



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа новых производственных технологий

Направление подготовки: 15.04.01 «Машиностроение»

ООП Автоматизация технологических процессов и производств в машиностроении

Отделением машиностроения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование прочности фрез методом конечных элементов при аддитивно-субтрактивной обработке образцов из стали 40X13

УДК 621.914.1-047.37:669.146:517.962

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ11	Шэ Лу		04.06.2023

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМИШНПТ	Козлов Виктор Николаевич	к.т.н., доцент		04.06.2023

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ШБИП	Гасанов Магеррам Али оглы	д.э.н., профессор		04.06.2023

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ШБИП	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н., доцент		04.06.2023

Консультант – лингвист ОИЯ ШБИП по разделу «Раздел ВКР на иностранном языке»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Гутарева Надежда Юрьевна	к.пед.н., доцент		04.06.2023

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМШ	Сорокова Светлана Николаевна	к.ф.-м.н.		04.06.2023

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

Инженерная Школа новых производственных технологий
Направление подготовки 15.04.01 «Машиностроение»
ООП Автоматизация технологических процессов и производств в машиностроении
Отделение машиностроения

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
Сорокова С. Н.
«___» _____ 2023 г.

**ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
4AM11	Шэ Лу

Тема работы:

Исследование прочности фрез методом конечных элементов при аддитивно-субтрактивной обработке образцов из стали 40X13	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 34–75/с от 03.02.2022

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2023
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объектами исследования являются процесс фрезерования образцов из стали 40X13, полученных аддитивной технологией на металлическом 3D принтере, и концевые фрезы из твёрдого сплава ВК8 и из быстрорежущей стали
Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	1. Литературный обзор по теме магистерской диссертации 2. Формулирование цели и задач исследования обработки фрезерованием образцов из стали 40X13, полученных аддитивной технологией на металлическом 3D принтере. 3. Разработка методики выполнения исследований. 4. Проведение экспериментов по измерению, составляющих силы фрезерования при разных режимах фрезерования концевыми фрезами из Р6М5 и ВК8 диаметром 8 и 12 мм. 4. Анализ процесса изменения составляющих сил фрезерования по времени при встречном и попутном фрезеровании 3D-печатных материалов из стали 40X13. 5. Исследование влияния режимов фрезерования и характеристик фрезы на силы фрезерования. 6. Расчёт НДС режущего клина зуба фрезы при фрезеровании

	металлических печатных образцов из стали 40X13. 7. Разработка вопросов финансового менеджмента. 8. Разработка вопросов социальной ответственности
Перечень графического материала	Слайды по литературному обзору, графики изменения сил во времени при попутном и встречном фрезеровании, графики влияния режимов фрезерования на составляющие силы резания, результаты расчёта НДС режущего клина зуба фрезы при разных подачах.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Гасанов Магеррам Алиоглы
Социальная ответственность	Антоневич Ольга Алексеевна
Раздел ВКР на иностранном языке	Гутарева Надежда Юрьевна
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	
Investigation of the strength of cutters by the finite element method during additive-subtractive processing of samples from steel 40X13	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	12.09.2022
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМИШНПТ	Козлов Виктор Николаевич	к.т.н., доцент		12.09.2022

