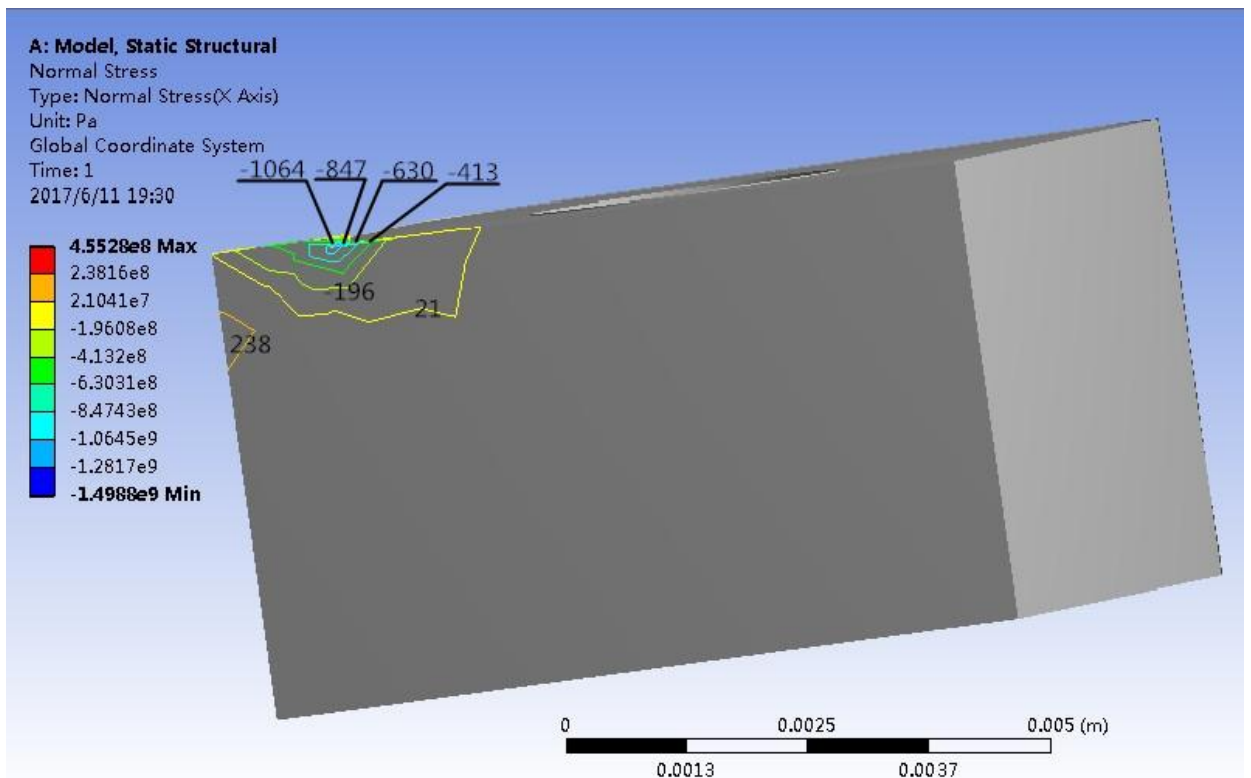


Рис.8.11. Распределение внутренних нормальных напряжений σ_x (параллельно передней поверхности) в режущем клине. Сталь 40X –Т15К6, $s_z=0,07$ мм/зуб, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

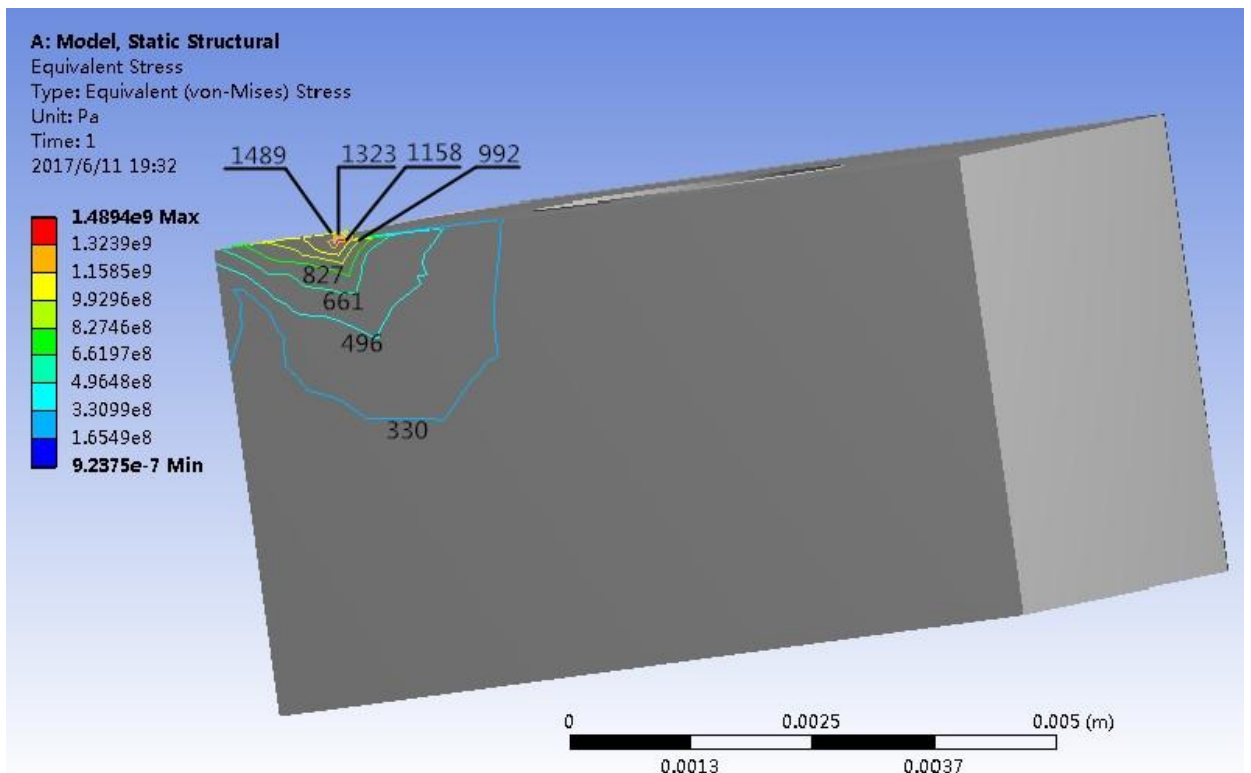


Рис. 8.12. Распределение внутренних эквивалентных напряжений в режущем клине. Сталь 40X–Т15К6, $s_z=0,07$ мм/зуб, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

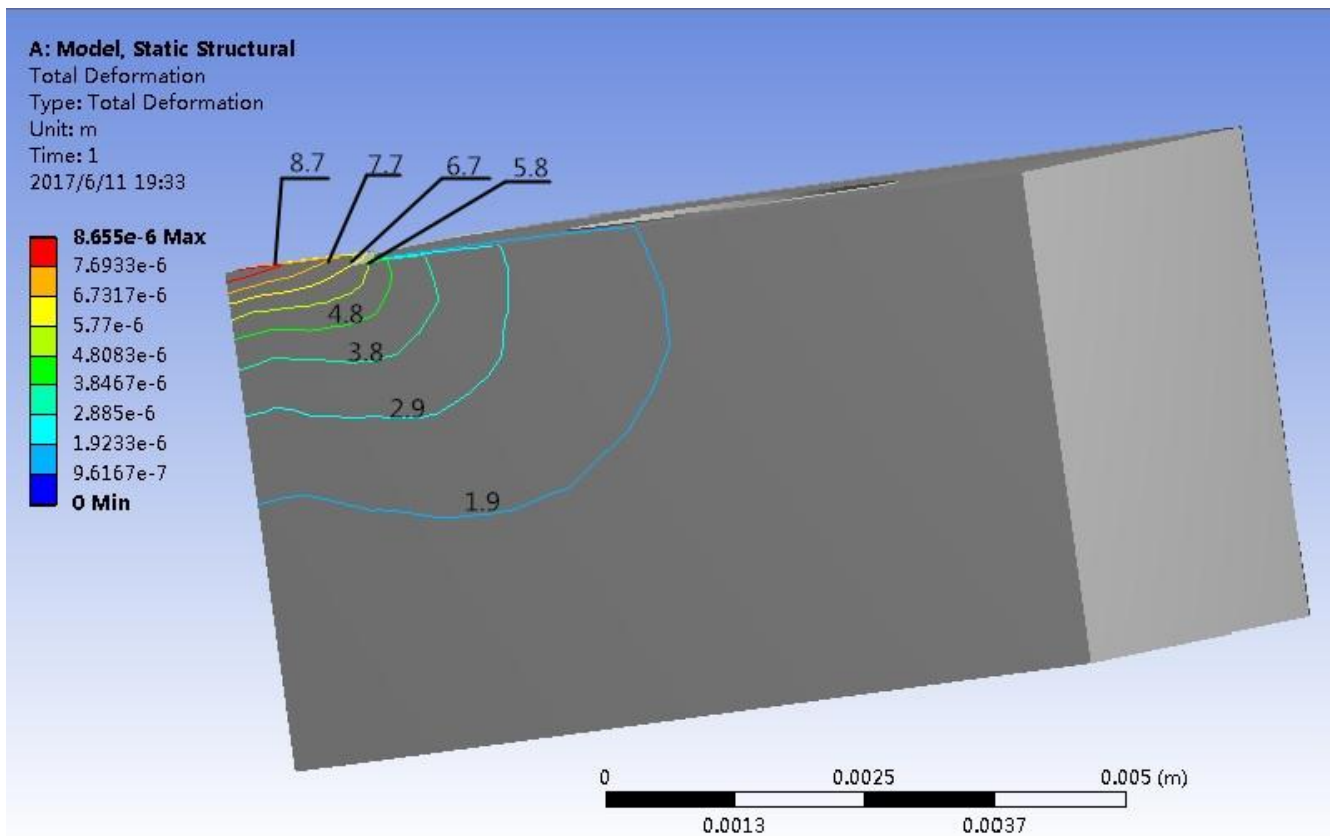


Рис. 8.13. Деформация режущего клина (мкм). Сталь 40Х–Т15К6, $s_z=0,07$ мм/зуб, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

При $s=0,52$ мм/об, $t = 1,8$ мм, $c= 1,3$ мм по таблице получаем:

$$P_z=4725 \text{ Н}, P_{xy}=5058 \text{ Н};$$

$$q_N = P_z / (b \times c) = 4725 / (1,8 \times 1,3) = 2019 \text{ Н/мм}^2 = 2019 \text{ МПа};$$

$$q_F = P_{xy} / (b \times c) = 5058 / (1,8 \times 1,3) = 2161 \text{ Н/мм}^2 = 2161 \text{ МПа}.$$

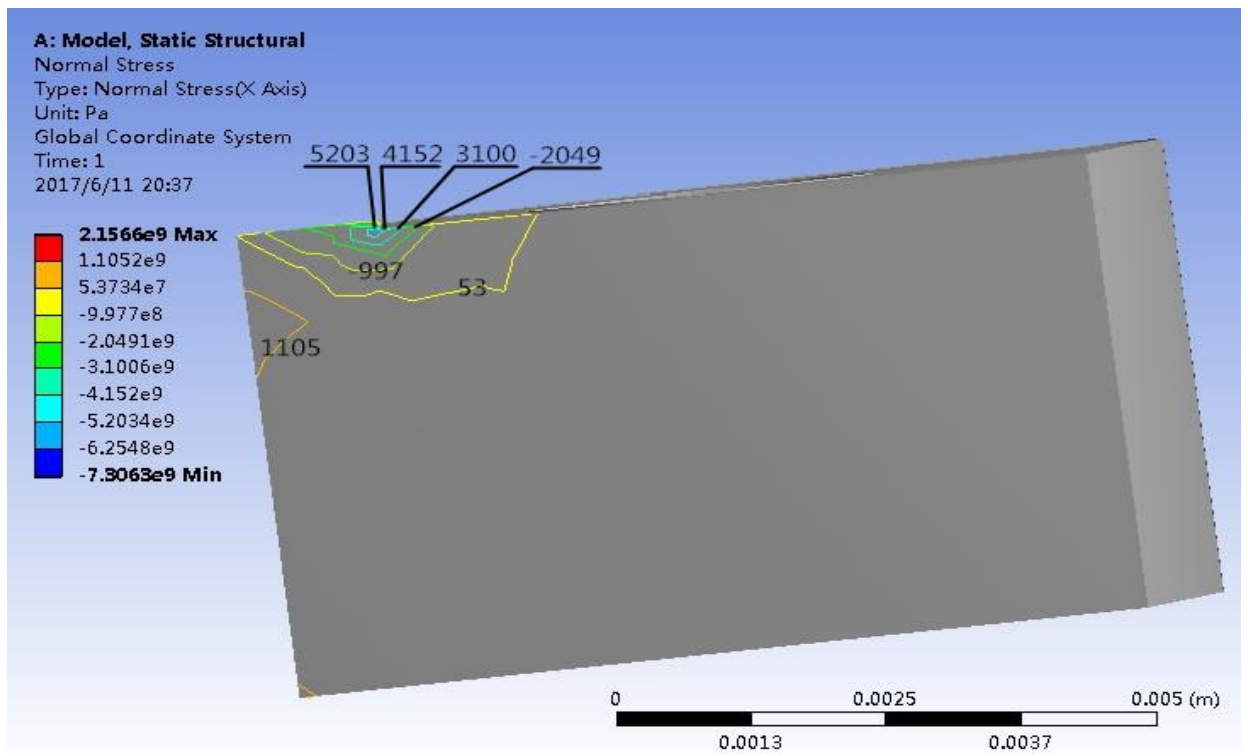


Рис. 8.14. Распределение внутренних нормальных напряжений σ_x (параллельно передней поверхности) в режущем клине. Сталь 40X –Т15К6, $s_z=0,52$ мм/зуб, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

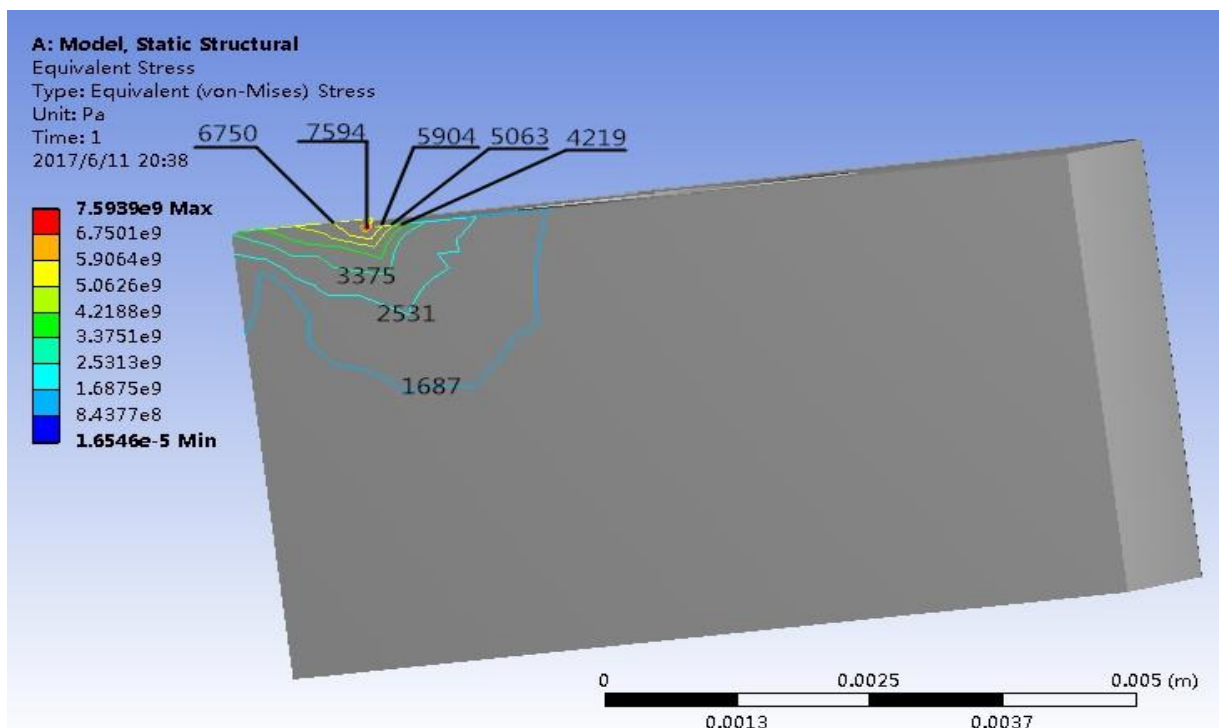


Рис.8.15.Распределение внутренних эквивалентных напряжений в режущем клине Сталь 40X–Т15К6, $s_z=0,52$ мм/зуб, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

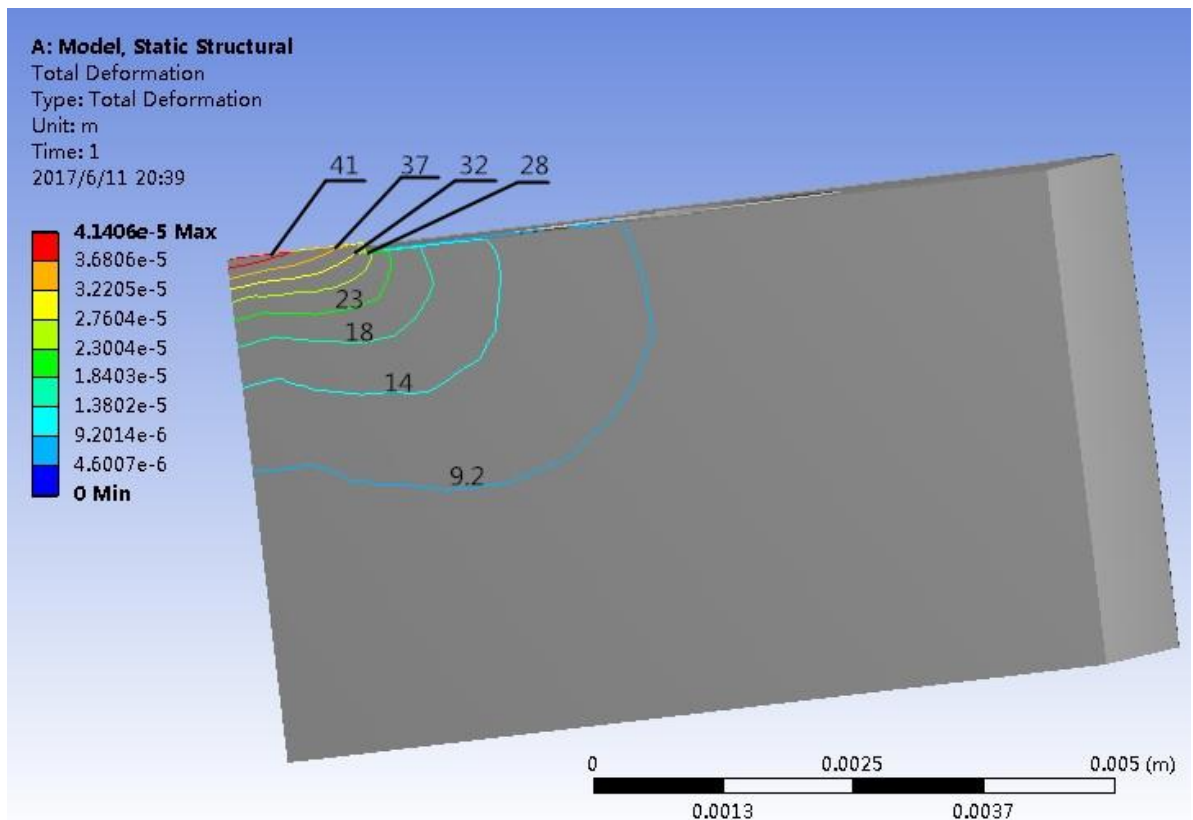


Рис. 8.16. Деформация режущего клина (мкм). Сталь 40Х–Т15К6, $s_z=0,52$ мм/зуб, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

Таблица 8.9. Наибольшие нормальные и эквивалентные напряжения в режущем клине при фрезеровании торцевой фрезой с разными подачами (по результатам экспериментов). Сталь 40Х –Т15К6, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

Подача s , мм/об	Наибольшие нормальные напряжения σ_x , МПа	Наибольшие эквивалентные напряжения σ_x , МПа
0,07	455	1489
0,18	526	1736
0,52	2157	7594

$\sigma_{\text{хmax}}, \sigma_{\text{хэкв max}}, \text{МПа}$

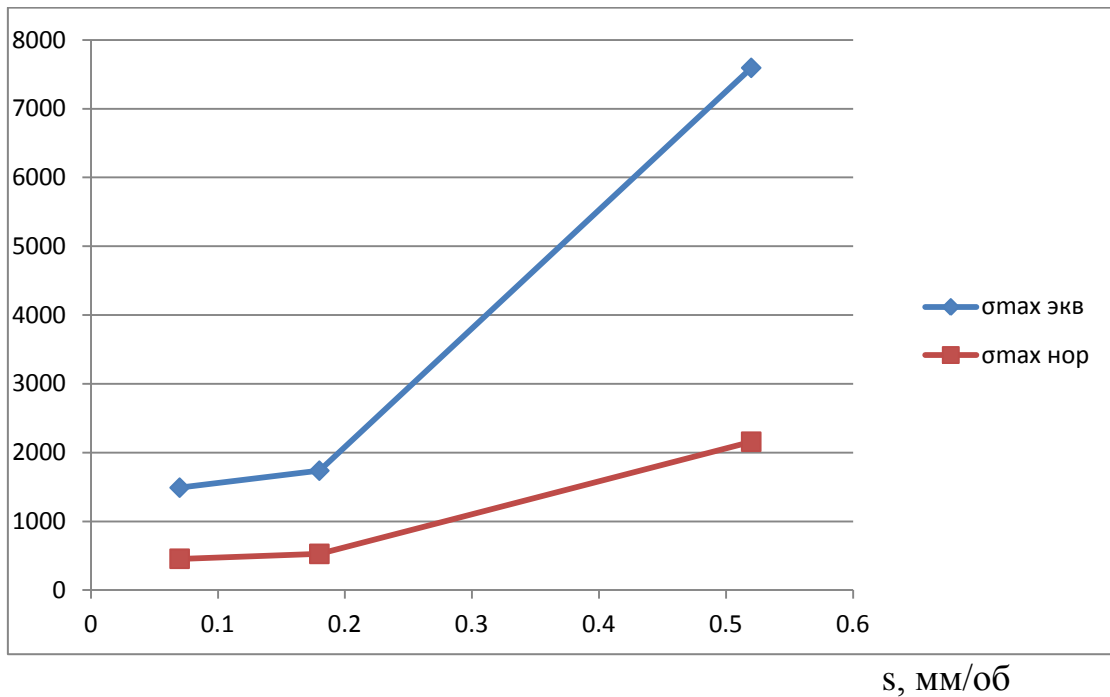


Рис .8.17. Влияние подачи на наибольшие нормальные и эквивалентные напряжения в режущем клине. Сталь 40Х–Т15К6, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

Из графика делаем вывод: для одинакового обрабатываемого материала чем больше подача S , тем больше наибольшие нормальные и эквивалентные напряжения в режущем клине при фрезеровании торцевой фрезой. Для одинаковой подачи эквивалентное напряжение больше, чем нормальное напряжение.