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4AM11	Шэ Лу		12.09.2022

Результаты обучения

Направление 15.04.01 Машиностроение

ООП: Автоматизация технологических процессов и производств в машиностроении

Код компетенции СУОС	Наименование компетенции СУОС
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки результатов исследования
ОПК(У)-2	Способен осуществлять экспертизу технической документации при реализации технологического процесса
ОПК(У)-3	Способен организовывать работу коллективов исполнителей, принимать исполнительские решения в условиях спектра мнений, определять порядок выполнения работ, организовывать в подразделении работы по совершенствованию, модернизации, унификации выпускаемых изделий и их элементов, разработке проектов стандартов и сертификатов, обеспечивать адаптацию современных версий систем управления качеством к конкретным условиям производства на основе международных стандартов
ОПК(У)-4	Способен разрабатывать методические и нормативные документы при реализации разработанных проектов и программ, направленных на создание узлов и деталей машин
ОПК(У)-5	Способен разрабатывать аналитические и численные методы при создании математических моделей машин, приводов, оборудования, систем, технологических процессов
ОПК(У)-6	Способен использовать современные информационно-коммуникационные технологии, глобальные информационные ресурсы в научно-исследовательской деятельности
ОПК(У)-7	Способен проводить маркетинговые исследования и подготавливать бизнес-планы выпуска и реализации перспективных и конкурентоспособных изделий в области машиностроения
ОПК(У)-8	Способен подготавливать отзывы и заключения на проекты стандартов, рационализаторские предложения и изобретения в области машиностроения
ОПК(У)-9	Способен подготавливать научно-технические отчеты, обзоры, публикации по результатам выполненных исследований в области машиностроения
ОПК(У)-10	Способен разрабатывать методы стандартных испытаний по определению физико-механических свойств и технологических показателей используемых

	материалов и готовых изделий
ОПК(У)-11	Способен организовывать и осуществлять профессиональную подготовку по образовательным программам в области машиностроения
ОПК(У)-12	Способен разрабатывать и применять алгоритмы и современные цифровые системы автоматизированного проектирования деталей и узлов машин и оборудования различной сложности на современном машиностроительном предприятии
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен разрабатывать технические задания на НИР и ОКР при исследовании, проектировании и изготовлении машин, приводов, оборудования, систем, нестандартного оборудования и средств технологического оснащения.
ПК(У)-2	Способен проводить научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки при исследовании самостоятельных тем или тем организаций.
ПК(У)-3	Способен подготавливать заявки на изобретения, полезные модели и промышленные образцы с использованием средств и методов патентного поиска.
ПК(У)-4	Способен разрабатывать технологии и управляющие программы изготовления особо сложных деталей на многокоординатных токарно-фрезерных обрабатывающих центрах с ЧПУ и многокоординатных фрезерных обрабатывающих центрах с ЧПУ.
ПК(У)-5	Способен производить технологическую подготовку и обеспечение производства деталей машиностроения средней и высокой сложности
ПК(У)-6	Способен проектировать особо сложные станочные, сборочные и контрольно-измерительные приспособления.
ПК(У)-7	Способен производить автоматизированное проектирование технологических процессов изготовления деталей и сборки сборочных единиц изделий высокой сложности.
ПК(У)-8	Способен производить автоматизацию и механизацию производственных процессов механосборочного производства.
ПК(У)-9	Способен организовать инструментальное обеспечение механосборочной организации.
ПК(У)-10	Способен проектировать и организовывать учебный процесс по образовательным программам с использованием современных образовательных технологий
ПК(У)-11	Способен обеспечить качество изделий высокой сложности в механосборочном производстве.
ПК(У)-12	Способен управлять развитием литейного производства
ПК(У)-13	Способен производить технологическое проектирование механосборочной организации

РЕФЕРАТ

выпускной квалификационной работы студента гр. 4АМ11 Шэ Лу

Исследование прочности фрез методом конечных элементов при аддитивно-субтрактивной обработке образцов из стали 40Х13

Выпускная квалификационная работа выполнена на 172 страницах, содержит: 178 рисунка, 34 таблицы, 15 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: аддитивно-субтрактивная обработка, фрезерование, сталь 40Х13, концевая фреза, контактные напряжения, износ режущего инструмента, напряжённо-деформированное состояние режущего инструмента.

Объектом исследования является прочность концевой фрезы из твёрдого сплава ВК8.

Цель работы – подтверждение квалификации «магистр техники и технологии» по направлению 15.04.01 "Автоматизация технологических процессов и производств в машиностроении".

В процессе исследования выполнен обзор и анализ научно-технической литературы по теме магистерской работы, сформулированы цели и задачи исследования. В работе представлены результаты экспериментального исследования составляющих силы резания и расчёта методом конечных элементов (МКЭ) напряженно-деформированного состояния (НДС) режущего клина зуба при фрезеровании образцов из стали 40Х13.