8.8. Влияние обрабатываемого материала на НДС режущего клина

Для материала 35ХГСНА ($\sigma_x=1650$ МПа) удельная контактная нагрузка на п.п. при $s=0,18$ мм/об, $t=1,8$ мм, $c=1,3$ мм:

$P_z=2\ 599$ Н; $P_{xy}=2782$ Н.

$$q_N = P_z / (b \times c) = 2599 / (1,8 \times 1,3) = 1111 \text{ Н/мм}^2 = 1111 \text{ МПа};$$

$$q_F = P_{xy} / (b \times c) = 2782 / (1,8 \times 1,3) = 1189 \text{ Н/мм}^2 = 1189 \text{ МПа}.$$

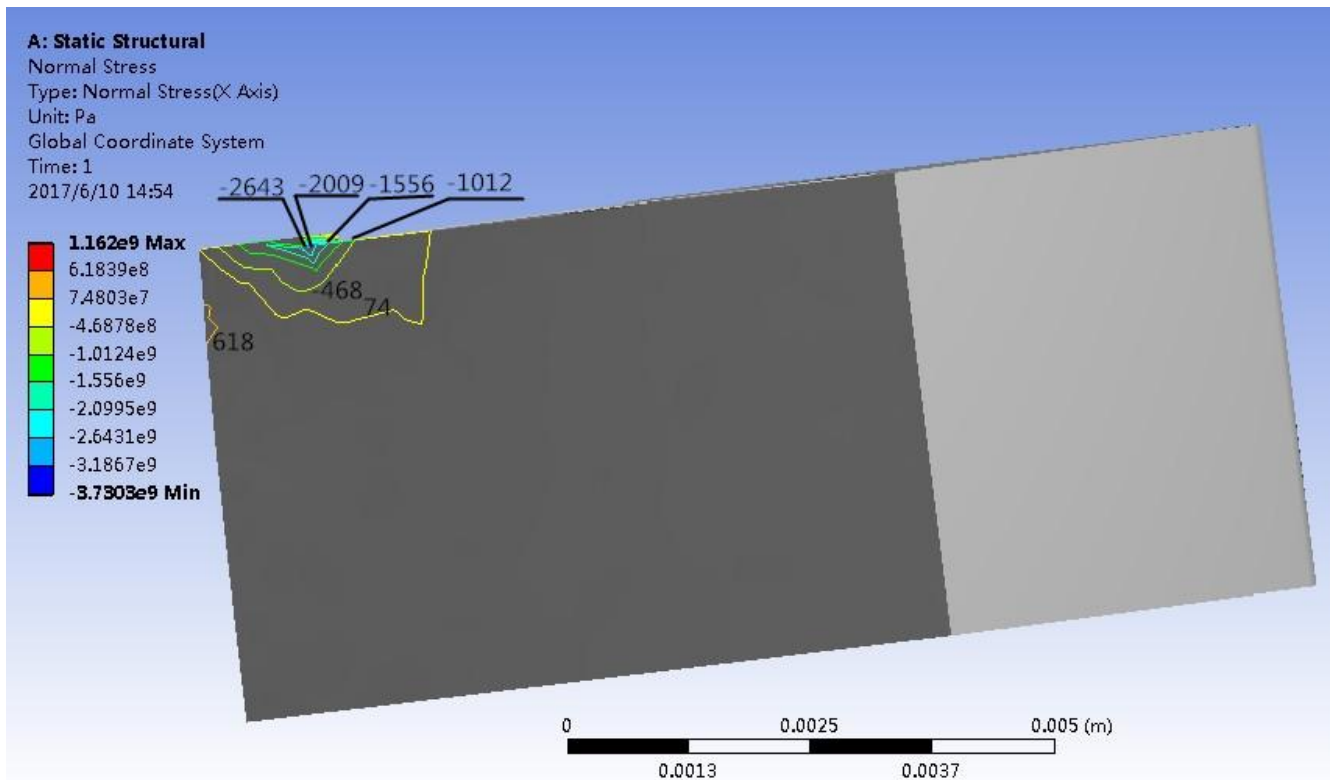


Рис. 8.18. Распределение внутренних нормальных напряжений σ_x (параллельно передней поверхности) в режущем клине. Сталь 35ХГСНА – Т15К6, $s_z=0,18$ мм/зуб, $t=1,8$ мм, $v=120$ м/мин

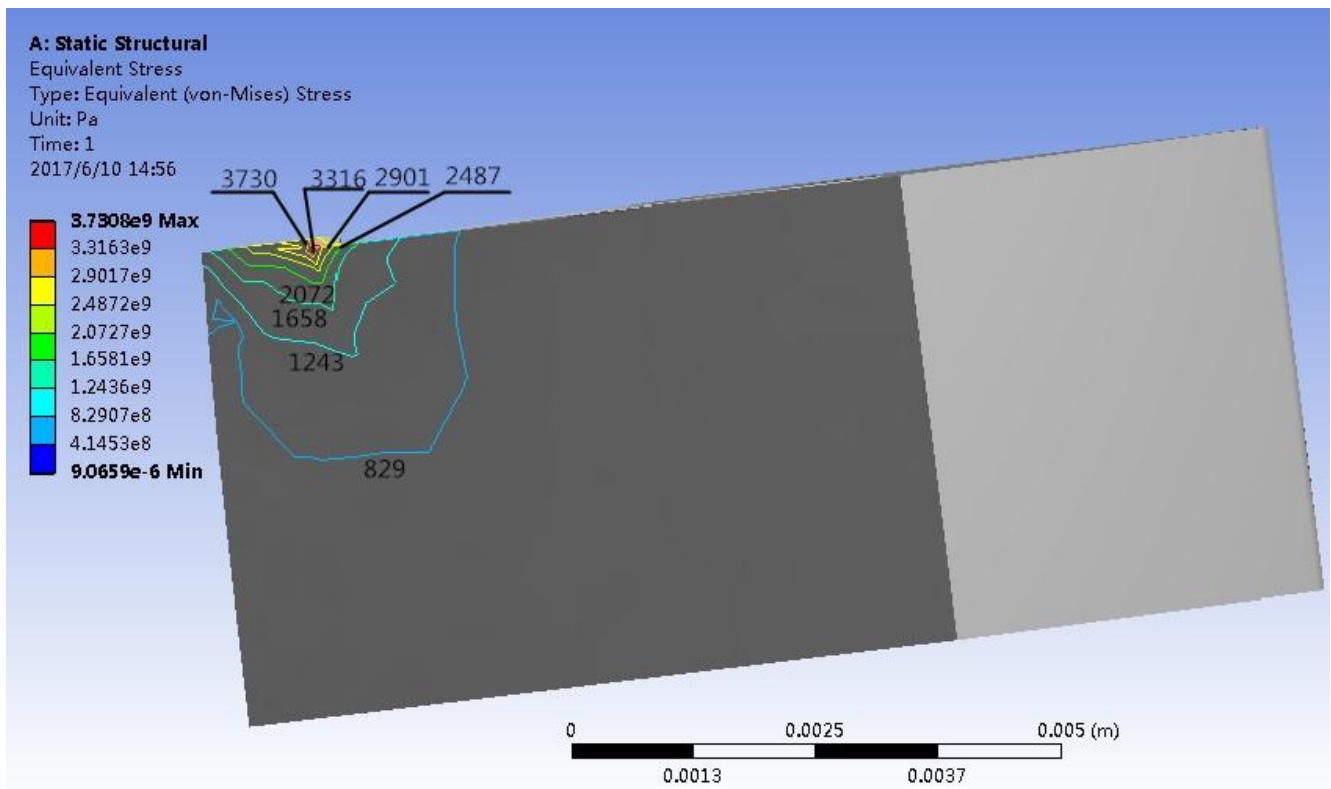


Рис. 8.19. Распределение внутренних эквивалентных напряжений в режущем клине. Сталь 35ХГСНА – Т15К6, $s_z=0,18$ мм/зуб, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

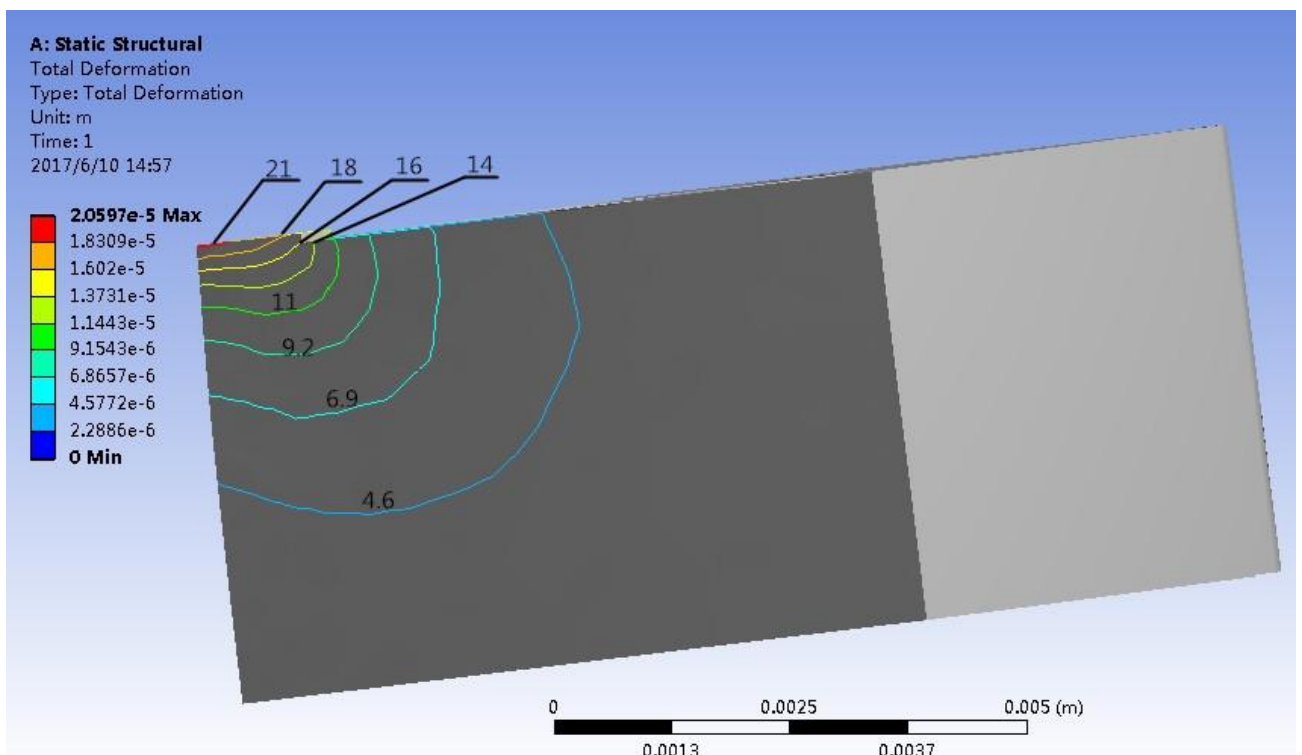


Рис. 8.20. Деформация режущего клина (мкм). Сталь 35ХГСНА – Т15К6, $s_z=0,18$ мм/зуб, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

При резании (точении) диска с радиальной подачей:

Обрабатываемый материал ВТЗ-1 – ВК8; $\sigma_b=1200$ МПа, $s=0,414$ мм/об, $v=60$ м/мин, $b=2,3$ мм, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=18^\circ$, длина контакта стружки по п.п. $c=0,414$ мм, $K_a = 1,1$.

Экстраполяцией на нулевую фаску износа по з.п. выделены силы на передней поверхности.

На п.п. острого резца ($h_z=0$ мм): $P_z=1460$ Н, $P_y=480$ Н.

Удельная контактная нагрузка на передней поверхности ($c= s = 0,414$ мм):

$$q_N = 1460 / (2,3 \times 0,414) = 1533 \text{ Н/мм}^2 = 1530 \text{ МПа};$$

$$q_{Py} = q_F = 480 / (2,3 \times 0,414) = 504 \text{ Н/мм}^2 = 504 \text{ МПа}.$$

$$\text{коэфф. трения на п.п. } \mu_n = q_F / q_N = 504 / 1533 = 0,33.$$

Для расчётов сил резания при фрезеровании торцовой фрезой:

Для подачи $s_z = 0,18$ мм/зуб длина контакта стружки с передней поверхностью зуба фрезы $c=0,41$ мм, глубина резания $t=1,8$ мм:

$$\text{Силы на п.п. } N = q_N \times c \times t = 1530 \times 0,41 \times 1,8 = 1129 \text{ Н};$$

$$F = q_F \times c \times t = 504 \times 0,41 \times 1,8 = 371 \text{ Н};$$

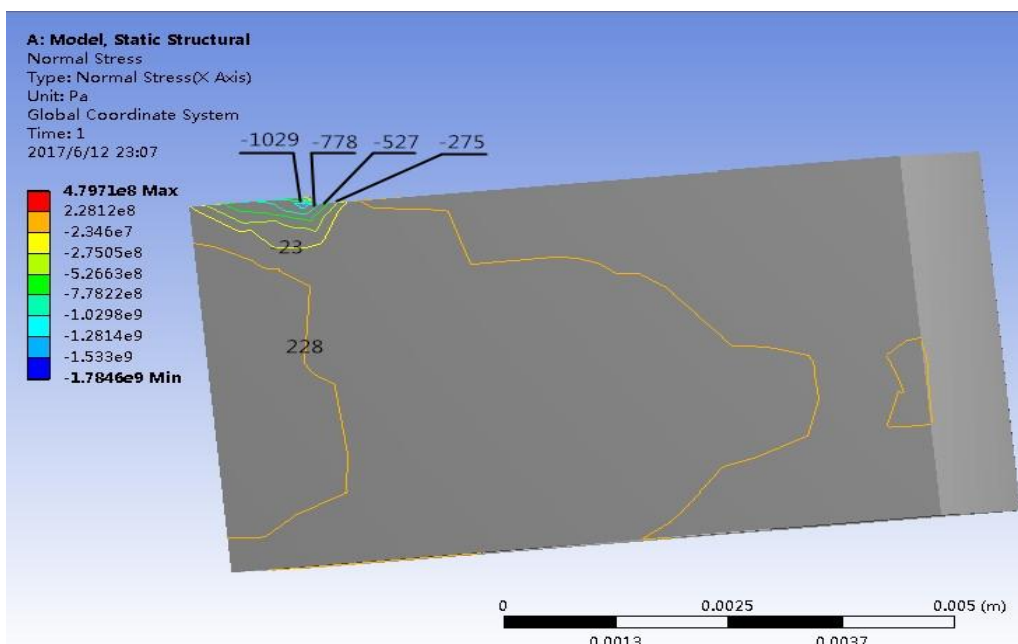


Рис. 8.21. Распределение внутренних нормальных напряжений σ_x (параллельно передней поверхности) в режущем клине, МПа. Титановый сплав ВТЗ-1–ВК8, $s_z=0,18$ мм/зуб, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

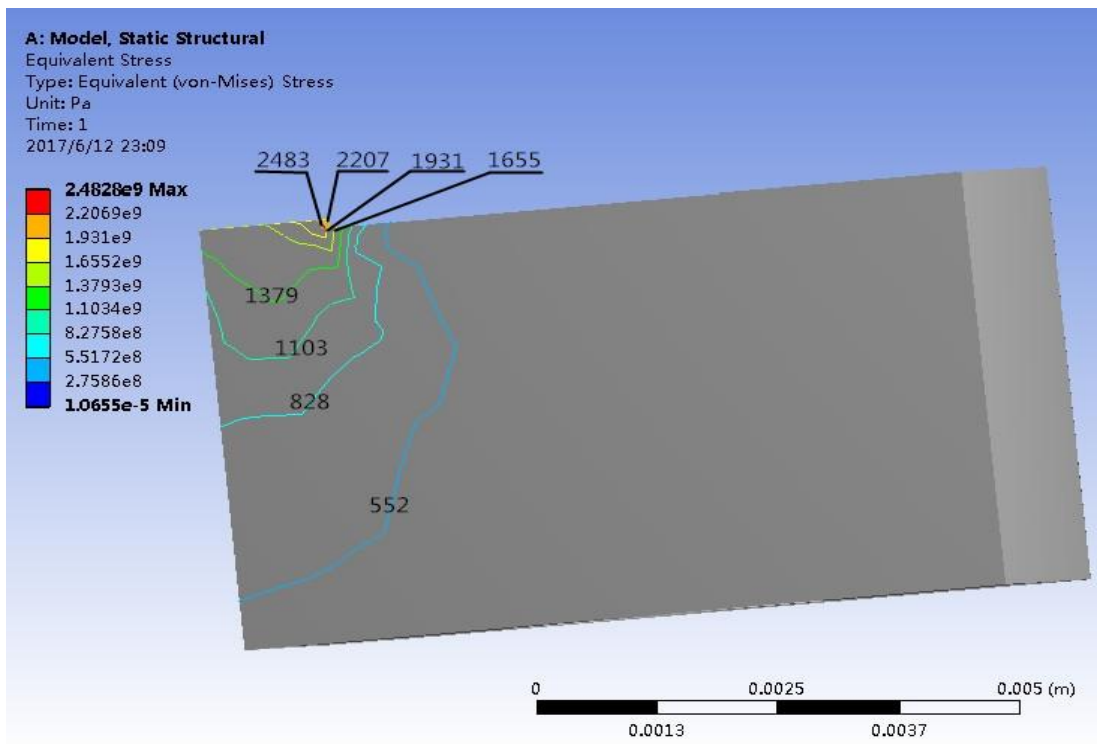


Рис. 8.22. Распределение внутренних эквивалентных напряжений в режущем клине, МПа. Титановый сплав ВТ3-1 – ВК8, $s_z=0,18$ мм/зуб, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

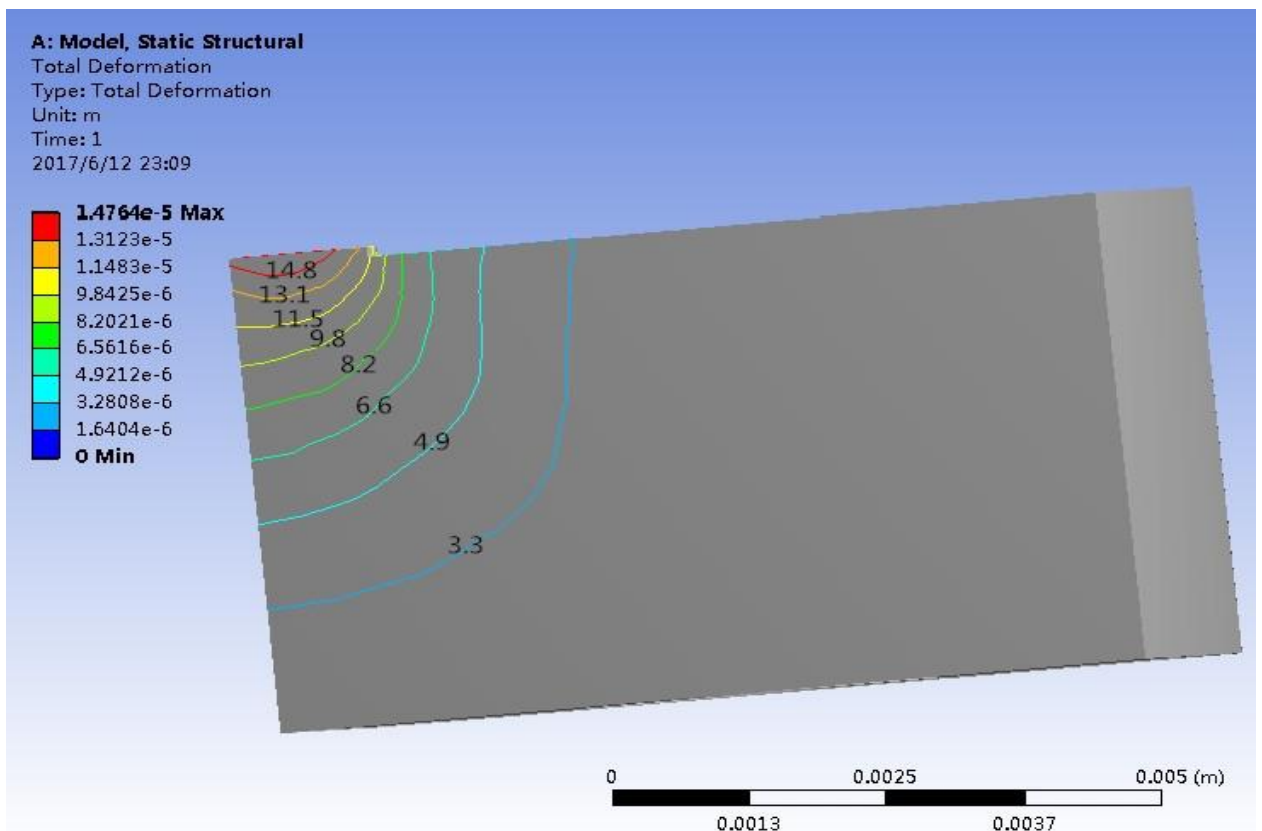


Рис. 8.23. Деформация режущего клина (мкм). Титановый сплав ВТ3-1 – ВК8, $s_z=0,18$ мм/зуб, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

Таблица.8.10. Наибольшие нормальные и эквивалентные напряжения в режущем клине при фрезеровании торцевой фрезой разных обрабатываемых материалов (по результатам экспериментов)

$s_z=0,18$ мм/зуб, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

Вид инструментального материала	Наибольшие нормальные напряжения σ_x , МПа	Наибольшие эквивалентные напряжения σ_x , МПа
Сталь 40Х	526	1736
Титановый сплав ВТ3-1 – ВК8	580	2483
Сталь 35ХГСНА	1162	3730

$\sigma_{x \max \text{ нор}}, \sigma_{x \max \text{ экв}}, \text{ МПа}$

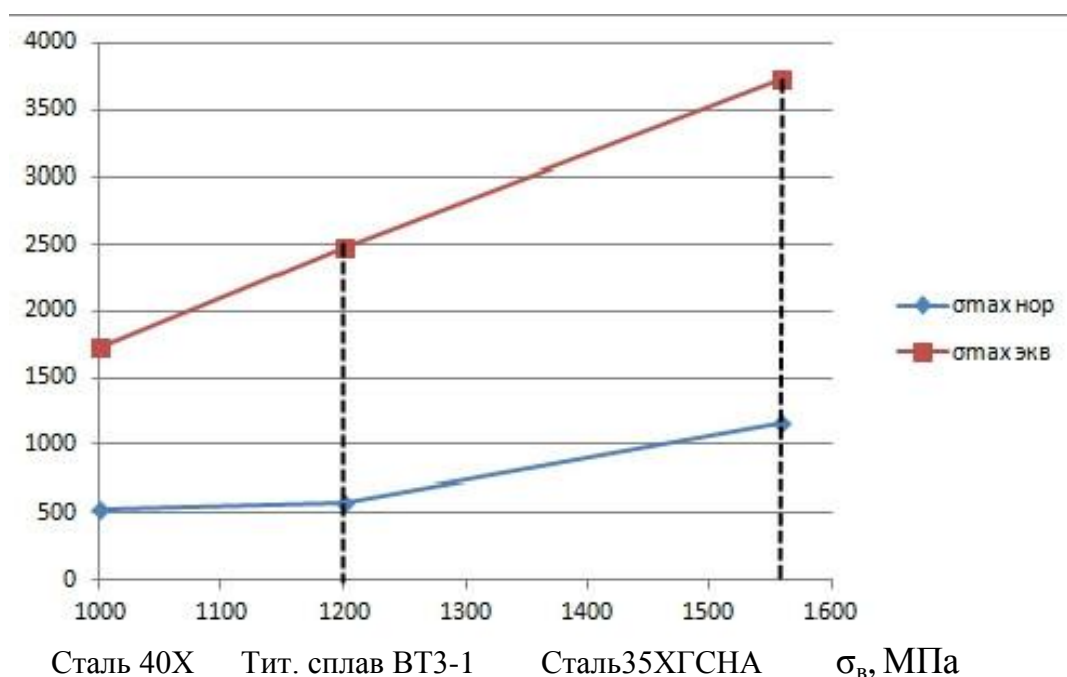


Рис.8.24. Наибольшие нормальные и эквивалентные напряжения в режущем клине при фрезеровании разных обрабатываемых материалов.

По графику получаем вывод: для одинаковой подачи $s_z=0,18$ мм/зуб наибольшие нормальные и эквивалентные напряжения в режущем клине при фрезеровании торцевой фрезой увеличиваются с увеличением прочности обрабатываемого материала.

8.9. Влияние фактора врезания на внутренние нормальные и эквивалентные напряжения при резании изношенным по задней поверхности инструментом.

При подаче $s = 0,07$ мм/об, скорости вращения $n = 630$ об/мин, глубине резания $t = 1,8$ мм, 40X – T15K6.

При фрезеровании стали 40X изношенной ($h_z=0,465$ мм) пластиной из T15K6 с толщиной среза $a=0,05$ мм (соответствует продольной подаче при точении $s = 0,07$ мм/об), $n = 630$ об/мин, $v=120$ м/мин, $t = 2$ мм) в момент врезания происходит давление и трение по задней поверхности без образования стружки. Фиксируем при этом **максимальные** составляющие силы резания **при врезании** (до образования стружки):

$P_{x \max} = 475$ Н, $P_{y \max} = 533$ Н, $P_{xy \max} = (P_{x \max}^2 + P_{y \max}^2)^{1/2} = (475^2 + 533^2)^{1/2} = 713$ Н; $P_{z \max} = 659$ Н (см. рис. 1). Эти силы будут приложены **только к фаске** на задней поверхности, на передней поверхности сил не будет **при врезании**. Длина фаски по з.п. $h_z=0,465$ мм, ширина b равна глубине резания при фрезеровании $t=1.8$ мм.

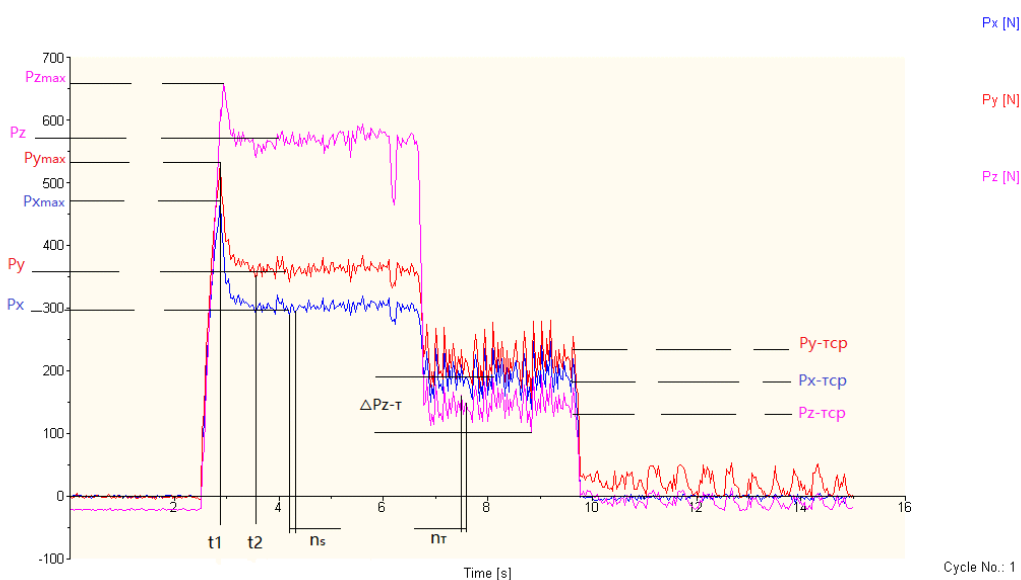


Рис.8.25.Сталь 40X - T15K6, $s = 0,07$ мм/об, $n = 630$ об/мин, $t = 1,8$ мм

Максимальные мгновенные составляющие силы : $P_{x \max} = 475$ н $P_{y \max} = 533$ н $P_{z \max} = 659$ н;
 составляющие силы при установившемся резании: $P_x = 303$ н $P_y = 365$ н $P_z = 570$ н;
 составляющие средние силы при трении : $P_{x-тр} = 165$ н $P_{y-тр} = 238$ н $P_{z-тр} = 123$ н,
 погрешность P_z при трении : $\Delta P_{z-т} = 86$ н, поэтому $P_{z-т \max} = P_{z-тр} + \Delta P_{z-т}/2 = 166$ н.

Время при $t1^* = t_1 - t_0 = 0,36$ сек., время начало сняться стружки $t2^* = t_2 - t_1 = 0,68$ сек. Частота резания при снятии стружки $ns = 9,6$ Hz, Частота трения $nt = 10,67$ Hz.

Через **1,04** сек ($t_0 - t_1 = 0,36$ сек. + $t_1 - t_2 = 0,68$ сек, т.е. $0,36 + 0,68 = 1,04$ с) начинается **установившееся** резание, при котором будут силы и на передней поверхности, и на задней.

Для этого установившегося резания рассчитываем силы на **з.п.**:

При резании острым резцом ($s = 0,07$ мм/об, $n = 630$ об/мин, $t = 2$ мм, 40Х – Т15К6) силы были равны: $P_{z_{h=0}} = 522$ Н

Таблица.8.11. Удельные силы резания и контактные нагрузки при фрезеровании торцевой фрезой (без фаски на задней поверхности)

Подача s, мм/об	Толщина среза a, мм	Длина контакта стружки с передней пов. с	Глубина рез. t, мм	Ширина среза b, мм	Pz, Н (фрезерование)	Уд. сила рез., q_{pz} , Н/мм ²	Уд. норм. сила на п.п. q_N , Н/мм ²	Pxy, Н (фрезерование)	Уд. сила рез. q_{pxy} , н/мм ²	Уд. касат. сила на п.п. q_F , Н/мм ²
0,07	0,05	0,51	1,825	2,58	522	1589	397	1245	3790	946

Таблица.8.12. Сравнение удельных сил резания и контактных нагрузок при фрезеровании торцевой фрезой с острыми и изношенными зубьями (при подаче S=0,07мм/об)

	Pz, Н	Уд. сила рез., q_{pz} , Н/мм	Уд. норм. сила на п.п. q_N , Н/мм ²	Pxy, Н	Уд. сила рез. q_{pxy} , н/мм ²	Уд. касат. сила на п.п. q_F , Н/мм ²
Без фаски износа	522	1589	397	1245	3790	946
С фаской износа	1350	2488	968	2543	4688	1823

1. При $h_z=0,465$ мм были измерены **общие** технологические составляющие силы резания: $P_z=659$ Н, $P_{xy}=714$ Н.

Удельная контактная нагрузка на **з.п.** ($h_z=0,465$ мм):

$$q_z = 659 / (1,8 \times 0,465) = 787 \text{ Н/мм}^2 = 787 \text{ МПа};$$

$$q_{xy} = 714 / (1,8 \times 0,465) = 853 \text{ Н/мм}^2 = 853 \text{ МПа}$$

2. При $h_z=0,54$ мм были измерены **общие** технологические составляющие силы резания: $P_z=787$ Н, $P_{xy}=1041$ Н.

Удельная контактная нагрузка на **з.п.** ($h_z=0,54$ мм):

$$q_z = 787 / (1,8 \times 0,54) = 810 \text{ Н/мм}^2 = 810 \text{ МПа};$$

$$q_{xy} = 1041 / (1,8 \times 0,54) = 1465 \text{ Н/мм}^2 = 1071 \text{ МПа}$$

3. При $h_z=0,775$ мм были измерены **общие** технологические составляющие силы резания: $P_z=1350$ Н, $P_{xy}=2543$ Н.

Удельная контактная нагрузка на з.п. ($h_z=0,775$ мм):

$$q_z = 1350 / (1,8 \times 0,775) = 968 \text{ Н/мм}^2 = 968 \text{ МПа};$$

$$q_{xy} = 2543 / (1,8 \times 0,775) = 1668 \text{ Н/мм}^2 = 1823 \text{ МПа}$$

4. При $h_z=0,95$ мм были измерены **общие** технологические составляющие силы резания: $P_z=1500$ Н, $P_{xy}=2662$ Н.

Удельная контактная нагрузка на з.п. ($h_z=0,95$ мм):

$$q_z = 1500 / (1,8 \times 0,95) = 877 \text{ Н/мм}^2 = 1023 \text{ МПа};$$

$$q_{xy} = 2662 / (1,8 \times 0,95) = 1557 \text{ Н/мм}^2 = 2036 \text{ МПа}$$

Полученные силы при врезании прикладываем только к фаске на задней поверхности, рассчитываем напряжения в режущем клине по программе ANSYS. Рассчитанные наибольшие напряжения заносим в таблицу 8.13. Результаты расчётов приведены на Рис. 8.26.

Анализ результатов резания

Силы резания при обработке стали 40Х токарным проходным резцом Т15К6.

Таблица.8.13. Удельные силы резания и контактные нагрузки при глубине резания $t = 1,8$ мм (с фаской износа на задней поверхности)

h_z , мм	Подача s , мм/об	P_{zmax} , Н	Уд. норм. сила на п.п. q_{Np} , Н/мм ²	$P_{zуст}$, Н	P_{ymax} , Н	P_{xmax} , Н	P_{xymax} , Н	Уд. касат. сила на п.п. q_{Ft} , Н/мм ²	Время. t_1 , сек	Время. t_2 , сек
0,95	0,07	905	529	875	2170	1805	2823	1651	1	0,7
	0,11	1660	971	975	1955	1620	2539	1485	0,85	1
	0,23	1885	1102	1420	1870	1550	2429	1420	0,3	0,65
	0,34	2260	1322	1736	1688	1406	2197	1285	0,2	0,5
	0,52	2853	1668	2235	1368	1378	1941	1135	0,2	0,2
0,775	0,07	1350	968	910	1896	1695	2543	1823	1,45	0,85
	0,11	1535	1100	990	1753	1566	2351	1685	0,25	1
	0,34	2057	156	1710	1662	1490	2232	1600	0,2	0,6
	0,52	2771	1986	2166	1586	1462	2157	1546	0,15	0,2
0,54	0,07	787	810	640	772	698	1141	1071	0,25	0,7
	0,11	982	1010	667	786	714	1062	1093	0,25	0,7
	0,23	1159	1193	1123	713	650	965	993	0,1	0,25
0,465	0,07	659	787	570	533	475	714	853	0,36	0,68

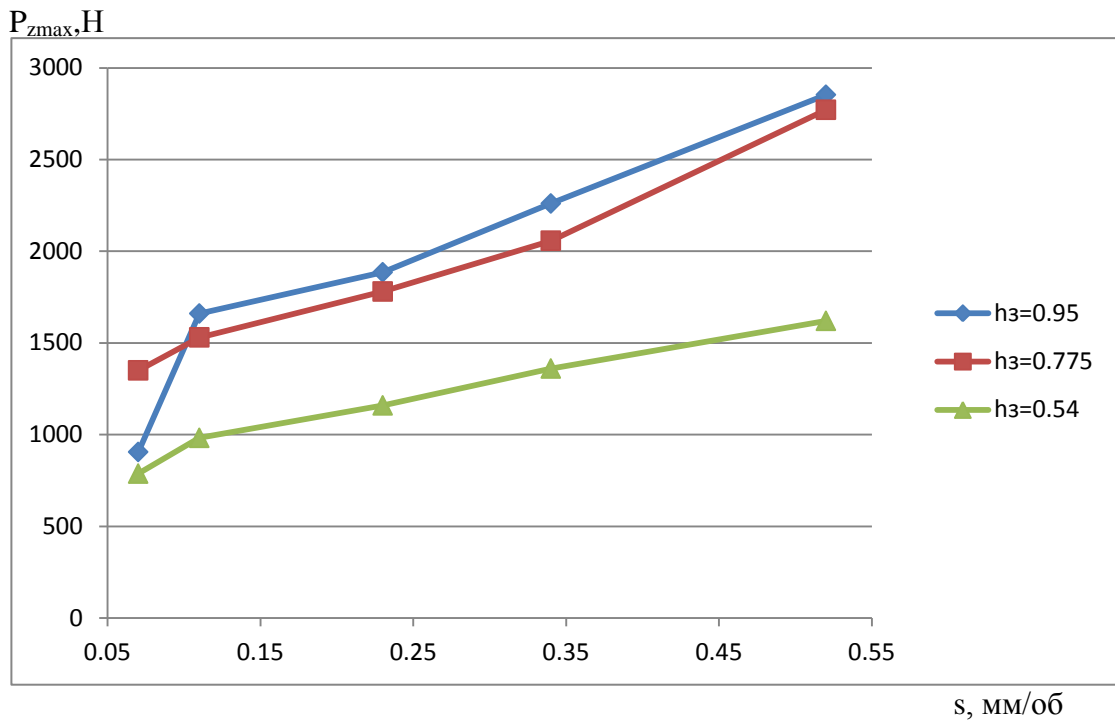


Рис .8.26.Влияние подачи на наибольшие силы резания P_{zmax} в режущем клине. Сталь 40Х–Т15К6, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

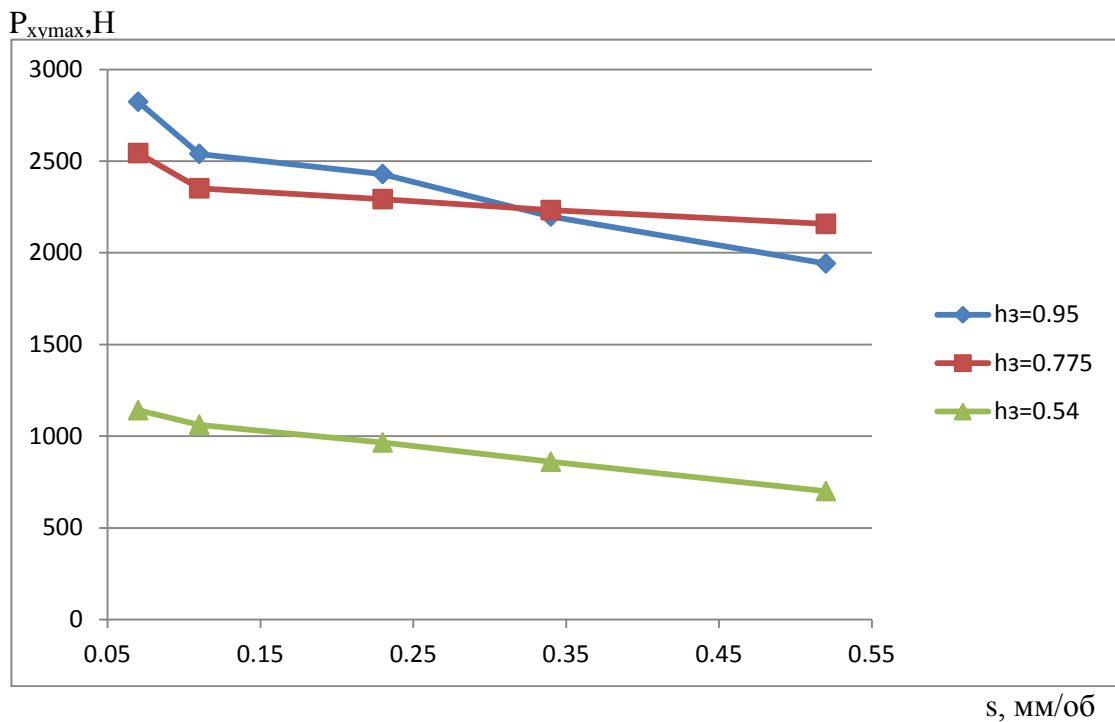


Рис. 8.27.Влияние подачи на наибольшие силы резания $P_{xy max}$ в режущем клине. Сталь 40Х–Т15К6, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

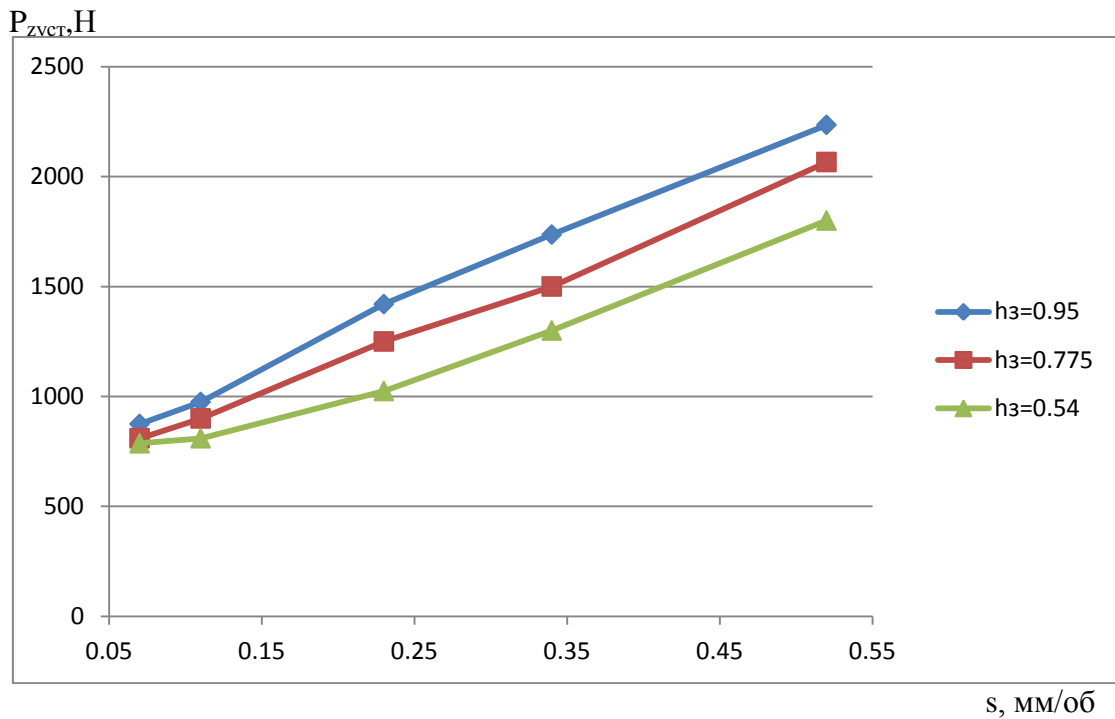


Рис.8.28. Влияние подачи на силы при установившемся резании. Сталь 40Х–Т15К6, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

Таблица.8.14. Наибольшие удельные силы резания и при установившемся резании. При глубине резания $t = 1,8$ мм (с фаской износа на задней поверхности)

$h_3, \text{мм}$	Подача $s, \text{мм/об}$	$P_{z\text{max}}, \text{Н}$	$P_{z\text{уст}}, \text{Н}$	K_a	$P_{xy\text{max}}, \text{Н}$	$P_{xy\text{уст}}, \text{Н}$	K_b
0,95	0,07	1405	875	1,9	1795	1056	1,7
	0,11	1660	1200	1,6	1540	1100	1,4
	0,23	1885	1500	1,3	1450	1208	1,2
	0,34	2260	1900	1,1	1389	1263	1,1
	0,52	2853	2545	1,1	1531	1392	1,1

$$K_a = P_{z\text{max}}/P_{z\text{уст}}; \quad K_b = P_{xy\text{max}}/P_{xy\text{уст}}$$

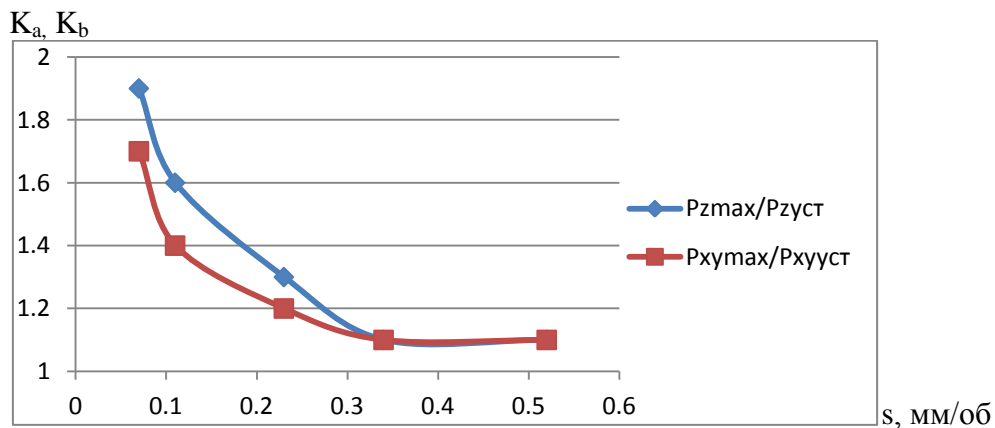


Рис.8.29. Влияние подачи на соотношение между наибольшей удельной силой при врезании и силой при установившемся резании. Сталь 40Х–Т15К6, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

По графикам при **врезании** при глубине резания $t = 1,8$ мм (с фаской на задней поверхности) получаем выводы:

1. При глубине резания $t = 1,8$ мм: чем больше подачи S , тем **больше** наибольшая сила резания $P_{z \max}$.
2. Чем больше величины износа h_3 , тем больше наибольших сил резания $P_{z \max}$.
3. Чем больше подача S , тем **меньше** наибольшая сила резания $P_{xy \max}$.
4. Чем больше величины износа h_3 , тем больше наибольшая сила резания $P_{xy \max}$.
5. Наибольшие силы при врезании больше сил при установившемся резании. С увеличением подачи соотношение $P_{\max}/P_{уст}$ становится равным 1, т.е. при большой подаче нет выраженного эффекта увеличения сил при наличии фаски на задней поверхности.

При установившемся резании при глубине резания $t = 1,8$ мм и с фаской на задней поверхности:

1. Чем больше подача S , тем больше силы при установившемся резании $P_{z \text{уст}}$.
2. Чем больше величины износа h_3 , тем больше силы при установившемся резании $P_{z \text{уст}}$.

Влияние фактора врезания на внутренние нормальные и эквивалентные напряжения при резании изношенным по задней поверхности инструментом.

При подаче $s = 0,07$ мм/об, скорости вращения $n = 630$ об/мин, глубине резания $t = 1,8$ мм, 40Х – Т15К6.

При фрезеровании стали 40Х изношенной ($h_3=0,465$ мм) пластиной из Т15К6 с толщиной среза $a=0,05$ мм (соответствует продольной подаче при точении $s = 0,07$ мм/об), $n = 630$ об/мин, $t = 2$ мм) **максимальные** составляющие силы резания **при врезании** (до образования стружки):

$P_{x \max} = 475$ Н, $P_{y \max} = 533$ Н, $P_{xy \max} = (P_{x \max}^2 + P_{y \max}^2)^{1/2} = (475^2 + 533^2)^{1/2} = 713$ Н; $P_{z \max} = 659$ Н (см. рис. 1). Эти силы будут приложены **только к фаске** на задней поверхности, на передней поверхности сил не будет **при врезании**. Длина фаски по з.п. $h_3=0,465$ мм, ширина b равна глубине резания при фрезеровании $t=1.8$ мм.