При проведении экспериментов использовался фрезерный станок с ЧПУ, трехкомпонентный токарный динамометр Kistler, а также программа «ANSYS» для расчета НДС режущего клина зуба концевых фрез МКЭ.

В работе были определены необходимые экономические параметры, такие как производительность обработки, затраты на обработку, затраты на инструмент.

Результаты работы позволят использовать рациональный диаметр фрезы и режимы резани при аддитивно-субтрактивной обработке образцов из стали 40Х13 для повышения экономической эффективности обработки заготовок.

Область применения: производство машиностроительной продукции.

Экономическая значимость работы достаточно высокая.

В будущем планируется участвовать в организации аддитивно-субтрактивной обработки деталей в машиностроительном производстве.

SUMMARY

final qualifying work of the student gr. 4AM11 She Lu

Investigation of the strength of milling cutters by the finite element method during additive-subtractive processing of samples from steel 40X13

The Final Qualifying Work is made on 172 pages, contains: 178 figures, 34 tables, 15 sources, 1 application.

Key words: additive-subtractive machining, milling, steel 40X13, end mill, contact stresses, cutting tool wear, stress-strain condition of the cutting tool.

The object of the study is the strength of the end mill made of cemented carbide BK8.

The purpose of the work is to confirm the qualification of "Master of Engineering and Technology" in the direction 15.04.01 "Automation of technological processes and production in mechanical engineering".

In the course of the study, a review and analysis of scientific and technical literature on the topic of master's work was carried out, the goals and objectives of the study were formulated. The paper presents the results of an experimental study of the components of the cutting force and the stress-strain condition (SSC) by the finite element method (FEM) of the cutting wedge during milling.

During the experiments, a CNC milling machine, a Kistler three-component turning dynamometer, and the ANSYS program for calculating the SSC by the finite element method of the cutting wedge of end mills were used.

The necessary economic parameters were determined in the work, such as processing productivity, processing costs, tool costs.

The results of the work will make it possible to use a rational cutter diameter and cutting modes in the additive-subtractive processing of samples from steel 40X13 to increase the economic efficiency of workpiece processing.

Scope of application: production of engineering products.

The **economic significance** of the work is quite high.

In the future, it is planned to participate in the organization of additive-subactive processing of parts in machine-building production.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	10
1 Цель и задачи исследования.....	12
2 Литературный обзор	13
2.1 Конструкции и геометрические параметры концевых фрез и СМП.....	13
2.2 Измерение составляющих силы резания при фрезеровании.....	18
2.3 Построение эпюр контактных напряжений при обработке стали	21
2.4 Результаты исследования НДС простого режущего клина и СМП.....	25
2.5 Влияние аддитивной технологии на образец стали 40Х13	27
3 Методика выполнения работы	28
3.1 Закрепление образца на фрезерном станке	28
3.2 Измерение сил при фрезеровании	30
4 Исследовательская часть ВКР	33
4.1 Исследование использования острых фрез в концевом фрезеровании	33
4.2 Исследование использования изношенных фрез в концевом фрезеровании.....	35
4.3 Определение физических составляющих силы резания на передней поверхности	39
4.4 Построение эпюр контактных напряжений на передней поверхности	44
4.5 Исследование НДС острой фрезы	57
4.6 Исследование влияния подачи на НДС изношенной фрезы при наибольших нагрузках	72
Заключение	95
Список литературы	98
5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	102
Введение	102
5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурс эффективности и ресурсосбережения.....	103
5.2 Планирование научно-исследовательских работ	109

5.3	Бюджет научно-технического исследования	115
5.4	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.	124
5.5	Выводы по разделу	127
6	ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»..	129
	Введение	132
6.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ..	133
6.2	Производственная безопасность.....	137
6.3	Экологическая безопасность.....	148
6.4	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	150
6.5	Выводы по разделу	153
7	Приложение А – Раздел на иностранном языке.....	154
	Introduction.....	155
7.1	Literary Review	155
	Conclusion	172
	References.....	172

Введение

Аддитивная технология (АТ) получения деталей получает всё большее распространение в связи с совершенствованием технологии и оборудования для синтеза объектов, повышением качества исходных материалов для 3D принтеров, снижением стоимости оборудования средней ценовой категории. С помощью АТ можно получить детали очень сложной конструкции при существенном уменьшении материалоемкости и трудоёмкости, по сравнению с традиционными технологиями изготовления из проката или даже с использованием штамповки с последующей механической обработкой.