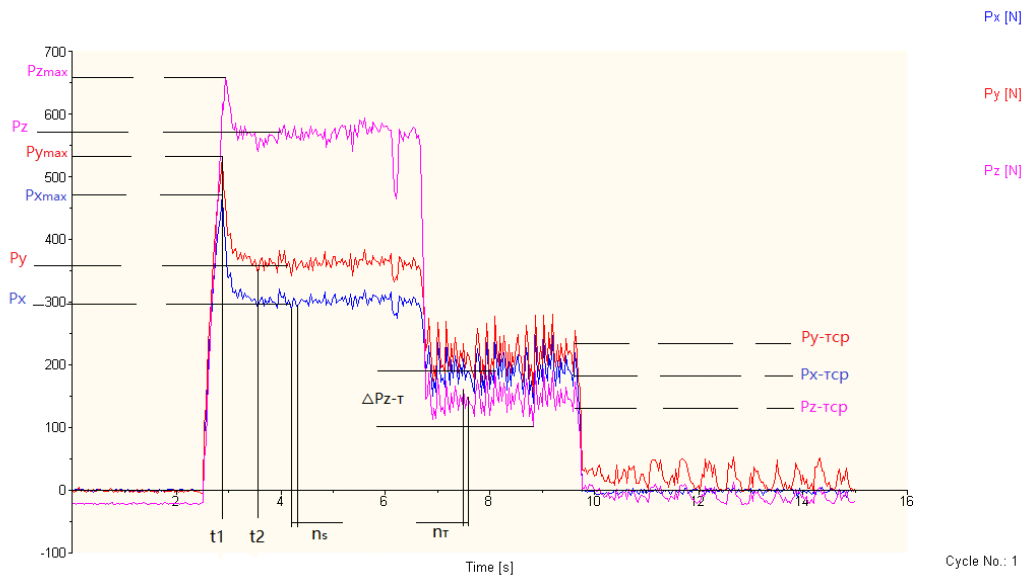


Рис.8.30.Сталь 40Х - Т15К6, $s = 0,07$ мм/об, $n = 630$ об/мин, $t = 1,8$ мм

Максимальные мгновенные составляющие силы : $P_{x\max} = 475$ н $P_{y\max} = 533$ н $P_{z\max} = 659$ н;
 составляющие силы при установившемся резании: $P_x = 303$ н $P_y = 365$ н $P_z = 570$ н;
 составляющие средние силы при трении : $P_{x-тср} = 165$ н $P_{y-тср} = 238$ н $P_{z-тср} = 123$ н,
 погрешность P_z при трении : $\Delta P_{z-т} = 86$ н, поэтому $P_{z-т\max} = P_{z-тср} + \Delta P_{z-т}/2 = 166$ н.

Время при $t1^* = t_1 - t_0 = 0,36$ сек., время начало снятся стружки $t2^* = t_2 - t_1 = 0,68$ сек. Частота резания при снятии стружки $n_s = 9,6$ Hz, Частота трения $n_t = 10,67$ Hz.

Полученные силы при установившемся резании силы прикладываем к поверхностям режущего клина и рассчитываем напряжения и деформацию в режущем клине по программе ANSYS (рис. 8.31 -8.33). Рассчитанные наибольшие напряжения заносим в таблицу 8.13. Результаты расчётов приведены на рис. 8.34.

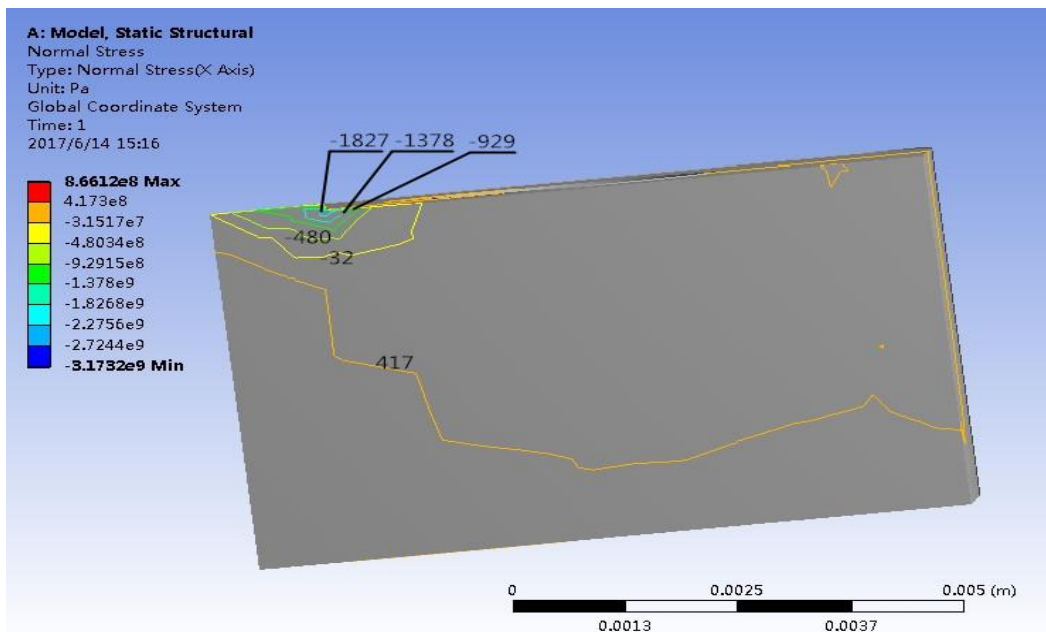


Рис. 8.31. Распределение внутренних нормальных напряжений σ_x (параллельно передней поверхности) в режущем клине. Сталь 40Х–Т15К6, $h_z=0,465$ мм, $s_z=0,07$ мм/зуб, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

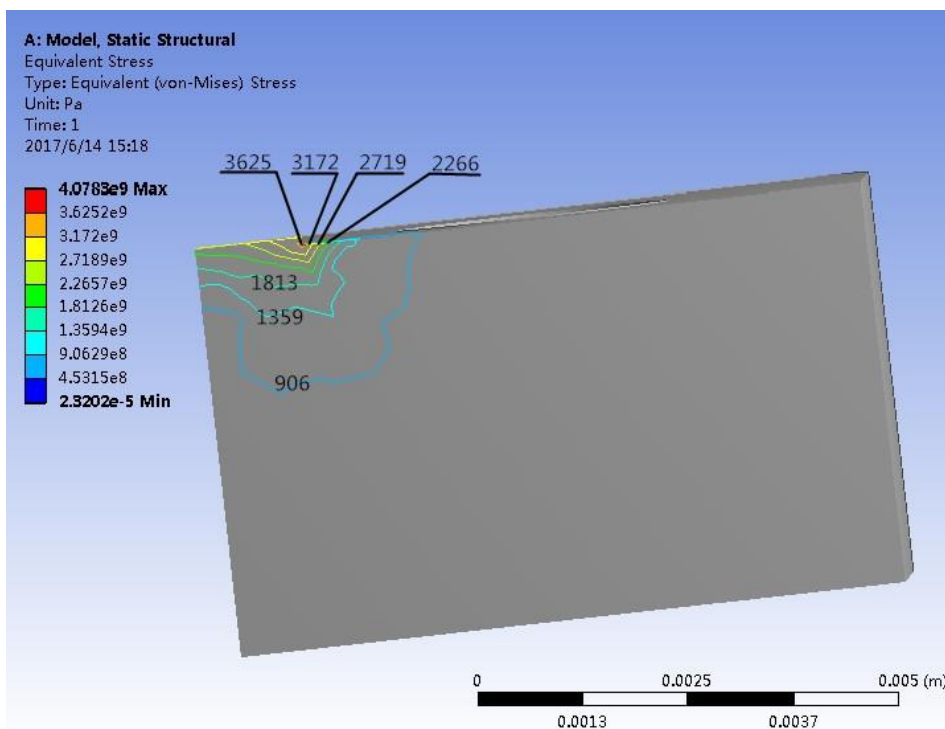


Рис.8.32. Распределение внутренних эквивалентных напряжений в режущем клине. Сталь 40Х–Т15К6, $h_z=0,465$ мм, $s_z=0,07$ мм/зуб, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

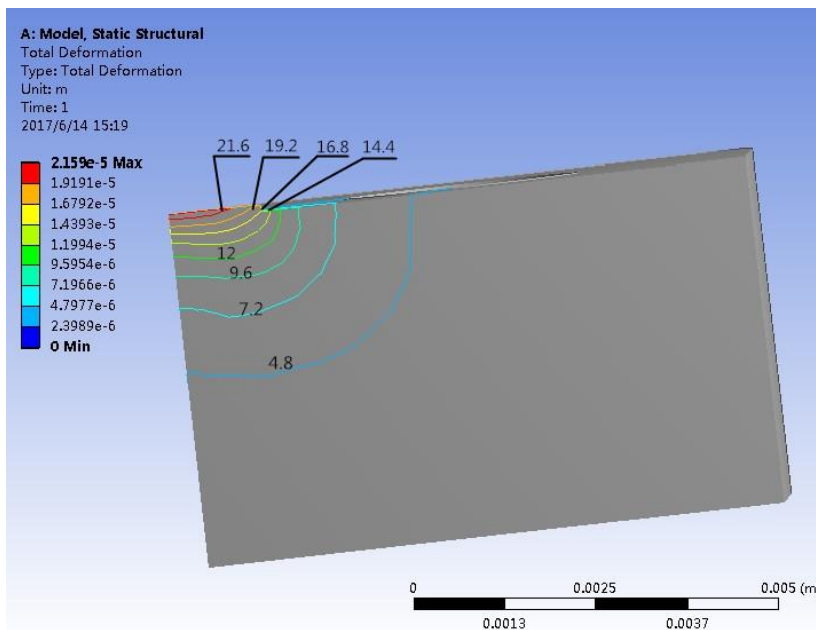


Рис.8.33. Деформация режущего клина (мкм).Сталь 40Х–Т15К6,
 $h_z=0,465$ мм, $s_z=0,07$ мм/зуб, $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

Таблица.8.13. Влияние износа на наибольшие внутренние напряжения в режущем клине.
 40Х – Т15К6, $s = 0,07$ мм/об, $v = 120$ м/мин, $t = 1,8$ мм

Длина износа h_z , мм	Нормальные напряжения, МПа	Эквивалентные напряжения, МПа
0,465	787	853
0,54	810	1071
0,775	968	1823
0,95	1023	2036

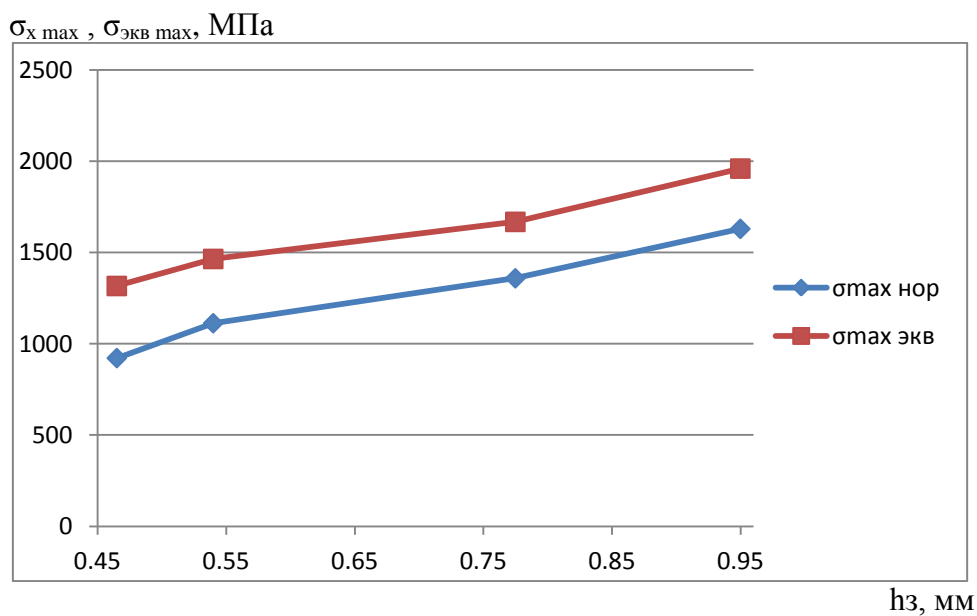


Рис.8.34. Влияние длины фаски износа h_z на величину наибольших внутренних напряжений.
 Сталь 40Х - Т15К6, $s = 0,07$ мм/об $v = 120$ м/мин, $t = 1,8$ мм

По графику (рис. 8.34) получаем вывод:

1. Во время **токарной** обработки при установившемся резании при постоянной подаче ($S=\text{const}$) с увеличением длины фаски износа по задней поверхности h_3 у пластины существенно увеличиваются внутренние нормальные и эквивалентные напряжения, но даже при большом износе $h_3 = 0,95$ мм они в два раза меньше предела прочности на сжатие твёрдого сплава ($\sigma_{\text{сж}}=4200$ МПа).

2. При токарной обработке при установившемся резании эквивалентные напряжения всегда больше нормальных напряжений.

При **встречном** фрезеровании изношенным по задней поверхности ($h_3 > 0$ мм) зубом фрезы в момент его контакта с заготовкой (рис. 8.35) происходит давление со стороны заготовки, но на передней поверхности зуба нет стружки и нет сил резания.

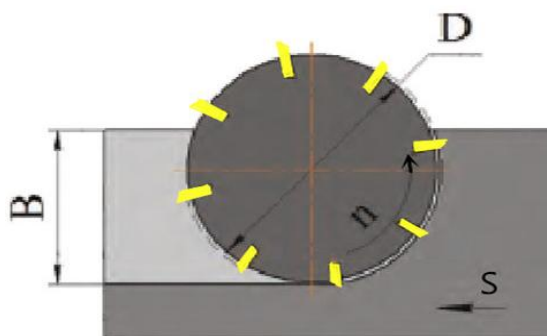


Рис.8.35. Встречное фрезерование при **левом** вращении фрезы

Нагружение зуба фрезы кардинально отличается от установившегося резания. При этом силы давления и трения на фаске задней поверхности при малой подаче существенно больше, чем при образовании стружки (рис. 8.30). Это вызывает увеличение внутренних напряжений в режущем клине, и нормальные напряжения становятся больше эквивалентных (рис. 8.36). При дальнейшем повороте фрезы относительно её оси вращения происходит появление стружки на передней поверхности и силы резания уменьшаются. Затем силы начинают увеличиваться за счёт увеличения толщины среза a

$$a = s_z \times \sin \psi,$$

где s_z – подача на зуб; ψ – угол поворота фрезы относительно начала контакта зуба фрезы с заготовкой.

На рис. 8.35 показан случай встречного фрезерования при левом вращении фрезы. Левое вращение было выбрано с таким расчётом, чтобы при демонстрации нагружения зуба фрезы по передней поверхности сечение в главной секущей плоскости (режущая кромка слева) соответствовало расположению сечению токарного резца для их лучшего сравнения (режущая кромка слева). Изменение толщины среза и внутренних напряжений при вращении фрезы показано в табл. 8.14, а график изменения наибольших напряжений в режущем клине на рис. 8.36.

Таблица.8.14. Влияние толщины среза при торцовом фрезеровании на внутренние напряжения в режущем клине зуба фрезы 40X – T15K6, $s = 0,07$ мм/об, $v = 120$ м/мин, $t = 1,8$ мм

Время обработки, сек	Толщина среза a , мм	Нормальные напряжения, МПа	Эквивалентные напряжения, МПа
0	0	1100	600
0,36	0,084	1500	1000
0,5	0,119	860	900
0,85	0,196	830	900
1	0,231	830	900

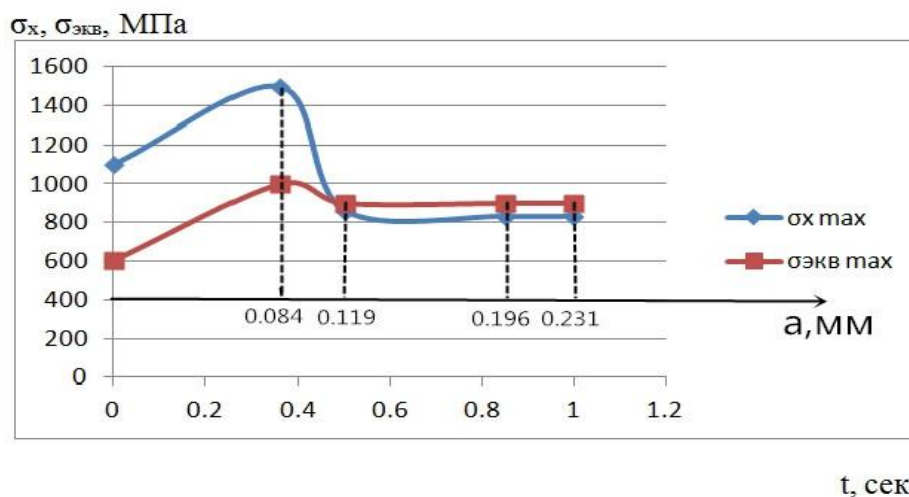


Рис.8.36. Изменение величины наибольших внутренних напряжений в зубе торцевой фрезы в процессе вращения фрезы при нулевой толщине среза в момент врезания. Сталь 40X - T15K6, $s = 0,07$ мм/об, $v = 120$ м/мин, $t = 1,8$ мм

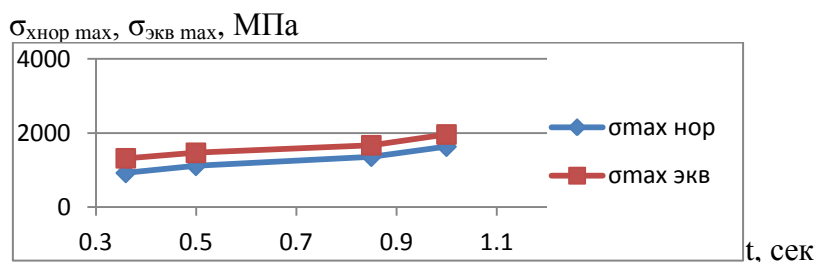


Рис.8.37. Изменение величины наибольших внутренних напряжений в зубе торцевой фрезы в **процессе вращения** фрезы при начальной толщине среза в момент врезания 0,07 мм. Сталь 40X - T15K6, $s = 0,07$ мм/об, $v = 120$ м/мин, $t = 1,8$ мм

По графику рис. 8.36 получаем выводы:

1. В момент врезания зуба фрезы внутренние нормальные и эквивалентные напряжения существенно больше, чем при установившемся резании.
2. В период от врезания до установившегося резания эквивалентные напряжения меньше нормальных напряжений.

Таблица.8.15. Наибольшие нормальные и эквивалентные напряжения в режущем клине при фрезеровании торцевой фрезой.

Сталь 40X –Т15К6, $s_z=0,07$ мм/зуб. $t=1,8$ мм, $v = 120$ м/мин

	Наибольшие нормальные напряжения $\sigma_{x \max}$, МПа	Наибольшие эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{ЭКВ} \max}$, МПа
Без износа	455	1489
С износом $h_z=0,465$ мм	866	4078

По таблице 8.15. получаем вывод:

1. При фрезеровании торцевой фрезой с появлением износа по задней поверхности наибольшие нормальные и эквивалентные напряжения в режущем клине существенно увеличиваются, особенно эквивалентные напряжения (в 2,7 раза по сравнению с 1,9 раза для нормальных напряжений).
2. При $h_z=0,465$ мм наибольшие эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{ЭКВ} \max}$ приближаются к пределу прочности твёрдого сплава Т15К6 на сжатие.

8.10. Выводы

1. Для одинакового обрабатываемого материала чем больше подача S , тем больше наибольшие нормальные и эквивалентные напряжения в режущем клине при фрезеровании торцевой фрезой.
2. При установившемся резании эквивалентное напряжение больше нормального напряжения при одних и тех же условиях фрезерования.
3. Нормальные и эквивалентные напряжения при фрезеровании стали 35ХГСНА больше, чем при фрезеровании стали 40X и титанового сплава ВТЗ-1.
4. При торцевом фрезеровании с постоянной минутной подачей $s_{\text{мин}}=\text{const}$ чем больше угол поворота фрезы (время резания одного зуба), тем больше внутренние нормальные и эквивалентных напряжений в связи с увеличением толщины среза. Эквивалентные напряжения всегда больше нормальных напряжений.
5. При фрезеровании торцевой фрезой с появлением износа по задней поверхности наибольшие нормальные и эквивалентные напряжения в режущем клине существенно увеличиваются, особенно эквивалентные

напряжения (в 2,7 раза по сравнению с 1,9 раза для нормальных напряжений).

6. При $h_3=0,465$ мм наибольшие эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв max}}$ приближаются к пределу прочности твёрдого сплава Т15К6 на сжатие.

8.10. Литература.

1. Кожевников Д.В., Кирсанов С.В. Резание материалов. –М.: Машиностроение, 2012. –304 с.
2. Кожевников Д.В., Гречишников В.А., Кирсанов С.В., Григорьев С.Н., Схиртладзе А.Г. Режущий инструмент: учебник для вузов / Под общ. ред. С.В. Кирсанова. М.: Машиностроение, 2014, 520 с.
3. Справочник конструктора-инструментальщика. / под ред. В.А. Гречишникова, С.В. Кирсанова. М.: Машиностроение, 2006, 542 с.
4. Армарего И.Дж., Браун Р.Х. Обработка металлов резанием. М.: Машиностроение, 1977. 326 с.
5. Бобров В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов. М.: Машгиз, 1962. 152 с.
6. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344с.
7. Васильев А.С., Дальский А.М., Золотаревский Ю.Н., Кондаков А.И. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / Подред. А.И. Кондакова. М.: Машиностроение, 2005. 352 с.
8. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 448 с.
9. Верещака Д.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
10. Виноградов А.А. Физические основы процесса сверления труднообрабатываемых материалов твердосплавными сверлами. Киев: Наукова думка, 1985. 263 с.
11. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985. 304 с.
12. Kozlov V. N., Li X. Influence of chip formation characteristics on flank contact load distribution in titanium alloy cutting / V. N. Kozlov, X. Li. // Applied Mechanics and Materials: Scientific Journal. – 2015. – Vol. 756: Mechanical

- Engineering, Automation and Control Systems (MEACS2014). – pp. 126-131. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956. 367 с.
13. Кожевников Д.В. Некоторые вопросы механики процесса косоугольного резания стали. // Известия вузов. Машиностроение. 1960, № 6, С.139...148.
 14. Narutaki N et al 1983 CIRP Annals - Manufacturing Technology 32(1) 65–69
 15. Wang B et al 2013 International journal of Machine Tools & Manufacture 73 1–8
 16. Hu J and Chou Y 2007 Wear 263(7-12) 1454–1458
 17. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. М.:Машиностроение, 1982. 320 с.
 18. Афонасов А. И. Обрабатываемость заготовок из титанового сплава ВТ22, прошедших горячую обработку с защитными покрытиями / А. И. Афонасов // Справочник. Инженерный журнал. – 2014. – № 8. – С. 18-21.
 19. Верещака А. С., Аникеев А. И., Дачева А. В. Повышение эффективности резания труднообрабатываемых материалов / А. С. Верещака, А. И. Аникеев, А. В. Дачева // Технология машиностроения. – 2010. – № 3. – С.17-22.
 20. Che-Haron С. Н. Tool life and surface integrity in turning titanium alloy / С. Н. Che-Haron // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – № 3 – pp. 231-237.
 21. Narutaki N., Murakoshi A., Motonishi S., Takeyama H. Study on machining of titanium alloys. CIRP Annals / N. Narutaki, A. Murakoshi, S. Motonishi, H. Takeyama // Manufacturing Technology. – 1983. – № 1 – pp. 65-69.
 22. Mohammadpour M., Razfar M. R., Jalili Saffar R. Numerical investigating the effect of machining parameters on residual stresses in orthogonal cutting / M. Mohammadpour, M. R. Razfar, R. Jalili Saffar // Simulation modelling practice and theory. – 2010 – № 18 – pp. 378–389.
 23. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. –М.: Машиностроение, 1969. -150 с.
 24. Развитие науки о резании металлов / В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев и др. М.: Машиностроение, 1967. 416с.

25. Режимы резания металлов: Справочник Ю.В. Барановский, Л.А. Брахман, А.И. Гдалевич и др. М.: НИИТавтопром, 1995. 456 с.
26. Резание и инструмент / Под ред. А.М. Розенберга. М.: Машиностроение, 1964. 228 с.
27. Титов В. Б., Ревин Н. Н., Зубарев Ю. М. Моделирование напряженно-деформированного состояния и оценка хрупкой прочности режущего инструмента / В. Б. Титов, Н. Н. Ревин, Ю. М. Зубарев // Инструм. и технол. – 2004. – № 17-18. – С. 227-233. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
28. Розенберг А.М. Динамика фрезерования. М.: Советская наука. 1945.360 с.
29. Shi B., Attia H. Modeling the thermal and tribological processes at the tool-chip interface in machining / B. Shi, H. Attia // Mach. Sci. and Technol. – 2009. – V. 13; № 2. – pp. 210-226.
30. Новиков Г. В., Снисаренко И. Н. Повышение прочности и износостойкости режущего инструмента / Г. В. Новиков, И. Н. Снисаренко // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. Ч. 1: Материалы 6 Международной научно-технической конференции, Курск, 18-20 дек., 2008. – Курск, 2008. – с. 218-224. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: Справочник / Под общ.ред. С.Г. Энтелиса, Э.М. Берлинера. М.: Машиностроение, 1995. 496 с.
31. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др.; Под общ.ред. И.А. Ординарцева. Л. : Машиностроение, 1987. 846 с.
32. Справочник конструктора-инструментальщика / Под общ.ред. В.А.Гречишниковой и С.В. Кирсанова. М.: Машиностроение, 2006. 720 с.
33. Аршинов С. В., Горелов В. А., Кушнер В. С., Бургонова О. Ю. Сопротивление титановых сплавов резанию / С. В. Аршинов, В. А. Горелов, В. С. Кушнер, О. Ю. Бургонова // Вестник машиностроения. – 2015. – № 10. – С. 75-80.

34. Vichev S., Kirov V., Hristov D. Strength calculation of cutting tools / S. Vichev, V. Kirov, D. Hristov. // International Journal of Machine Tools and Manufacture. Volume 34, Issue 1, January 1994. pp. 13-18.
35. Oraby S. E., Hayburst D. R. Tool life determination based on the measurement of wear and tool force ratio variation / S. E. Oraby, D. R. Hayburst // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44, (2004), pp. 1261-1269. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. Минск: Новое знание, 2005. 512 с.
36. Хуан Ч., Цуй Ц., Чжан Ц., Козлов В.Н. Методика измерения контактных напряжений на поверхностях режущего инструмента / Наука и образование: Материалы XX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (18-22 апреля 2016 г.) – Томск: Издательство Томского государственного педагогического университета, 2016, с. 69-75.
37. Z. Huang, J. Zhang, V. Kozlov Strength of inserts in titanium alloy machining / Mechanical Engineering Processes and Metal Treatment (MEACS 2015) 2016 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 124 012174, Vol. 124, Number 1, 2016, pp. 162-167.
38. Хуан Ч., Чжан Ц., Лещинер Е.Г., Козлов В.Н. Прочность режущих пластин при обработке титанового сплава / Профессиональное образование: проблемы и достижения: Материалы V Международной научно-практической конференции (15–17 декабря 2015 г.) – Томск: Издательство Томского государственного педагогического университета, 2015, с. 59-65.
39. Хуан Ч., Чжан Ц., Лещинер Е.Г., Козлов В.Н. Расчёт прочности режущих пластин при обработке титанового сплава / Актуальные проблемы в машиностроении: Материалы III Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении» (30 марта 2016 г.) – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2016, с. 59-65.
40. Справочник технолога – машиностроителя. В 2 – х Т. 2/ Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мешерякова. – 4-е изд., перераб. И доп.- М.: Машиностроение, 1985. 496 с., ил.

9. Английская часть

Strength of inserts in titanium alloy machining

Keywords: tool wear, tool flank, contact load distribution, strength of cutting tool.

Abstract: In this paper, stressed state of a not worn cutting wedge in machining titanium alloy (Ti6Al2Mo2Cr) is analyzed. Distribution of contact loads on a face of a cutting tool was obtained experimentally with the use of a “split cutting tool”. Calculation of internal stresses in indexable insert made from cemented carbide (WC8Co) was carried out with the help of ANSYS 14.0 software. Investigations showed that small thickness of a cutting insert leads to extremely high compressive stresses near the cutting edge, stresses that exceed ultimate compressive strength of cemented carbide. Face and base of the insert experience high tensile stresses, which approach to ultimate tensile strength of cemented carbide and increase probability of cutting insert destruction. If thickness of the cutting insert is bigger than 5 mm, compressive stresses near the cutting edge decrease, and tensile stresses on the face and base decrease to zero. Dependences of the greatest normal and tangential stresses on thickness of a cutting insert were found.

I. Introduction

In machining of difficult-to-machine titanium alloys, brittle fracture of the cutting wedge occurs in the form of chipping and spalling, which is especially dangerous for indexable inserts made from commonly used in industry cemented carbides. Working capacity of inserts increases if its thickness increases, but cost of these inserts increases as well. Investigations of stresses distribution were carried out to determine optimal thickness of indexable inserts made from cemented carbide BK8 (WC8Co).

II. Research methods

Finite element method along with ANSYS 14.0 software was used to calculate stresses in free orthogonal cutting of difficult-to-machine titanium alloy BT3-1 (Ti6Al2Mo2Cr). Distribution of specific contact loads on the face and on the flank surfaces was found experimentally by the method of a “split cutting tool” and by the method of the artificial flank-land of variable width in free orthogonal cutting of difficult-to-machine titanium alloy (Ti6Al2Mo2Cr) with constant geometry of the cutting part and cutting conditions (rake angle $\gamma=0^\circ$, cutting speed $v=1\text{m/s}$, radial feed $f=0.21\text{ mm/r}$, wear on the flank surface (artificial flank-land) $h_f=0.2\text{ mm}$) [1]. Thickness h of the insert varied from 2 to 20 mm (Fig. 9.1).

III. Results of experiments

Small thickness of a cutting insert $h=2\text{ mm}$ leads to extremely high ($\sigma_3 = -6866\text{ MPa}$) compressive stresses near the cutting edge, stresses that exceed ultimate compressive strength of cemented carbide (WC8Co) ($\sigma_{UCS} = -4200\text{ MPa}$). It is practically proved by brittle fracture of cutting inserts when its thickness less 2 mm [2, 3, 4, 5].

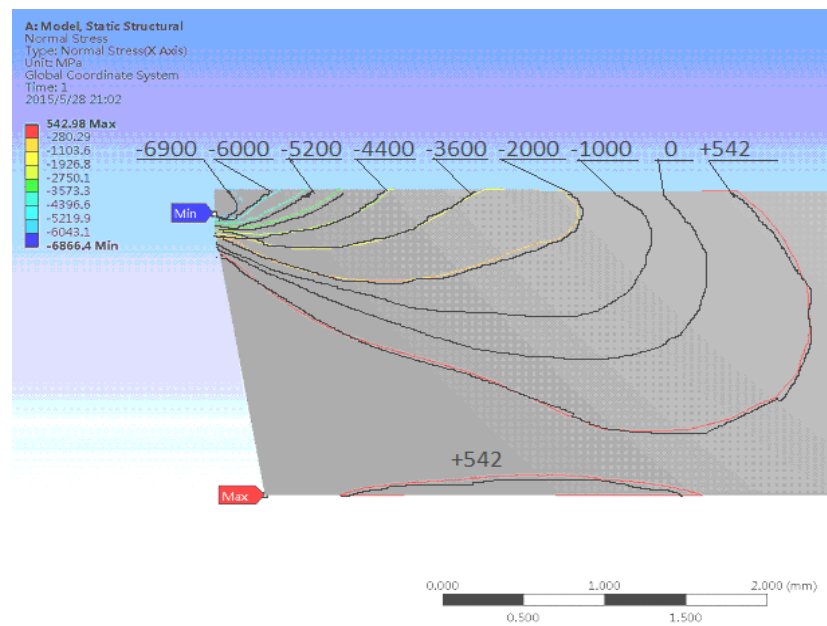


Fig. 9.1. Distribution of normal stresses in the cutting wedge for a cutting insert with thickness of 2 mm. The width of the wear-land $h_f=0.2$ mm

Tensile stresses ($\sigma_1 = +542$ MPa) are observed on the face surface at the distance equal to approximately four lengths of contact of the chip with rake surface. Tensile stress value approaches to ultimate tensile strength of cemented carbide (WC8Co) ($\sigma_{UTS} = +750$ MPa).

High tensile stresses ($\sigma_1 = +542$ MPa) are observed on the base of the cutting insert, which value approaches to ultimate tensile strength of cemented carbide BK8. In practice, results of calculations are proved by brittle fracture of the base of the insert with small thickness [6, 7].

Tensile stresses on the heel of the base of the insert are not observed (in the Fig. 9.2, b, the base is not displayed, since there are no lines that correspondent to $|\sigma| < 100$ MPa).

Shear stresses τ in the cutting edge were calculated under similar condition (Fig. 3). Shear stress near the cutting edge of the cutting insert with small thickness ($h=2$ mm) exceeds ultimate shear strength of cemented carbide (Fig. 9.3, a), which leads to destruction of cutting part.

The maximum value of the shear stress doesn't exceed ultimate shear strength of cemented carbide when thickness of the cutting insert is bigger than 5 mm (Fig. 9.3, b).

Influence of the cutting insert thickness on the maximum value of normal stresses σ_{max} near the cutting edge is represented in Fig. 4. The greatest influence of the cutting insert thickness is observed for $h \leq 7$ mm ($\sigma_3 = -3000$ MPa). This influence reduces significantly with further increase in insert thickness, and for $h > 12$ mm thickness does not influence magnitude of the normal stress near the cutting edge ($\sigma_3 = -1300 \dots -1177$ MPa).

Influence of the cutting insert thickness on the maximum value of the shear stress τ_{max} has similar character (Fig. 5), but its influence is sufficiently great for $h > 12$ mm.

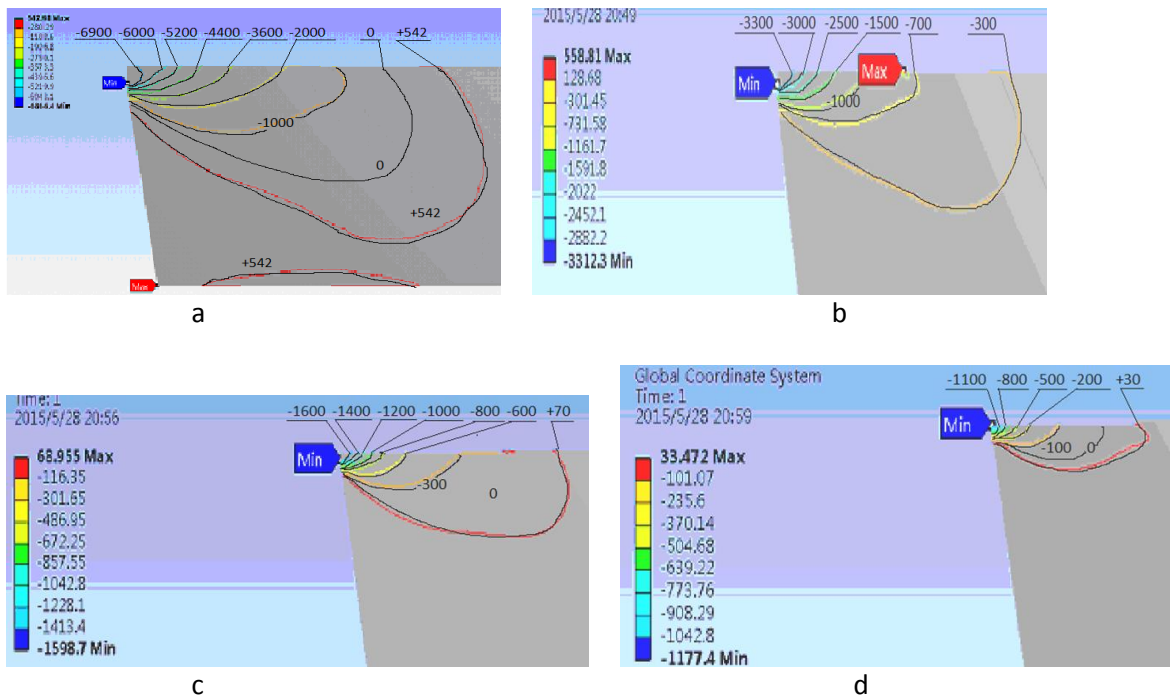


Fig. 9.2. Distribution of normal stresses σ [MPa] in the cutting wedge for a cutting insert with thickness of h : a) $h=2$ mm; b) $h=6$ mm; c) $h=12$ mm; d) $h=20$ mm

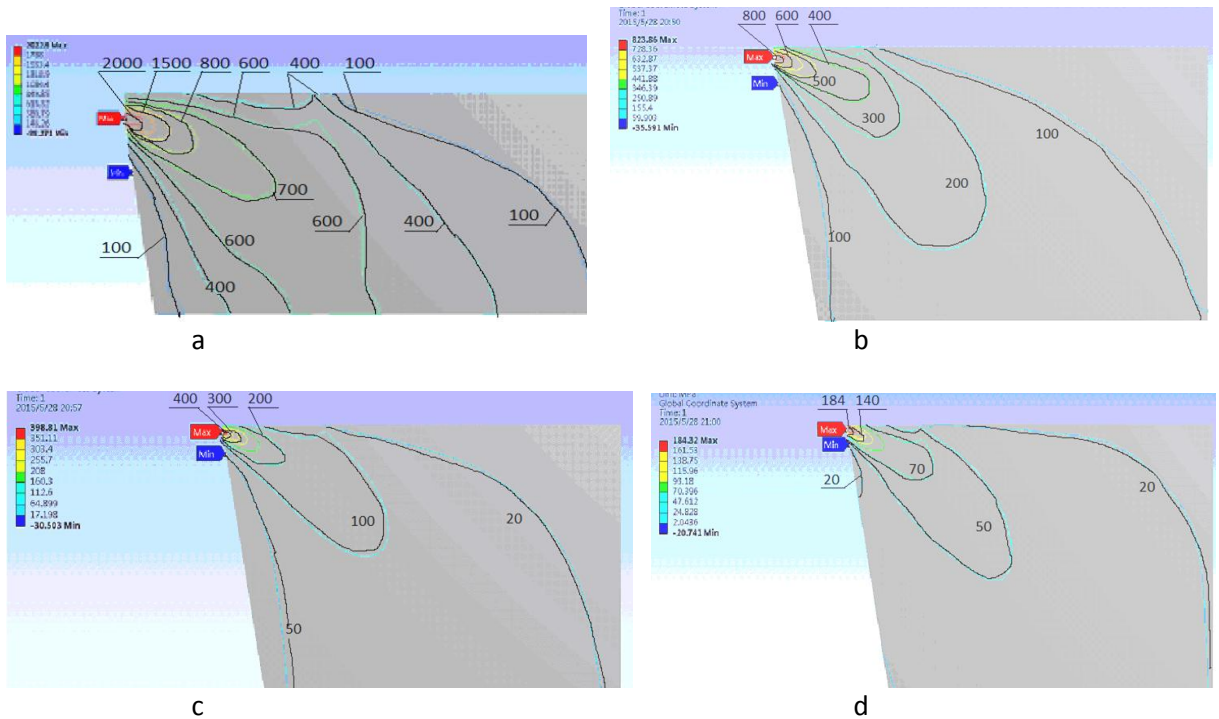


Fig. 9.3. Distribution of shear stresses τ [MPa] in the cutting edge for a cutting insert with thickness of h : a) $h=2$ mm; b) $h=6$ mm; c) $h=12$ mm; d) $h=20$ mm

Relatively low, but elevated stresses ($-3200 > |\sigma_3| \geq -2000$ MPa) influence probability of the insert destruction, since presence of small imperfections in the zone of these stresses can lead to development of a macro-crack with subsequent destruction of the cutting insert. Diagram of relationship between location of a zone with increased normal stresses

($|\sigma_3| \geq -2000$ MPa) and insert thickness is presented in Fig. 9.6. The zone with increased stresses is negligibly small for insert thickness $h > 12$ mm.

IV. Conclusion

1. In machining of titanium alloy (Ti6Al2Mo2Cr) with an insert with thickness equal or less than 5 mm, high compressive stresses, which exceed ultimate compressive strength of cemented carbide (WC8Co), arise near the cutting edge, which leads to chipping of the major cutting edge.
2. In machining of titanium alloy (Ti6Al2Mo2Cr) with a cutting insert with thickness equal or less than 5 mm, tensile stresses, which approach to ultimate tensile strength of cemented carbide, arise on the face and base surfaces of the cutting insert, which increases probability of cutting insert destruction.
3. In machining of titanium alloy (Ti6Al2Mo2Cr) with a cutting insert with thickness equal or less than 6 mm high shear stresses arise near the cutting edge, exceeding ultimate shear strength of cemented carbide and leading to destruction of the major cutting edge.
4. Application of cutting inserts with thickness more than 6 mm in machining of titanium alloy helps to avoid destruction of lightly worn inserts, which are common for finish and semifinish machining [4, 6,7].

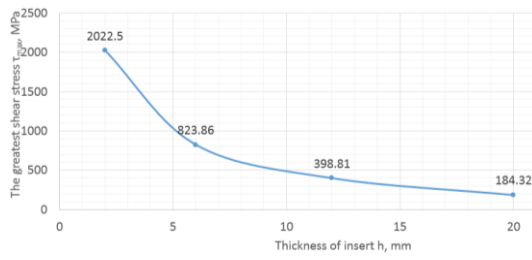


Fig. 9.5. Influence of cutting insert thickness on the maximum value of the tangential stress in the cutting wedge

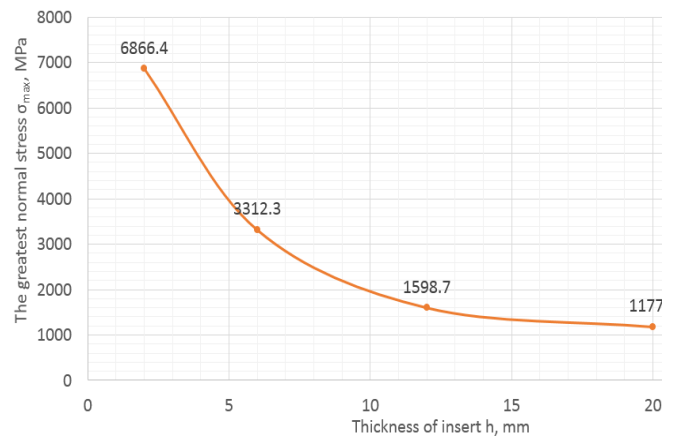


Fig. 9.4. Influence of the cutting insert thickness on the maximum value of the principle normal stress in the cutting wedge

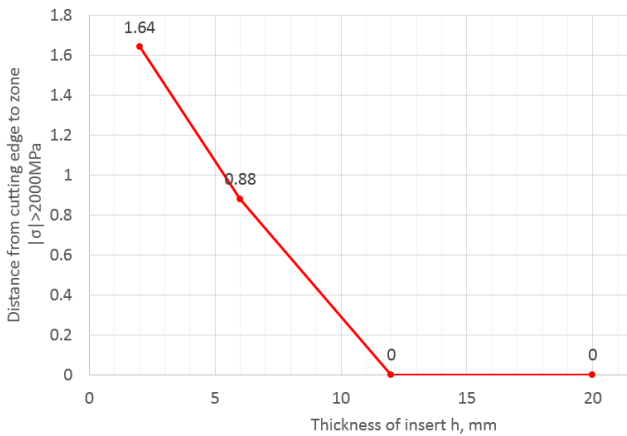


Fig. 9.6. Influence of cutting insert thickness on the distance from the cutting edge to the zone with increased normal stress ($\sigma \geq 2000 \text{ MPa}$) in the cutting wedge

Distribution of contact loads on the flank-land of the cutter with a rounded cutting edge

Abstract: In this paper, contact conditions between tool and workpiece material for wear-simulating turning by a cutter with a sharp-cornered edge and with a rounded cutting edge are analyzed. Results of experimental study of specific contact load distribution on the artificial flank wear-land of the cutter in free orthogonal turning of the disk from titanium alloy (Ti6Al2Mo2Cr), ductile (63Cu) and brittle (57Cu1Al3Mn) brasses are described. Investigations were carried out by the method of “split cutter” and by the method of the artificial flank-land of variable width. Experiments with variable feed rate and cutting speed show that in titanium alloy machining with a sharp-cornered cutting edge the highest normal contact load ($\sigma_{h \max} = 3400 \dots 2200$ MPa) is observed immediately at the cutting edge, and the curve has a horizontal region with length of 0.2...0.6 mm. At a distance from the cutting edge, value of specific normal contact load is dramatically reduced to 1100...500 MPa. The character of normal contact load for a rounded cutting edge is different – it is uniform, and its value is approximately 2 times smaller compared to machining with a sharp-cornered cutting edge. In author’s opinion it is connected with generation of a seizure zone in chip formation region and explains capacity of very worn-out cutting tools for machining of titanium alloys. The paper analyses distribution of tangential contact loads over the flank land, the loads pattern is considerably different for machining with a sharp-cornered edge and with a rounded cutting edge.

Keywords: tool wear, tool flank, contact load distribution, rounding off.

Abbreviation and symbols: m/s – meter per second (cutting speed v); mm/r – millimeter per revolution (feed rate f); MPa – mega Pascal (specific contact load as a stress σ or τ); h_f – the width of the flank wear land (chamfer) of the cutting tool, flank wear land can be natural or artificial like in this paper [mm]; x_h – distance from the cutting edge on the surface of the flank-land [mm]; σ_h – normal specific contact load on the flank land [MPa]; τ_h – tangential (shear) specific contact load on the flank land [MPa]; HSS – high speed steel (material of cutting tool); P_y – radial component of cutting force [N]; P_{y_r} – radial component of cutting force on the rake face [N]; P_z – tangential component of cutting force [N]; γ – rake angle of the cutting tool [°]; α – clearance angle of the sharp cutting tool [°]; α_h – clearance angle of the flank wear land [°]; ρ – rounding off radius of the cutting edge [mm]; b – width of the machined disk [mm].

I. Introduction

Wear of a cutting tool causes a change in its geometry – a wear-land with width h_f forms on the flank surface, the cutting edge rounds with a radius ρ , a wear crater forms on the tool face. In machining of titanium alloys, which are widely used in aerospace and chemical industry, shipbuilding, etc., very intensive wear occurs on the flank surface with rounding of the cutting edge. Contact loads vary on the face and the flank surfaces of a cutting tool, as well as temperature in chip formation zone.