Однако часто качество поверхности исходной заготовки после АТ на металлических принтерах средней ценовой категории вынуждает выполнять последующую механическую обработку (субтрактивную обработку, связанную с удалением материала), и чаще всего при этом используется фрезерование концевыми фрезами. Напечатанные на металлическом принтере изделия часто имеют высокую прочность, превосходящую даже штампованные заготовки, но при этом высокая твёрдость, получающаяся при закалке в процессе нагрева и быстрого охлаждения в процессе формирования объекта, приводит к повышенному износу режущего инструмента, что ещё больше увеличивает силы резания. Это, в свою очередь, уменьшает точность обработки и увеличивает вероятность появления вибрации, ухудшает качество обработанной поверхности.

Малая жёсткость системы станок-приспособление-инструмент-деталь (СПИД) определяется в основном самым нежёстким её элементом – концевой фрезой, которая для обеспечения хорошего доступа к обрабатываемым поверхностям часто имеет небольшой диаметр – от 8 до 12 мм, хотя предпочтительнее использовать диаметром 16 мм, но это увеличивает затраты на инструмент, т.к. для субтрактивной обработки изделий из жаропрочных и коррозионно-стойких сталей и сплавов после АТ необходимо использовать твёрдосплавные фрезы, имеющие высокую стоимость.

В представленной работе приведены исследования процессов встречного

и попутного фрезерования как острыми, так и изношенными концевыми фрезами диаметром 8 и 12 мм 3D-напечатанных образцов из жаропрочной коррозионно-стойкой стали 40X13, исследовано влияние режимов фрезерования (подачи, глубины и ширины фрезерования, частоты вращения фрезы) и характеристик фрезы (диаметра фрезы, инструментального материала и количества зубьев) на силы фрезерования.

На основании измеренных динамометром Kistler составляющих сил резания построены эпюры контактных напряжений на передней поверхности зуба фрезы и на фаске износа по задней поверхности, рассчитано напряженно-деформированное состояние (НДС) методом конечных элементов (МКЭ) режущей клина зуба фрезы при фрезеровании стали 40X13 после проволоочной аддитивной технологии, даны рекомендации по выбору фрезы и режима фрезерования при обработке 3D-печатных материалов.

1 Цель и задачи исследования

Цель работы: Исследование прочности фрез методом конечных элементов при аддитивно-субстративной обработке образцов из стали 40X13.

Задачи исследования:

1. Экспериментально выполнить исследования изменения сил при попутном и встречном фрезеровании заготовок после электронно-лучевого сплавления (3D-печати) с применением проволоки марки 420 (аналог жаропрочной коррозионно-стойкой стали 40X13) диаметром 1,2 мм на примере жаропрочной стали 40X13 острыми и изношенными концевыми фрезами из быстрорежущей стали и из твёрдого сплава.

2. Определить влияние подачи, глубины и ширины фрезерования, частоты вращения фрезы, переднего угла, инструментального материала, количества зубьев и угла наклона винтовой канавки фрезы на силы при фрезеровании заготовок после 3D-печати на примере жаропрочной стали 40X13.

3. Исследовать НДС острой и изношенной фрезы при фрезеровании 3D-печатных материалов на примере жаропрочной стали 40X13.

4. Дать рекомендации по фрезерованию образцов из стали 40X13 и других труднообрабатываемых материалов, созданных по аддитивной технологии.

Научная новизна выполненных исследований:

1. Выявлен характер изменения составляющих сил при встречном и попутном фрезеровании 3D-печатных материалов на примере жаропрочной стали 40X13 острыми и изношенными фрезами.