In machining of difficult-to-machine titanium alloys the width of the wear-land h_f reaches 2.5...5 mm, and cutting edge rounding radius reaches $\rho = 0.3 \dots 5$ mm [1, 2], but even with this big value, cutting tool is still capable of working, which is obscure. It is necessary to know distribution of contact loads and temperature on the surfaces of the cutting tool for estimation of cutting wedge strength at various stages of wear process.

Investigation of specific contact loads distribution on the work surfaces of the cutting tool is a difficult task due to large values of contact loads, especially in machining of difficult-to-machine materials, to which the widely used in aerospace industry titanium alloy BT3-1 belongs.

II. Research Methods and Preparation for Experimental Study of Contact Load Distribution

Distribution of specific normal σ_h and tangential τ_h contact loads on the wear-land of the flank surface was studied by the method of “split cutter”, and by the method of the artificial flank-land of variable width near the cutting edge [1].

Experiments were carried out in free orthogonal turning of a disk made from the above-mentioned materials, i.e. with the radial feed f of a cutter. The ductile brass (63Cu), which forms continuous chip; the brittle brass (57Cu1Al3Mn), which forms discontinuous chip; the difficult-to-machine titanium alloy BT3-1 (Ti6Al3Mo2Cr), which forms discontinuous chip, were used as workpiece material.

Brass was selected to fine-tune the method of a split cutter and to compare its results with the results received by the method of the artificial flank-land of variable width. The latter method was used to study contact load distribution on the artificial flank-land near the cutting edge in machining titanium alloy BT3-1, since the split cutter, which is made from cemented carbide BK8 (WC8Co), doesn't have sufficient strength when a split between its parts approaches to a cutting edge on a distance smaller than 0.6 mm. Comparison of the results received by both methods in machining of brass, has displayed good coincidence, the deviation did not exceed $\pm 15\%$.

Wear was simulated by sharpening a chamfer with width h_f on a flank surface ground with clearance angle $\alpha_h = 0^\circ$. To study influence of the cutting edge rounding, the wear was simulated by artificial rounding of a cutting edge to the required radius ρ . The width of the artificial flank-land h_f was measured by means of a toolmaker's microscope. The length of the artificial flank wear land was accepted equal to the width of a disk b , since ordinary wear of a cutting tool occurs along the cutting edge and its length is usually bigger than its width.

The change in length of a flank-land insignificantly affects distribution of specific contact loads on the face of cutting tool – only through the change of cutting temperature. It allows us to use the data on contact load distribution on the rake surface of the cutting tool, received in cutting by a sharp cutting tool. Therefore the focus was given to experimental research of contact loads distribution on a flat section of an artificial flank-land, which was used to simulate flank wear.

III. Results of experiments

In machining of ductile brass (63Cu) with a sharp cutter and artificial flank-land (width $h_f = 2.4$ mm, clearance angle $\alpha_h = 0^\circ$) extreme pattern of σ_h curves is observed, i.e. the highest normal contact loads $\sigma_{h\max}$ are at some distance from the cutting edge (Fig. 1 and 2). In machining of brittle brass (57Cu1Al3Mn) by a cutter with the same geometry and cutting speed, the highest contact loads $\sigma_{h\max}$ are near the cutting edge (Fig. 9.8.).

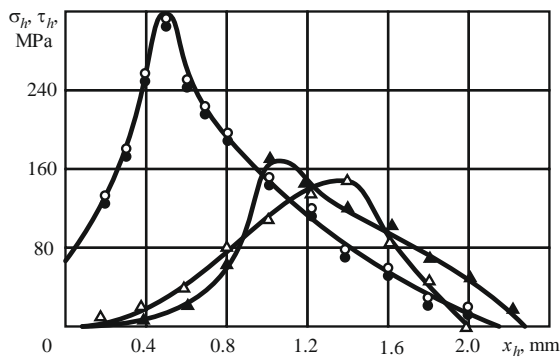


Fig. 9.7. Distribution of contact loads on the flank-land of the cutter in ductile brass (63Cu) machining. $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 18^\circ$, $\alpha_h = 0^\circ$, $v = 1.7$ m/s, $\circ, \bullet - f = 0.06$ mm/r; $\Delta, \blacktriangle - f = 0.21$ mm/r;

\circ, Δ – normal contact load σ_h ; \bullet, \blacktriangle – tangential contact load τ_h . Ordinate – normal σ_h [Mpa], and tangential τ_h [Mpa] specific contact load on the flank-land; abscissa – distance from the cutting edge on the surface of the flank-land x_h [mm]

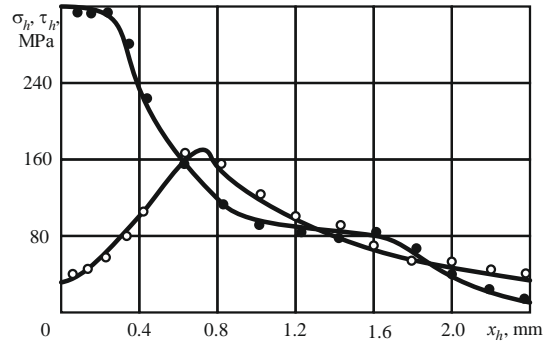


Fig. 9.8. Distribution of contact loads on the flank-land of the cutter in cutting of ductile brass (63Cu). $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 18^\circ$, $\alpha_h = 0^\circ$, $v = 3.6$ m/s, $f = 0.21$ mm/r; \circ – normal contact load σ_h ;

Results of investigations of contact load distribution on a flat section of the flank-land of the cutter with artificial rounding of the cutting edge in machining of brass are presented on Fig.9.9.,and in machining of titanium alloy BT3-1are presented on Fig.9.10.

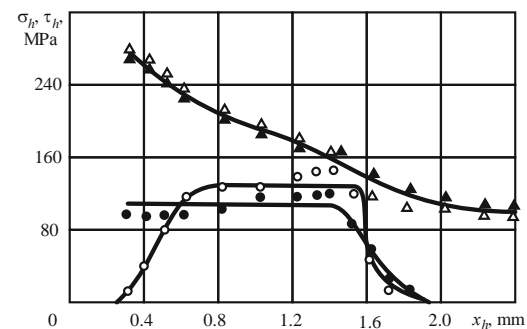


Fig. 9.10. Distribution of contact loads on the flank-land of the cutter in brass machining by the cutter with rounding off cutting edge with radius $\rho = 0.3$ mm. $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 18^\circ$, $\alpha_h = 0^\circ$, $v = 1.7$ m/s, \circ, \bullet – ductile brass (63Cu), $f = 0.21$ mm/r; Δ, \blacktriangle – brittle brass (57Cu1Al3Mn); $f = 0.41$ mm/r; \circ, Δ – normal contact load

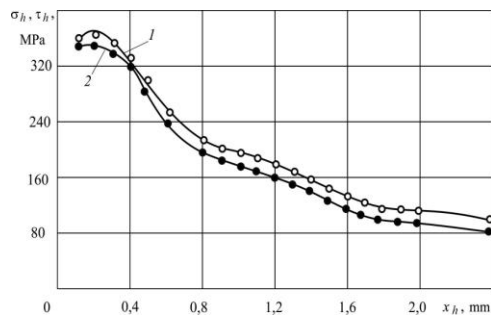


Fig. 9.9. Distribution of normal σ_h (\circ) and tangential τ_h (\bullet) contact loads on the flank-land of the cutter in cutting of brittle brass (57Cu1Al3Mn). $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 18^\circ$, $\alpha_h = 0^\circ$, $v = 1.7$ m/s, $f = 0.41$ mm/r. Ordinate – normal σ_h [Mpa], and tangential τ_h [Mpa] specific contact load on the flank-land; abscissa – distance from the cutting edge on the surface of the flank-land x_h

IV. Discussion of experiments results

Extreme pattern of curves of normal σ_h and tangential τ_h specific contact loads in machining of ductile materials was also mentioned by the other researches [2], however authors have not discovered explanations of this phenomenon.

In our opinion, the highest normal contact loads σ_h in cutting with continuous chip are at some distance from a cutting edge due to a sag of the transient surface under the radial component of the cutting force on the rake surface P_{y_r} [1].

In continuous chip formation the influence of radial component of the cutting force P_{y_r} on the face is stable [3], a sag of the transient surface is constant, therefore, pressure from the elastic recovering transient surface on the flank-land is higher at some distance from cutting edge [1].

During discontinuous chip formation at the moment when formed chip elements separate from the workpiece, the radial component of the cutting force on the face P_{y_r} quickly decreases (sometimes to zero) [3], which leads to elastic recovery of the transient surface and its pressure upon the cutting tool flank surface. To a greater degree this pressure acts near the cutting edge [1], therefore the highest normal contact loads $\sigma_{h \max}$ are observed near the cutting edge, which is confirmed by results of experiments in machining of brittle brass (57Cu1Al3Mn), which forms discontinuous chip (Fig. 9.11.).

In machining of brass, tangential contact loads τ_h are equal to normal ones σ_h , except for the case of ductile brass (63Cu) machining at elevated cutting speed $v = 3.62$ m/s, when the highest value of $\tau_{h \max}$ is observed near the cutting edge, where it is not equal to normal contact loads σ_h (Fig. 9.11.). Equality of tangential and normal contact loads is associated, in our opinion, with plastic character of contact on the flank-land. The high coefficient of friction $\mu = \tau_h / \sigma_h \approx 1$ does not correspond to usual external friction, when coefficient of friction is equal to 0.15 ... 0.1. In case of plastic contact, the tangential contact loads τ_h cannot be calculated by the formula $\tau_h = \sigma_h \times \mu$, as they will be equal to shear strength of a material τ_{\max} at the operating temperature in the contact zone ($\tau_h = \tau_{\max}$).

At elevated cutting speed $v = 1.17$ m/s (Fig. 2), the higher temperature of cutting promotes adhesion of contact surfaces, thus strong seizure takes place even at insignificant pressure ($\sigma_h \approx 40$ MPa), what was observed near the cutting edge. High value of $\tau_{h \max} = 320$ MPa is explained, in our opinion, by increased strain rate and hardening of work material. Softening of the

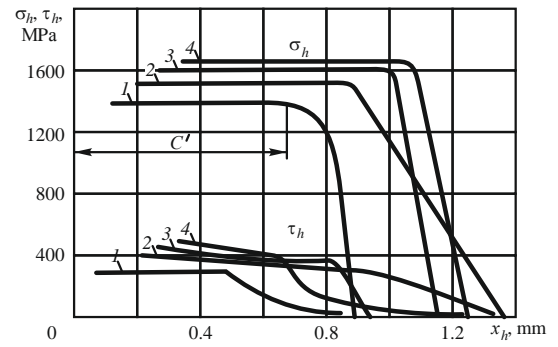


Рис. 9.11. Distribution of contact loads on the flank-land of cutter in machining titanium alloy BT3-1 by the cutter with rounding off cutting edge with radius $\rho = 0.3$ mm. BT3-1 – BK8, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\alpha_h = 0^\circ$, $V = 1$ m/s, $f = 0.21$ mm/r;

1 – $\rho = 0.07$ mm; 2 – $\rho = 0.2$ mm; 3 – $\rho = 0.28$ mm; 4 – $\rho = 0.35$ mm;

σ_h – normal contact load on the surface of the flank-land, τ_h – tangential contact load on the surface of the flank-land

work material due to influence of temperature at increased cutting speed doesn't have time to occur [5].

In case of the rounded cutting edge, workpiece material hardens as it moves under rounded section, therefore tangential contact load τ_h is observed to increase (Fig. 9.12) compared to cutting with a sharp cutting edge (Fig. 9.11 and 9.12).

In machining of plastic brass the cutting edge rounding leads to change in the pattern of contact loads distribution and their value (Fig. 9.12). When a cutting edge is rounded, volume of the work material, pressed under the rounded section of the cutting edge, is increased, therefore the sag of the transient surface affects pressure on a flank surface to a lesser degree. The normal contact load σ_h on a flat section of the flank land near the cutting edge is not equal to zero in machining of plastic brass (63Cu), and the pattern of contact loads distribution becomes uniform (Fig. 4). Normal and tangent contact loads are equal in magnitude ($\sigma_h \approx \tau_h \approx 130$ MPa), which indicates plastic character of contact on the flank-land. Magnitude of these loads a bit higher than the magnitude of the highest loads on a flank-land of the rounded cutting edge (Fig. 1, 2), this is associated with dragging of additional material under the rounded section of the cutting edge and with an increase of elastic deformation of the work material in the chip forming zone.

The work material is work-hardened when it moves under a rounded section, thus an increase of the tangential contact load τ_h is observed (Fig. 4) compared to cutting with a sharp cutter (Fig. 1 and 2).

Pattern of the contact loads distribution does not change for the brittle brass machining with a rounded cutting edge (Fig. 4), and magnitude of the highest contact load is even decreased ($\sigma_{h \max} \approx \tau_{h \max} = 280$ MPa) compared to cutting with a sharp cutting edge ($\sigma_{h \max} \approx \tau_{h \max} = 360$ MPa) (Fig. 3). It is explained by formation of a seizure zone in the rounding region, which reduces contact of the transient surface with the flank-land, and this is especially true for conditions of discontinuous chip formation. Indirectly it is proved by presence of the scratch marks on the rounded portion, which were left during sharpening of the cutting tool.

The reduction of the tangential contact load τ_h , at a distance from the cutting edge, is caused, in our opinion, by softening of work material in the contact zone due to increase in temperature. Plastic character of contact on the flank land is indirectly confirmed by considerable amount of brass stuck to the flank-land after turning.

Machining of titanium alloy BT3-1, which forms discontinuous chip, by a cutter with a rounded cutting edge (Fig. 5), shows reduction of normal contact loads almost in 2 times compared to cutting without cutting edge rounding

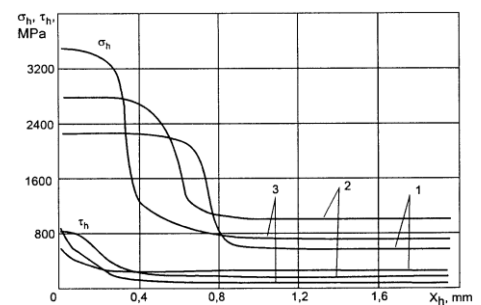


Fig. 9.12 Distribution of normal σ_h and tangential τ_h contact loads on the flank-land of the cutter in titanium alloy cutting without rounding off cutting edge.

BT3-1 – BK8, $\gamma=0^\circ$, $\alpha_h = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $v=1$ [m/s]: 1 - $f=0.11$ mm/r;

2 - $f=0.21$ mm/r; 3 - $f=0.41$ mm/r.

Ordinate – normal σ_h [MPa] and tangential τ_h [MPa] specific contact load on the flank-land; abscissa – distance from the cutting edge on the surface of flank-land x_h [mm].

(Fig. 9.12.). We explain this paradoxical phenomenon by formation of a seizure zone on the cutter face in the region of rounding, which reduces contact of the transient surface with the flank land. It is indirectly proved by the presence of the scratch marks on the rounded part, left during sharpening of the cutting tool.

The tangential contact loads, in the area that is more than 0.3 mm away from the cutting edge, are a bit higher in magnitude for cutting with a rounded cutting edge ($\tau_h = 350 \dots 420$ MPa) (Fig. 5) than the tangential contact loads in cutting with a sharp cutting edge ($\tau_h = 300 \dots 200$ MPa) (Fig. 6). The increase of τ_h for a rounded cutting edge is explained by work-hardening of the work material during its travel under the rounded section of the cutting edge. The absence of influence of normal contact loads on the tangential contact loads indicates plastic character of contact on the flank-land, which is indirectly confirmed by presence of titanium alloy adhered to the flank-land after turning.

Magnitude of the highest contact loads $\sigma_{h \max}$, $\tau_{h \max}$ and the length C' of the horizontal region of the curve σ_h are directly proportional to the rounding radius value ρ (Fig. 9.13.) that indicates increase of the material volume, pressed down under the cutting edge.

There is also an increase of the elastic deformation of the work material in chip formation zone, which is proved by direct proportional dependence of the radial component of the cutting force acting on the face P_{y_r} on the rounding radius ρ (Fig. 9.13.). The increase of cutting force components, when the seizure zone is formed, is explained by the small sizes of

this zone, which cannot cope with increase of resistance to chip formation from the rake surface. In order to change normal contact loads even minor change of the seizure zone is enough due to the rigidity of the contact on the flank surface.

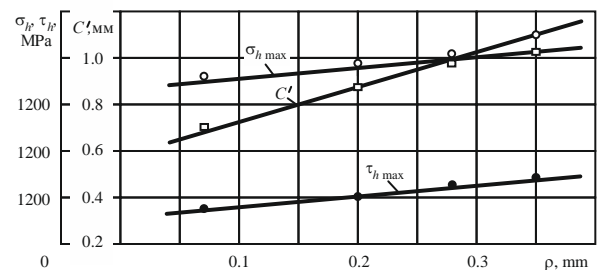


Fig. 9.13. Influence of the cutting edge radius rounding off ρ on the highest contact loads magnitude on the flank-land $\sigma_{h \max}$, $\tau_{h \max}$ and on the length C' of the horizontal region of the curve σ_h in titanium alloy BT3-1 cutting

BT3-1 – BK8, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\alpha_h = 0^\circ$, $v = 1$ m/s, $f = 0.21$ mm/rev; 1 – $\rho = 0.07$ mm; 2 – $\rho = 0.2$ mm; 3 – $\rho = 0.28$ mm; 4 – $\rho = 0.35$ mm;

σ_h – normal contact load, τ_h – tangential contact load

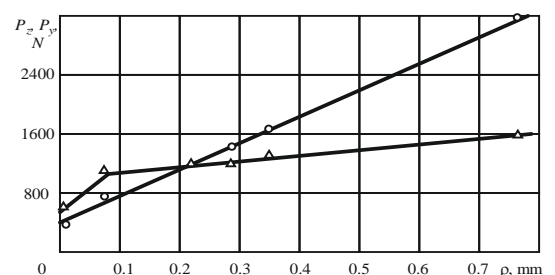


Fig. 9.14. Dependence of cutting force component acting on the rake surface P_{y_r} и P_{z_r} on radius of cutting edge rounding ρ in titanium alloy BT3-1 machining. BT3-1 – BK8, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $v = 1$ m/s, $f = 0.21$ mm/r; \circ – P_{y_r} [N], Δ – P_{z_r} [N]; machined disk width $b = 2.3$ mm

V. Conclusion

1. In machining of ductile brass (63Cu), which forms continuous chip, the cutting edge rounding leads to change in the pattern of the contact loads distribution on the flank-land – it becomes uniform. It is explained by dragging of additional material under the rounded section of the cutting edge, which leads to smaller influence of the transient surface sag.
2. In machining of ductile brass Л63 with a rounded cutting edge, magnitude of contact loads a bit more than the highest loads on the flank-land in cutting with a sharp cutting edge. It is explained by dragging of additional material under the rounded section of the cutting edge.
3. In machining of ductile brass Л63 with a cutting tool with rounded cutting edge, normal and tangential contact loads on the flank-land are equal in magnitude ($\sigma_h \approx \tau_h \approx 130$ MPa), which indicates plastic character of contact on the flank-land.
4. In machining of brittle brass (57Cu1Al3Mn), which gives discontinuous chip, a cutting edge rounding doesn't lead to change in the pattern of contact loads distribution on the flank-land, but the magnitude of the highest contact load is smaller compared to cutting with a sharp cutting edge. It is explained by formation of a seizure zone on the rounded section of the cutting edge. It reduces contact of the transient surface with the flank-land, and to a greater degree it is true for discontinuous chip.
5. Reduction of the tangential loads on the flank land during machining of brittle brass (57Cu1Al3Mn), in case the hypothesis about plastic character of contact on the flank land is accepted, is explained, in our opinion, by the softening of the work material in the contact zone due to increase in temperature.
6. The magnitude of normal contact loads on the flank land in cutting of titanium alloy BT3-1 with a rounded cutting edge is two times as small as in cutting with a sharp cutting edge. It is explained by formation of the seizure zone on the rounded section of the cutting edge.
7. Reduction of the normal contact loads magnitude on the flank-land with a rounded cutting edge in two times explains working capacity of a considerably worn cutting tool to machine titanium alloys.
8. Character of contact on the flank land is plastic in machining of titanium alloy.
9. The increase in tangential contact loads on the flank-land in cutting of titanium alloy BT3-1 with a rounded cutting edge is explained by work-hardening of the work material due to high plastic deformations.

References

- [1] Kozlov V 2012 *Flank Contact Load Distribution at Cutting Tool Wear*. (Proceedings 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST, Article number 6357713)
- [2] Ostafjiev V *et al* 1976 *Physical Fundamentals of Metals Vutting Processes* (Kiev: Visha shkola p 136 (in Russ))
- [3] Afonarov A and Lasukov A 2014 *Elementary Chip Formation in Metal Cutting* (Russian Engineering Research vol **3**) pp 152-155 (in Russ)
- [4] Narutaki N *et al* 1983 *Study on Machining of Titanium Alloys* (CIRP Annals - Manufacturing Technology vol **32** (1)) pp 65-69
- [5] Wang B *et al* 2013 *Investigations of yield stress, fracture toughness, and energy distribution in high speed orthogonal cutting* (International journal of Machine Tools & Manufacture vol **73**) pp 1-8
- [6] Hu J and Chou Y 2007 *Characterizations of cutting tool flank wear-land contact* (Wear, 263, Iss. 7-12) pp 1454-1458
- [7] Trent, E.M., Wright, P.K. *Metal Cutting*. fourth ed. Butterworth-Heinemann, Boston, 2000
- [8] Kozlov V and Li X 2015 *Influence of chip formation characteristics on flank contact load distribution in titanium alloy cutting* (Applied Mechanics and Materials: Scientific Journal vol **756**: Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS2014)) pp 126-131

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8ЛМ51	Цуй Цзян

Институт кибернетики		Кафедра ТМСИР	
Уровень образования	магистр	Направление/специальность 15.04.01 «Машиностроение»	Расчет на прочность торцевой фрезы методом конечных элементов

Тема дипломной работы: Расчет на прочность торцевой фрезы методом конечных элементов.