2. Выявлено влияние режимов фрезерования и характеристик фрезы на составляющие силы при фрезеровании 3D-печатных материалов на примере жаропрочной стали 40X13.

3. Выявлено влияние подачи, частоты вращения и различных материалов на НДС режущего клина зуба фрезы при фрезеровании заготовок после электронно-лучевого сплавления (3D-печати) с применением проволоки марки 420 (аналог жаропрочной коррозионно-стойкой стали 40X13) диаметром 1,2 мм.

2 Литературный обзор

2.1 Конструкции и геометрические параметры концевых фрез и СМП

● **Концевая фреза**— это инструмент, который используется для обработки концов деталей в производственном процессе. Концевые фрезы существуют во многих различных конструкциях и с различными геометрическими параметрами, которые определяют их функциональные возможности и характеристики.

Конструкция концевой фрезы (Рис.2.1.1) включает в себя:

1. Рабочую часть — это часть фрезы, которая имеет рабочие зубья и служит для резания материала.

2. Хвостовик концевой фрезы— это часть фрезы, которая вставляется цангу цангового патрона или в шпиндель станка и обеспечивает крепление фрезы. Он может быть цилиндрическим (при диаметре фрезы менее 16-20 мм) и поэтому требуется цанга точно такого диаметра, и коническим (при диаметре фрезы более 12 мм). Конический хвостовик при небольшом диаметре фрезы имеет как правило метрический конус 1:20. У фрез с коническим хвостовиком на торце, входящим в конус переходной втулки или в шпиндель фрезерного станка, обязательно должно быть резьбовое отверстие, с помощью которого фреза затягивается в коническое отверстие шпинделя с помощью длинной шпильки (штревеля, тяги).

3. Радиус при вершине — это радиус, который образуется в зоне соединения главной режущей кромки (на цилиндрической поверхности) и вспомогательной режущей кромки (на торце фрезы).

4. Наклонные углы — это углы, образованные между рабочей поверхностью зубьев и плоскостью, проходящей через посадочную ось хвостовика.

Одним из наиболее важных параметров концевых фрез является их форма зубьев. Например, концевые фрезы могут иметь прямые зубья, винтовые зубья или комбинированные зубья. В зависимости от формы зубьев концевые фрезы могут использоваться для различных типов обработки поверхности, таких как резка, контурная обработка, высверливание, расточка и т. д.

Кроме того, есть и другие **геометрические параметры**, которые могут

использоваться при описании концевых фрез. Эти параметры включают в себя диаметр, окружной шаг между зубьями, угол наклона винтовых канавок (угол подъёма), число (количество) зубьев, длину режущей части.