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:
<p><i>Целью данной работы является расчёт на прочность торцевой фрезы методом конечных элементов.</i></p> <p><i>Описание рабочего места на предмет возникновения вредных проявлений факторов производственной среды необходимо предусмотреть мероприятия по предотвращению негативного воздействия на окружающую природную среду используемых энергетических проявлений и образующихся отходов: электромагнитные поля, отработанные картриджи, принтеры и др. оргтехника; необходимо обеспечить устойчивую работу производственного участка при возникновении чрезвычайных ситуаций, характерных для Сибири – сильные морозы, пурга, человеческий фактор, диверсия (рассмотреть минимум 2 ЧС – 1 природную, 1 техногенную).</i></p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:
<p><i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i></p> <p><i>а) приводится перечень всех используемых в работе реагентов, их агрегатное состояние, класс опасности (токсичности), механизм воздействия их на организм человека, единицы измерения количества (концентрации); приводится перечень средств коллективной и индивидуальной защиты персонала, а также защиты окружающей среды;</i></p> <p><i>б) приводятся данные по оптимальным и допустимым значениям микроклимата на рабочем месте, перечисляются методы обеспечения этих значений; приводится 1 из расчетов (расчет освещенности на рабочем месте, расчет необходимого воздухообмена на рабочем месте, расчет необходимого времени эвакуации рабочего персонала);</i></p> <p><i>в) приводятся данные по реальным значениям шума на рабочем месте, разрабатываются или, если уже есть, перечисляются мероприятия по защите персонала от шума, при этом приводятся значения ПДУ, средства коллективной защиты, СИЗ;</i></p> <p><i>г) приводятся данные по реальным значениям электромагнитных полей на рабочем месте, в том числе от компьютера или процессора, если они используются, перечисляются СКЗ и СИЗ; приведение допустимых норм с необходимой размерностью (с ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)</i></p>
<p><i>Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</i></p> <p><i>а) приводятся данные по значениям напряжения используемого оборудования, классификация помещения по электробезопасности, допустимые безопасные для человека значения напряжения, тока и заземления (в т.ч. статическое электричество, молниезащита - источники, средства защиты); перечисляются СКЗ и СИЗ;</i></p> <p><i>б) приводится классификация пожароопасности помещений, указывается класс пожароопасности вашего помещения, перечисляются средства пожаробнаружения и принцип их работы, средства пожаротушения, принцип работы, назначение (какие пожары можно тушить, какие – нет), маркировка; пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия).</i></p>
<p><i>Охрана окружающей среды:</i></p> <p><i>организация безотходного производства (приводится перечень отходов при эксплуатации установки, перечисляются методы улавливания, переработки, хранения и утилизации образовавшихся на вашем производстве промышленных отходов).</i></p>
<p><i>Защита в чрезвычайных ситуациях:</i></p>

<p><i>а)Приводятся возможные для Сибири ЧС; Возможные ЧС: морозы, диверсия разрабатываются превентивные меры по предупреждению ЧС; разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий</i></p>
<p><i>0. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства (приводится перечень ГОСТов, СНиПов и др. законодательных документов, использованных в своей работе);</i></p>
<p>Перечень графического материала: 1) Пути эвакуации 2) План размещения светильников на потолке рабочего помещения</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Федорчук Юрий Митрофанович	Доктор технических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЛМ51	Цуй Цзян		

Описание рабочего места

В данном разделе рассмотрены вопросы, связанные с организацией рабочего места в соответствии с нормами производственной санитарии, техники производственной безопасности и охраны окружающей среды.

В данной работе рассмотрено рабочее помещение для расчета прочности режущего инструмента методом конечных элементов с помощью компьютера.

Под проектированием рабочего места понимается целесообразное пространственное размещение в горизонтальной и вертикальной плоскостях функционально взаимосвязанных средств производства необходимых для осуществления трудового процесса.

При проектировании рабочих мест должны быть учтены освещенность, температура, влажность, давление, шум, наличие вредных веществ, электромагнитных полей и другие санитарно-гигиенические требования к организации рабочих мест.

Необходимыми требованиями являются обеспечение условий для безопасного ведения работ, соблюдение норм и правил техники безопасности, правил работы с электрооборудованием. Необходимо следить за концентрацией вредных веществ в воздухе, исправностью проводки, изоляции кабелей и пр., чтобы не допустить возникновения пожароопасных и взрывоопасных ситуаций.

При проектировании лаборатории необходимо уделить внимание и охране окружающей среды, а в частности, организации безотходного производства.

Также необходимо учитывать возможность чрезвычайных ситуаций. Так как лаборатория находится в городе Томске, наиболее типичной ЧС является мороз. Так же, в связи с неспокойной ситуацией в мире, одной из возможных ЧС может быть диверсия.

10. Социальная ответственность

Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды

В лаборатории, где находится оргтехника могут быть следующие вредные факторы: а) некомфортные метеоусловия; б) вредные вещества; в) производственный шум; г) недостаточная освещенность; д) электромагнитное излучение;

10.1 Метеоусловия

Микроклимат в производственных условиях определяется следующими параметрами:

- 1) температура воздуха;
- 2) относительная влажность воздуха;
- 3) скорость движения воздуха.

При высокой температуре воздуха в помещении кровеносные сосуды кожи расширяются, происходит повышенный приток крови к поверхности тела, и выделение тепла в окружающую среду значительно увеличивается. При низкой температуре окружающего воздуха реакция человеческого организма иная: кровеносные сосуды кожи сужаются, приток крови к поверхности тела замедляется, и теплоотдача конвекцией и излучением уменьшается. Таким образом, для теплового самочувствия человека важно определенное сочетание температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне.

Повышенная влажность воздуха ($\phi > 75\%$) затрудняет терморегуляцию организма, т.к. происходит снижения испарения пота, а пониженная влажность ($\phi < 20\%$) вызывает пересыхание слизистых оболочек дыхательных путей.

Оптимальные и допустимые показатели температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 1 [ГОСТ 12.1.005-88].

Для обеспечения оптимальных и допустимых показателей микроклимата в холодный период года следует применять средства защиты рабочих мест от

остекленных поверхностей оконных проемов, чтобы не было охлаждения. В теплый период года необходимо предусмотреть защиту от попадания прямых солнечных лучей.

Работы делятся на три категории тяжести на основе общих энергозатрат организма. Работа, относящаяся к инженерам – разработчикам, относится к категории легких работ. Допустимые значения микроклимата для этого случая даны в таблице.

Таблица - Требования к микроклимату

Период года	Категория работы	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	средняя	19 – 24	15 - 75	≤ 0.1
Теплый	средняя	20 - 28	15 - 75	≤ 0.2

Одними из основных мероприятий по оптимизации микроклимата и состава воздуха в производственных помещениях являются обеспечение надлежащего воздухообмена и отопления, тепловая изоляция нагретых поверхностей оборудования, воздухопроводов и трубопроводов.

10.2 Вредные вещества

Во время работы с оргтехникой исполнитель сталкивается с пылью, выделяемой бумагой.

Бумага (целлюлоза) выделяет в атмосферу воздуха пыль целлюлозную.

Согласно гигиенические нормативы СН 2.2.5.1313-03 ПДК целлюлозы в атмосфере рабочего помещения составляет 15 мг/м³, что соответствует 4му классу опасности.

Вентиляция производственных помещений предназначена для уменьшения запыленности, задымленности и очистки воздуха от вредных выделений производства, а также для сохранности оборудования. Она служит одним из главных средств оздоровления условий труда, повышения

производительности и предотвращения опасности профессиональных заболеваний. Система вентиляции обеспечивает снижение содержания в воздухе помещения пыли, газов до концентрации не превышающей ПДК. Проветривание помещения проводят, открывая форточки. Проветривание помещений в холодный период года допускается не более однократного в час, при этом нужно следить, чтобы не было снижения температуры внутри помещения ниже допустимой. Воздухообмен в помещении можно значительно сократить, если улавливать вредные вещества в местах их выделения, не допуская их распространения по помещению. Для этого используют приточно-вытяжную вентиляцию. Кратность воздухообмена не ниже 3.

10.3 Производственный шум

Предельно допустимый уровень (ПДУ) шума - это уровень фактора, который при ежедневной (кроме выходных дней) работе, но не более 40 часов в неделю в течение всего рабочего стажа, не должен вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений. Соблюдение ПДУ шума не исключает нарушения здоровья у сверхчувствительных лиц.

Допустимый уровень шума ограничен ГОСТ 12.1.003-83 и СанПиН 2.2.4/2.1.8.10-32-2002. Максимальный уровень звука постоянного шума на рабочих местах не должно превышать 80 дБА.

10.4 Освещенность

Согласно СНиП 23-05-95 в лаборатории, где происходит периодическое наблюдение за ходом производственного процесса при постоянном нахождении людей в помещении освещенность при системе общего освещения не должна быть ниже 75 Лк.

Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высокий уровень работоспособности, оказывает положительное психологическое действие на человека и способствует повышению производительности труда.

На рабочей поверхности должны отсутствовать резкие тени, которые создают неравномерное распределение поверхностей с различной яркостью в

поле зрения, искажает размеры и формы объектов различия, в результате повышается утомляемость и снижается производительность труда.

Для защиты от слепящей яркости видимого излучения (факел плазмы в камере с катализатором) применяют защитные очки, щитки, шлемы. Очки на должны ограничивать поле зрения, должны быть легкими, не раздражать кожу, хорошо прилегать к лицу и не покрываться влагой.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. Длина помещения $A = 7$ м, ширина $B = 6$ м, высота = 3,5 м. Высота рабочей поверхности над полом $h_p = 1,0$ м. Согласно СНиП 23-05-95 необходимо создать освещенность не ниже 150 лк, в соответствии с разрядом зрительной работы.

Площадь помещения:

$$S = A \times B,$$

где A – длина, м;

B – ширина, м.

$$S = 7 \times 6 = 42 \text{ м}^2$$

Коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, без штор $\rho_c=50\%$, свежепобеленного потолка $\rho_{II}=70\%$. Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен $K_3=1,5$. Коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп $Z=1,1$.

Выбираем лампу ЛД-40, $\Phi_{II} = 2300$ лм и светильники с люминесцентными лампами типа ОДОР-2-40. Этот светильник имеет две лампы мощностью 40 Вт каждая, длина светильника равна 1227 мм, ширина – 265 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина λ , которая для люминесцентных светильников с защитной

решёткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем $\lambda=1,1$, расстояние светильников от перекрытия (свес) $h_c = 0,3$ м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p,$$

где h_n – высота светильника над полом, высота подвеса,

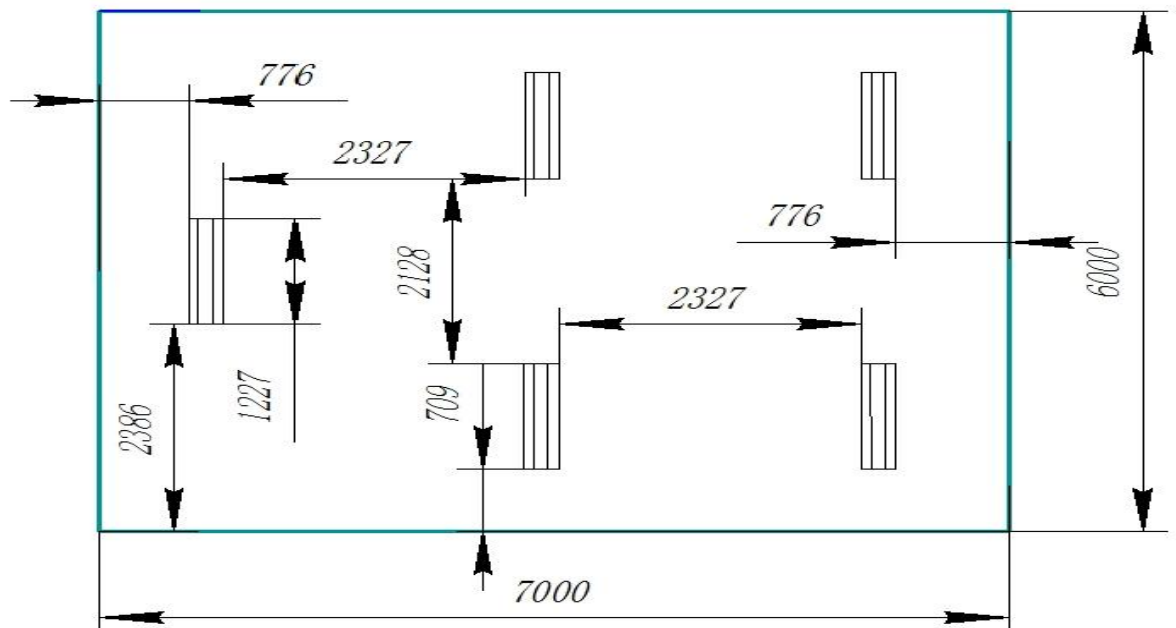
h_p – высота рабочей поверхности над полом.

Наименьшая допустимая высота подвеса над полом для двухламповых светильников ОДОР: $h_n = 3,5$ м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_p - h_c = 3,5 - 1 - 0,5 = 2,0 \text{ м.}$$

Размещаем светильники в два ряда. На рисунке №1 изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.



Ри.10.1. – План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{7 \cdot 6}{2,0 \cdot (7 + 6)} = 1,6$$

Коэффициент использования светового потока, показывающий какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность, для светильников типа ОДОР с люминесцентными лампами при $\rho_{\Pi} = 70\%$, $\rho_{С} = 50\%$ и индексе помещения $i = 1,6$ равен $\eta = 0,47$.

Потребный световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$N = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{\Phi_{\Pi} \cdot \eta} = \frac{150 \cdot 7 \cdot 6 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{2300 \cdot 0,47} = 9,6 = 10$$

Общее число светильников: $N = 5$

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формуле:

$$2L_2 + \frac{2}{3}L_2 + 3 \cdot 265 = 7000$$

$$L_2 = 2327\text{мм}$$

Расстояние от крайних светильников или рядов до стены определяется по формуле:

$$L_1 + \frac{2}{3}L_1 + 2 \cdot 1227 = 6000$$

$$L_1 = 2128\text{мм}$$

Выбираем лампу дневного света ЛД-40, световой поток которой равен $\Phi_{\text{ЛД}} = 2600$ Лм.

$$\Phi_{\text{расч}} = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{150 \cdot 7 \cdot 6 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{10 \cdot 0,47} = 2212\text{лм}$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{расч}} - \Phi_{\text{лам}}}{\Phi_{\text{лам}}} \cdot 100\% \leq 20\%;$$

$$\frac{\Phi_{\text{расч}} - \Phi_{\text{лам}}}{\Phi_{\text{лам}}} \cdot 100\% = \frac{|2212 - 2300|}{2300} \cdot 100\% = 3,8\%.$$

Таким образом: $3.8\% \leq 20\%$, необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

10.5 Электромагнитные поля

В лаборатории используются магнетронные генераторы при помощи которых происходит подвод СВЧ-энергии к различным частям установки. Таким образом, при организации безопасности труда, необходимо учитывать воздействие электромагнитных полей сверхвысоких частот на организм человека.

Эффект воздействия СВЧ электромагнитного поля на биологические объекты в известной степени определяется количеством проникающей в них и поглощаемой ими электромагнитной энергии. Значительная часть энергии микроволн поглощается тканями организма и превращается в тепло, что объясняют возникновением колебания ионов и дипольных молекул воды, содержащихся в тканях. Наиболее эффективное поглощение микроволн отмечается в тканях с большим содержанием воды: кровь, тканевая жидкость, слизистая желудка, кишок, хрусталик глаза и др. Нагрев тканей в СВЧ-поле является наиболее простым и очевидным эффектом действия микроволн на организм человека. Положение максимума температуры, его удаление от поверхности тела зависит от проводимости среды, а, следовательно, и от частоты радиоволны, действующей на ткань: с увеличением частоты (укорочением волны) максимум температуры приближается к поверхности.

Длительное и систематическое воздействие на организм СВЧ-излучения вызывает повышенную утомляемость, периодически появляющуюся головную боль, сонливость или нарушение сна, повышение артериального давления и боли в области сердца. Под воздействием электромагнитных полей сверхвысоких частот наблюдаются изменения в крови, увеличение щитовидной железы, катаракта глаз, а у отдельных лиц — изменения в психической сфере (неустойчивые настроения, ипохондрические реакции) и трофические явления (выпадение волос, ломкость ногтей).

Предельно допустимые уровни облучения (по *ОСТ 54 30013-83*):

Уровень плотности потока энергии (ППЭ) на рабочих местах и местах возможного нахождения лиц, профессионально связанных с обслуживанием источников СВЧ излучения при прерывистом и непрерывном облучении, не должен превышать 1000 мкВт/см^2 .

Предельно допустимые значения энергетической нагрузки на организм СВЧ облучения в течение рабочего дня составляют:

- при непрерывном облучении $200 \text{ мкВт} \cdot \text{ч/см}^2$
- при прерывистом облучении $2000 \text{ мкВт} \cdot \text{ч/см}^2$

Защита человека от опасного воздействия электромагнитного излучения осуществляется следующими способами:

- уменьшение излучения от источника;
- экранирование источника излучения и рабочего места;
- установление санитарно-защитной зоны;
- поглощение или уменьшение образования зарядов статического электричества;
- устранение зарядов статического электричества;
- применение средств индивидуальной защиты.

Экранирование источника излучения и рабочего места осуществляется специальными экранами по ГОСТ 12.4.154.

К средствам индивидуальной защиты (СИЗ) от статического электричества и электрических полей промышленной частоты относят защитные халаты, комбинезоны, очки, спецобувь, заземляющие браслеты.

10.6. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды

10.6.1 Факторы электрической природы

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

Электроустановки классифицируют по напряжению: с номинальным напряжением до 1000 В (помещения без повышенной опасности), до 1000 В с

присутствием агрессивной среды (помещения с повышенной опасностью) и свыше 1000 В (помещения особо опасные).

В отношении опасности поражения людей электрическим током различают:

1. Помещения без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность.
2. Помещения с повышенной опасностью, которые характеризуются наличием в них одного из следующих условий, создающих повышенную опасность: сырость, токопроводящая пыль, токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т.п.), высокая температура, возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям, технологическим аппаратам, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования - с другой.
3. Особо опасные помещения, которые характеризуются наличием одного из следующих условий, создающих особую опасность: особой сырости, химически активной или органической среды, одновременно двух или более условий повышенной опасности. Территории размещения наружных электроустановок в отношении опасности поражения людей электрическим током приравниваются к особо опасным помещениям.

Лаборатория относится к помещению с особой опасностью поражения электрическим током. В помещении применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены. Недоступность токоведущих частей достигается путем их надежной изоляции, применения защитных ограждений (кожухов, крышек, сеток и т.д.), расположения токоведущих частей на недоступной высоте.

Основными электрозащитными средствами в электроустановках напряжением выше 1000 В являются изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, указатели напряжения, а также изолирующие

устройства и приспособления для ремонтных работ (площадки, изолирующие звенья телескопических вышек и пр.).

Работать со штангой разрешается только специально обученному персоналу в присутствии лица, контролирующего действия работающего. При операциях с изолирующей штангой необходимо пользоваться дополнительными изолирующими защитными средствами — диэлектрическими перчатками и изолирующими основаниями (подставками, ковриками) или диэлектрическими ботами.

Изолирующие клещи применяют в электроустановках до 35 кВ для операций под напряжением с плавкими вставками трубчатых предохранителей, а также для надевания и снятия изолирующих колпаков на ножи однополюсных разъединителей.

При пользовании изолирующими клещами оператор должен надевать диэлектрические перчатки и быть изолированным от пола или грунта; при смене патронов трубчатых предохранителей он должен быть в очках. Клещи нужно держать в вытянутых руках.

Дополнительные электрозащитные средства в электроустановках. К дополнительным изолирующим электрозащитным средствам относятся диэлектрические перчатки, боты, резиновые коврики и дорожки, изолирующие подставки на фарфоровых изоляторах и переносные заземления.

Освобождение пострадавшего от действия тока напряжением свыше 1000 В может быть произведено только одним способом. Это отключение соответствующей части электрической установки специально обученными людьми. Пострадавшему следует оказать посильную доврачебную помощь.

10.7 Факторы пожарной и взрывной природы

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1 - В4, Г и Д, а здания - на категории А, Б, В, Г и Д. По

пожарной опасности наружные установки подразделяются на категории $A_{н}$, $B_{н}$, $B_{н}$, $\Gamma_{н}$ и $D_{н}$.

Согласно НПБ 105-03 лаборатория относится к категории Γ - негорючие вещества и материалы в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, процесс обработки которых сопровождается выделением лучистого тепла, искр и пламени; горючие газы, жидкости и твердые вещества, которые сжигаются или утилизируются в качестве топлива

По степени огнестойкости данное помещение относится к 1-й степени огнестойкости по СНиП 2.01.02-85 (выполнено из кирпича, которое относится к трудно сгораемым материалам). Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера.

Причины возникновения пожара неэлектрического характера:

а) халатное неосторожное обращение с огнем (курение, оставленные без присмотра нагревательные приборы, использование открытого огня);

б) утечка метана (при концентрации в воздухе от 4,4 % до 17 % метан взрывоопасен).

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, искрение и электрические дуги, статическое электричество и т. п.

Для устранения причин возникновения пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия:

а) использование только исправного оборудования;

б) проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;

в) назначение ответственного за пожарную безопасность помещений;

г) издание приказов по вопросам усиления пожарной безопасности

д) отключение электрооборудования, освещения и электропитания по окончании работ;

е) курение в строго отведенном месте;

ж) содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды.

Воздушно-пенные огнетушители очагов пожара, без наличия электроэнергии. Углекислотные и порошковые огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В. Кроме того, порошковые применяют для тушения документов.

Для тушения токоведущих частей и электроустановок применяется переносной порошковый закачной огнетушитель ОП-3. Тушение электроустановок нужно производить на расстоянии не менее 1 метра (имеется в виду расстояние от сопла огнетушителя до токоведущих частей). Зарядку порошковых огнетушителей следует производить один раз в пять лет. При возникновении необходимости ремонта или зарядки, следует обращаться в специализированные фирмы.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений на высоте не более 1,35 м. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей.

Здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, порошковых огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к запасному (эвакуационному) выходу (рисунок 2).

План эвакуации из лаборатории

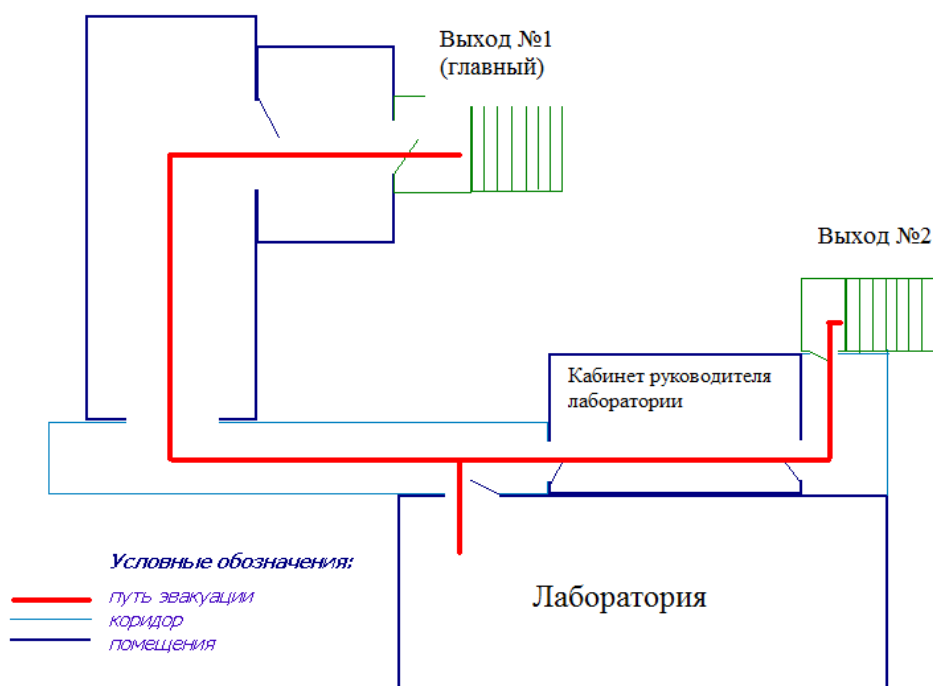


Рис. 10.2. Пути эвакуации.

10.8. Охрана окружающей среды

Охрана окружающей среды - это комплексная проблема и наиболее активная форма её решения - это сокращение вредных выбросов промышленных предприятий через полный переход к безотходным или малоотходным технологиям производства.

Так же необходимо позаботиться о отдельных контейнерах для отходов бытового характера: отдельные мусорные баки для бумаги, стекла, металлических частей, пластика. Необходимо заключить договор с компанией, вывозящей мусор, чтобы она обеспечивала доставку разделенных отходов фирмам, занимающимся переработкой отходов.

10.9. Защита в ЧС

Производство находится в городе Томске с континентально-циклоническим климатом. Природные явления (землетрясения, наводнения, засухи, ураганы и т. д.), в данном городе отсутствуют.

Возможными ЧС на объекте в данном случае, могут быть сильные морозы и диверсия.

Для Сибири в зимнее время года характерны морозы. Достижение критически низких температур приведет к авариям систем теплоснабжения и жизнеобеспечения, приостановке работы, обморожениям и даже жертвам среди населения. В случае переморозки труб должны быть предусмотрены запасные обогреватели. Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась. Масляные обогреватели нагреваются до температуры 110-150 градусов, поэтому довольно быстро способны отопить помещение. Некоторые модели масляных радиаторов наделены вентилятором, с помощью которого теплый воздух быстрее распространяется по всему помещению. Масляный обогреватель с термостатом, можно вообще не выключать. Обогреватель будет самостоятельно отключаться, когда температура поднимется до заданной. То есть на время отсутствия сотрудников можно выставить на термостате температуру 10-15 градусов, и не бояться, что они замерзнут, придя на работу. Главное учитывать, чтобы суммарная мощность обогревателей была меньше электрической мощности источника их питания. А также желательно наличие дополнительного автоматического выключателя в распределительном щите для защиты от перегрузок.

Чрезвычайные ситуации, возникающие в результате диверсий, возникают все чаще.

Профилактические мероприятия, исключающие проникновение посторонних лиц на территорию нашего предприятия включает следующие мероприятия:

- Наличие охраны в здании и пропускной системы.
- Наличие видеокамер и дистанционного наблюдения за территорией предприятия.
- Электро- и механические замки на эвакуационные выходы и оконные проемы.

10.10. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

1. ОСТ 54 30013-83 Электромагнитные излучения СВЧ. Предельно допустимые уровни облучения. Требования безопасности
2. ГОСТ 12.4.154-85 “ССБТ. Устройства экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты”
3. ГН 2.2.5.1313-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны
4. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 "Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ)".
5. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
6. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
7. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.
8. ГОСТ 12.4.123-83. Средства коллективной защиты от инфракрасных излучений. Общие технические требования.
9. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
10. ГОСТ 12.1.030-81. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.
11. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.
ГОСТ 12.2.037-78. Техника пожарная. Требования безопасности
12. СанПиН 2.1.6.1032-01. Гигиенические требования к качеству атмосферного воздуха
13. ГОСТ 30775-2001 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Классификация, идентификация и кодирование отходов.
14. СНиП 21-01-97. Противопожарные нормы.
15. ГОСТ 12.4.154. Система стандартов безопасности труда. Устройства экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты. Общие технические требования, основные параметры и размеры

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8ЛМ51	Цуй Цзян

Институт кибернетики		Кафедра ТМСПР	
Уровень образования	магистр	Направление/специальность 15.04.01 «Машиностроение»	Расчет на прочность торцевой фрезы методом конечных элементов

Тема дипломной работы: Расчет на прочность торцевой фрезы методом конечных элементов.

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

2. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	1. <i>Источник финансирования: Каф. ТМСПР ИК</i>
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Предпроектный анализ
2. Инициация проекта
3. Планирование управления научно-техническим проектом
4. Расчет бюджета проекта
5. План проекта
6. Бюджет научного исследования
7. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Перечень графического материала:

1. «Портрет» потребителя результатов НИИ
2. Календарный план проведения НИИ
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицын Владислав Владимирович	Кандидат экономических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЛМ51	Цуй Цзян		

11. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

11.1. Введение

При исследованиях напряжённого состояния в режущей части зуба фрезы, с помощью метода конечных элементов, мы можем моделировать процесс резания и в любой момент наблюдать распространения тепла, диффузии, распределения электрического поля, распределения напряжений внешних и внутренних. По сравнению с традиционными методами не представляет труда рассмотрение граничных условий с разрывной поверхностной нагрузкой, а также смешанных граничных условий с помощью МКЭ.

Необходимо понимать, что при исследовании прочности фрезы МКЭ не только обратить внимание на его преимущества по сравнению с другими методами, тоже нужно рассчитать затраты на проведение исследования и разработки, какой будет бюджет научного проекта, сколько времени потребуется для выхода на рынок и т.д.

Таким образом, целью данного раздела является определение перспективности и успешность текущего проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации при исследовании прочности фрезы методом конечных элементов.

Достижение цели должно обеспечиваться решением задач:

- Выполнение предпроектного анализа;
- Инициация проекта;
- Планирование управления научно-техническим проектом;
- Расчет бюджета проекта;
- Определение эффективности проекта.

11.2. Предпроектный анализ

11.2.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо

рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевой рынок исследования прочности фрезы методом конечных элементов применяются для анализа внутренних напряжений в режущих инструментах.

Это исследование может применяться на множестве операций, таких как:

1. Выбор материала режущих инструментов;
2. Выбор геометрических параметров режущих инструментов;
3. Выбор способа крепления режущих инструментов;
4. Выбор подачи, глубины и скорости резания(режим резания);
5. Выбор число зубьев фрезы на НДС режущего клина;

Таблица 11.1. – Карта сегментирования рынка услуг по области применения исследования прочности фрезы методом конечных элементов

		Область применения исследования прочности фрезы методом конечных элементов				
		Материалы	Геометрические параметры	Способы крепления	Режим резания	Число зубьев
потребителей	Размер					
	Крупные	А	А	А	А	А
	Средние	В	А	С	А	С
	Мелкие	С	В	С	В	С

Где: А - расчёт по ANSYS; В - расчёт по ABAQUS; С - расчёт по Solidworks.

В приведённом примере карты сегментирования показано, какие ниши на рынке услуг по области применения исследования прочности фрезы МКЭ заняты конкурентами или где уровень конкуренции высок.

11.2.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i , \quad (11.1)$$

Где: K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

V_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i-го показателя.

Таблица.11.2. – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	баллы			Конкурентоспособность		
		B_A	B_B	B_C	K_A	K_B	K_C
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1.Повышение производительности труда пользователя	0,03	4	4	3	0,21	0,28	0,21
2. Удобство в эксплуатации	0,03	4	3	3	0,12	0,09	0,09
3. Помехоустойчивость	0,06	3	3	3	0,15	0,15	0,15
4.Энергоэкономичность	0,07	4	4	4	0,28	0,28	0,28
5. Надежность	0,06	5	4	4	0,20	0,25	0,20
6. Уровень шума	0,05	5	4	4	0,24	0,30	0,24
7. Безопасность	0,04	4	3	3	0,20	0,15	0,15
8. Потребность в ресурсах памяти	0,05	3	4	4	0,12	0,16	0,16
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,03	5	3	3	0,12	0,20	0,12
10. Простота эксплуатации	0,06	4	3	3	0,15	0,20	0,15

11. Качество интеллектуального интерфейса	0,04	3	3	2	0,12	0,12	0,08
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,03	3	3	3	0,00	0,00	0,00
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,06	5	3	4	0,21	0,35	0,28
2. Уровень проникновения на рынок	0,05	4	4	4	0,20	0,25	0,25
3. Цена	0,07	5	4	4	0,35	0,28	0,28
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,08	4	3	3	0,24	0,40	0,32
5. Послепродажное обслуживание	0,04	5	5	5	0,16	0,20	0,20
6. Финансирование научной разработки	0,03	3	3	3	0,09	0,09	0,09
7. Срок выхода на рынок	0,07	5	5	4	0,24	0,30	0,24
8. Наличие сертификации разработки	0,05	5	4	4	0,20	0,20	0,20
Итого	1	83	72	70	4,22	3,65	3,57

Где: А - расчёт по ANSYS; В - расчёт по ABAQUS; С - расчёт по Solidworks.

Значение К позволяет говорить о перспективах разработки и качестве проведенного исследования. Если значение показателя К получилось от 4.5 до 5.0, то такая разработка считается перспективной. Если от 4.0 до 4.5 – то перспективность выше среднего. Если от 3.5 до 4.0 – то перспективность средняя. Если от 3.0 до 3.5 – то перспективность ниже среднего. Если 3.0 и ниже – то перспективность крайне низкая.

Таким образом, расчёт по ANSYS считается перспективным.

11.2.3. Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка

полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Перечень вопросов приведен в табл. 3.

При оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i \quad (11.2)$$

Где: $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению;

B_i – балл по i -му показателю.

Таблица.11.3. – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	4	4
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	5	3
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	5	5
4	Определена товарная форма научно-	5	5

	технического задела для представления на рынок		
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	4
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	5	3
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	4	4
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	4	4
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	4	5
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	4
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	5	5
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	5	3
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	4	3
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	3	4
15	Проработан механизм реализации научного проекта	4	5
	ИТОГО БАЛЛОВ	65	61

Значение $B_{\text{сум}}$ позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. По таблице, можно делать такой вывод, степень проработанности научного проекта и уровень имеющихся знаний у разработчика считаются перспективной, а знания разработчика достаточными для успешной ее коммерциализации.

11.3. Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего.

В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта.

Устав проекта документирует бизнес-потребности, текущее понимание потребностей заказчика проекта, а также новый продукт, услугу или результат, который планируется создать.

Устав научного проекта магистерской работы должен иметь следующую структуру:

11.3.1. Цели и результат проекта

В данном разделе необходимо привести информацию о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта. Это могут быть заказчики, спонсоры, общественность и т.п. Информацию по заинтересованным сторонам проекта представить в табл. 4.

Таблица .11.4. – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Козлов В.Н. (Руководитель)	Получение факторов, которые сильно влияют на прочность инструмента
Цуй Цзян (Инженер)	Получение рисунков распределения внутренних напряжений

В табл.11.5. необходимо представить информацию о иерархии целей проекта и критериях достижения целей. Цели проекта должны включать цели в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Таблица .11.5 .– Цели и результат проекта

Цели проекта:	Исследование прочности фрезы методом конечных элементов по ANSYS
Ожидаемые результаты проекта:	Получение распределения внутренних напряжений фрезы при разном режиме фрезерования
Критерии приемки результата проекта:	Распределения внутренних напряжений фрезы должны совпадать с результатов реальных экспериментов
Требования к результату проекта:	Требование:
	Создание 3Д-модели прорезных фрез с разных параметров
	Получение распределения контактных нагрузок на поверхности инструмента
	Выполнение моделирования фрезерования
	Получение распределения внутренних напряжений фрез
	Получение выводов по теме

11.3.2. Организационная структура проекта

На данном этапе работы необходимо решить следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эту информацию представить в табличной форме (табл. 11.6.).

Таблица.11. 6. – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
1	Цуй Цзян Магистрант кафедры ТМСР ИК ТПУ	Инженер	Выполнить моделирование резания, получить рисунки распределения внутренних напряжений	1296
2	Козлов В.Н. Доцент кафедры ТМСР ИК ТПУ	Научный руководитель	Руководить исследование, анализировать результат моделирования	312
ИТОГО:				1608

11.3.3. Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а так же «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта.

Таблица .11.7. – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	300000руб
3.1.1. Источник финансирования	ТМСПр. ИК
3.2. Сроки проекта	
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	10.2015
3.2.2. Дата завершения проекта	05.2017
3.3. Прочие ограничения и допущения	НЕТ

11.4. Планирование управления научно-техническим проектом

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

План управления научным проектом должен включать в себя следующие элементы:

11.4.1. Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта. На рис.1 представлен ИСР по проекту исследования прочности фрезы МКЭ.

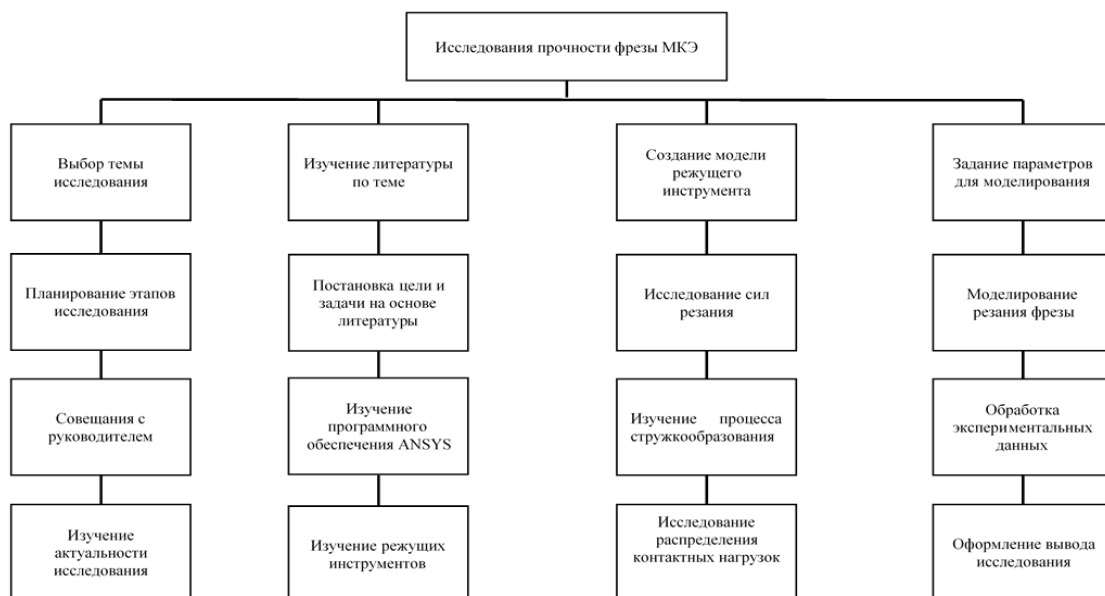


Рисунок .11.1. – ИСР по проекту исследования прочности фрезы МКЭ

11.4.2. Контрольные события проекта

В рамках данного раздела необходимо определить ключевые события проекта, определить их даты и результаты, которые должны быть получены по состоянию на эти даты. Эту информацию необходимо свести в таблицу (табл. 8).

Таблица .11.8. – Контрольные события проекта

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Написание текста об обзоре материала, знакомство с тематикой исследования	24.10.2015	НИРС
2	Найти информацию о материалах	14.03.2016	НИРС
3	Моделирование процесса резания	30.06.2016	Научно-исследованная практика
4	Исследование НДС инструмента при разном характере распределения контактных нагрузок на передней и задней поверхностях инструмента	02.11.2016	НИРС
5	Исследование влияния режимов резания на НДС режущего клина	19.12.2016	НИРС
6	Анализ распределения внутренних напряжений	13.03.2017	НИРС

11.5. План проекта

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный и сетевой графики проекта. Линейный график представляется в виде таблицы (табл. 9).

Таблица .11.9. – Календарный план проекта

Код работы (из ИСР)	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
1	Выбор темы исследования	6	28.09.2015	04.10.2015	Козлов В.Н.
2	Планирование этапов исследования	2	04.10.2015	06.10.2015	Козлов В.Н. Цуй Цзян
3	Совещания с руководителем	2	09.10.2015	11.10.2015	Козлов В.Н. Цуй Цзян
4	Изучение актуальности исследования	7	11.10.2015	18.10.2015	Цуй Цзян
5	Изучение литературы по теме	14	18.10.2015	1.11.2015	Цуй Цзян
6	Постановка цели и задачи на основе литературы	7	1.11.2015	8.11.2015	Козлов В.Н. Цуй Цзян
7	Изучение программного обеспечения ANSYS	21	8.11.2015	29.11.2015	Цуй Цзян
8	Изучение режущих инструментов	10	29.11.2015	9.12.2015	Цуй Цзян
9	Создание модели режущего инструмента	15	6.3.2016	21.3.2016	Цуй Цзян

10	Исследование сил резания	6	21.4.2016	27.4.2016	Цуй Цзян
11	Изучение процесса стружкообразования	27	1.9.2016	28.9.2016	Цуй Цзян
12	Исследование распределения контактных нагрузок	15	15.11.2016	30.11.2016	Козлов В.Н. Цуй Цзян
13	Задание параметров для моделирования	9	20.2.2017	29.2.2017	Цуй Цзян
14	Моделирование резания фрезы	6	4.3.2017	10.3.2017	Цуй Цзян
15	Обработка экспериментальных данных	14	11.3.2017	25.3.2017	Цуй Цзян
16	Оформление вывода исследования	7	5.4.2017	12.4.2017	Козлов В.Н. Цуй Цзян

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится в виде табл. 9 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица .11.10 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

Код работ (из ИСР)	Вид работ	Исполнители	Тк, кал, дн.	Продолжительность выполнения работ																																
				Сент.(2015)			Октя.(2015)			Нояб.(2015)			Дес.(2015)			Март(2016)			Апр.(2016)			Сент.(2016)			Нояб.(2016)			Фев.(2017)			Март(2017)			Апрель(2017)		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2		
1	Выбор темы исследования	Руководитель	6			□																														
2	Планирование этапов исследования	Руководитель, инженер	2			▬																														
3	Совещания с руководителем	Руководитель, инженер	2			▬																														
4	Изучение актуальности исследования	инженер	7				▬																													
5	Изучение литературы по теме	инженер	14				▬																													
6	Постановка цели и задачи на основе литературы	Руководитель, инженер	7						▬																											
7	Изучение программного обеспечения ANSYS	инженер	21							▬																										

11.6. Бюджет научного исследования

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье заносятся в табл. 11.

Таблица .11.11 – Расходные материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Количество	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	150	2уп.	300
Ручка шариковая	5	2 шт.	10
Карандаш	10	1 шт.	10
Оплетка для расчетно- пояснительной записки	40	1 шт.	40
Итого:			360

11.6.1. Основная заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в табл. 9.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$\text{Дневная заплата} = \frac{\text{Месячный оклад}}{21 \text{ дней}}, \quad (11.3)$$

Расчеты затрат на основную заработную плату приведены в таблице 9. При расчете учитывалось, что в году 252 рабочих дня и, следовательно, в месяце 21 рабочих дня. Затраты времени на выполнение работы по каждому исполнителю брались из таблицы 12. Также был принят во внимание коэффициент $K = 1,3$.

Таблица .11.12. – Затраты на основную заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./день	Затраты времени, дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	22052	1050,10	39	1,3	53239,83
И	13824	658,29	162	1,3	138634,97
Итого:					191874,80

Таким образом, затраты на основную заработную плату составили $C_{\text{осн}} = 191874,80$ руб.

11.6.2. Расчет отчислений от заработной платы

Затраты по этой статье составляют отчисления по страховым взносам.

Отчисления по заработной плате определяются по следующей формуле:

$$C_{\text{соц}} = K_{\text{соц}} \cdot C_{\text{осн}}, \quad (11.4)$$

где $K_{\text{соц}}$ – коэффициент, учитывающий размер отчислений из заработной платы. Данный коэффициент составляет 30% от затрат на заработную плату и включает в себя:

1. отчисления в пенсионный фонд;
2. на социальное страхование;
3. на медицинское страхование.

Итак, отчисления из заработной платы составили:

$$C_{\text{соц}} = 0,3 \cdot 191874,80 = 54562,44 \text{ руб}$$

11.6.3. Расчет амортизационных расходов

В статье «Амортизационные отчисления» от используемого оборудования рассчитывается амортизация за время выполнения работы для оборудования, которое имеется в наличии.

Амортизационные отчисления рассчитываются на время использования ЭВМ по формуле:

$$C_{\text{ам}} = \frac{N_A \cdot Ц_{\text{об}}}{F_d} \cdot t_{\text{рф}} \cdot n, \quad (11.5)$$

где N_A – годовая норма амортизации, $N_A = 25\%$;

$C_{\text{об}}$ – цена оборудования, $C_{\text{об}} = 40000$ руб.;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени, $F_{\text{д}} = 2384$ часа;

$t_{\text{рф}}$ – фактическое время работы оборудования при создании программного продукта, $t_{\text{рф}} = 650$ часа;

n – число задействованных ПЭВМ, $n = 1$.

Итак, затраты на амортизационные отчисления составили:

$$C_{\text{ам}} = \frac{0,25 \cdot 40000 \cdot 1 \cdot 650}{2384} = 2726,51 \text{руб.}$$

11.6.4. Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на разработку проекта, которые не учтены в предыдущих статьях. Их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов

$$C_{\text{проч.}} = (C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{ам}}) \cdot 0,1 \quad (11.6)$$

Подставим значения и вычислим:

$$C_{\text{проч.}} = (360 + 191874,80 + 54562,44 + 2726,51) \cdot 0,1 = 24952,38 \text{ руб.}$$

11.6.5. Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет сметы затрат на разработку, можно определить общую стоимость разработки проекта.

Таблица .11.13. – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	360
Основная заработная плата	$C_{\text{осн}}$	191874,80
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	54562,44
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	2726,51
Непосредственно учитываемые расходы	$C_{\text{нр}}$	–
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	24952,38
Итого:		274476,13

Таким образом, расходы на разработку составили $C = 274476,13$ руб.

11.7. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Эффективность научного ресурсосберегающего проекта включает в себя социальную эффективность, экономическую и бюджетную эффективность. Показатели общественной эффективности учитывают социально экономические последствия осуществления инвестиционного проекта как для общества в целом, в том числе непосредственные результаты и затраты проекта, так и затраты и результаты в смежных секторах экономики, экологические, социальные и иные внеэкономические эффекты.

11.7.1. Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурс о эффективности. Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) 56 вариантов исполнения научного исследования (табл. 9). Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносится финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}}, \quad (11.7)$$

где: I_{ϕ}^p - интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i-го варианта исполнения;

Φ_{\max} – максимальная стоимость исполнения научно исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Интегральный показатель ресурс о эффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, \quad I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p, \quad (11.8)$$

Где: I_m – интегральный показатель ресурс о эффективности вариантов;

a_i – весовой коэффициент i -го параметра;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурс о эффективности рекомендуется проводить в форме таблицы, пример которой приведен ниже.

Таблица.11.14. – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,15	4	4	4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,25	5	4	3
3. Помехоустойчивость	0,15	5	3	4
4. Энергосбережение	0,15	5	4	4
5. Надежность	0,2	4	4	3
6. Материалоемкость	0,1	4	4	4
ИТОГО	1	4,55	3,85	3,55

$$I_{\text{ТП}} = 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,30 + 4 \cdot 0,1 = 4,55$$

$$\text{Аналог 1} = 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,30 + 4 \cdot 0,1 = 3,85$$

$$\text{Аналог 2} = 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,30 + 4 \cdot 0,1 = 3,55$$

Интегральный показатель эффективности разработки ($I_{\text{фир}}^p$) и аналога

($I_{финр}^a$) определяется на основании интегрального показателя ресурсо эффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p}, \quad I_{финр}^a = \frac{I_m^a}{I_\phi^a}, \quad (11.9)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта.

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^a}, \quad (11.10)$$

Где, \mathcal{E}_{cp} – сравнительная эффективность проекта;

$I_{финр}^p$ – интегральный показатель разработки;

$I_{финр}^a$ – интегральный технико-экономический показатель аналога.

Таблица .11.15. – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Аналог	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	4	5
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3	4
3	Интегральный показатель эффективности	4	4
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	4	5

Таким образом, исполнение разработки является наиболее функциональным и ресурсоэффективным по сравнению с исполнениями аналога.

Список использованной литературы

1. Кузьмина Е.А., Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений “Методы менеджмента качества” №1 2003г.
2. Кузьмина Е.А., Кузьмин А.М. Функционально-стоимостный анализ. Экскурс в историю. “Методы менеджмента качества” №7 2002г.
3. Основы Функционально-стоимостного анализа : Учебное пособие /Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика. -М.: Энергия, 1980. -175с.