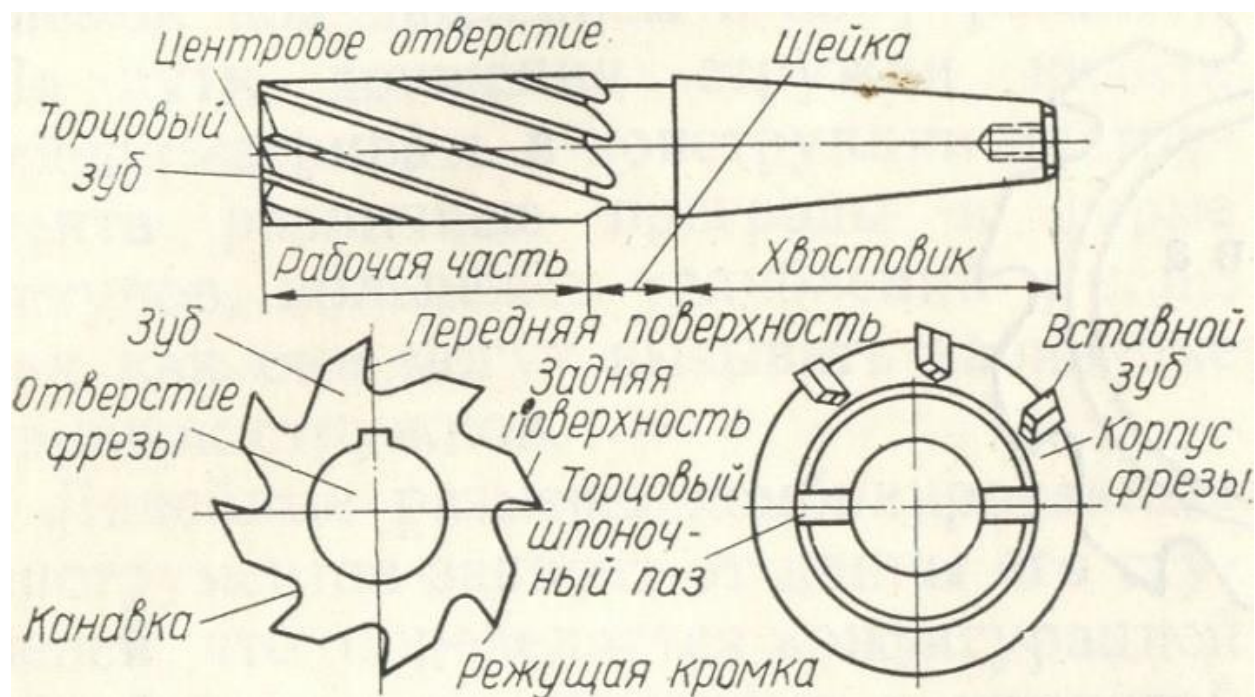


Рис. 2.1.1. Конструкция концевой фрезы с коническим хвостовиком (вверху) и насадная фреза (внизу)

Диаметр фрезы — это расстояние между двумя противоположными точками на ее диаметре. Шаг — это расстояние между двумя зубьями на фрезе. Количество зубьев — это число режущих зубьев на фрезе. Ширина входа в срез — это ширина, на которую фреза проникает в материал в процессе обработки. Угол среза — это угол между режущей кромкой фрезы и материалом, который она обрабатывает. Длина среза — это длина пути материала, который был удален в процессе обработки.

Длина контакта режущей кромки с заготовкой зависит от ширины фрезерования B (высота h фрезеруемого уступа) и угла подъёма винтовых

канавок (угла наклона винтовых стружечных канавок) ω относительно оси фрезы.

Одним из важных геометрических параметров концевых фрез является угол наклона зубьев, который может варьироваться в зависимости от материала, который обрабатывается, и желаемого типа поверхностной обработки. Также важными параметрами являются диаметр фрезы, число зубьев, шаг зубьев и радиус вершины зуба фрезы (радиус при вершине r).

Чтобы правильно выбрать концевую фрезу, необходимо учитывать множество факторов, и прежде всего, марку материала, который будет обрабатываться, его твёрдость, состояние поверхности заготовки, вид обработки (черновая или получистовая, обработка паза, уступа или плоскости), размеры обрабатываемой поверхности и всей заготовки, мощность станка, планируемый объем производства и точность, которую требуется достичь. Тщательное изучение геометрических параметров и конструкции фрезы может помочь пользователям принять более правильное решение при выборе фрезы, которая наиболее соответствует их потребностям.

В зависимости от вида обработки (назначения) концевые фрезы имеют разную конструкцию. Виды обработки, выполняемые концевыми фрезами: фрезерование шпоночных пазов и канавок, уступов, выпуклых радиусных и фасочных поверхностей (обработка фасок), вогнутых радиусных; обработка наклонных поверхностей с поворотом шпиндельной головки или используя зубья не на цилиндрической, а на конической поверхности; обработка пазов типа «ласточкин хвост», обработка Т-образных пазов, фрезерование карманов (обработка плоских поверхностей, не имеющих открытый выход на боковые поверхности детали).

У концевых фрез диаметром до 20 мм жёсткость в радиальном направлении небольшая, поэтому стараются использовать фрезы с ограниченной длиной вылета относительно торца цанги или шпинделя.

● **СМП (сменные многогранные пластины)**— это инструмент, который используется для фрезерной обработки материалов. Они могут иметь различные конструкции и геометрические параметры, которые зависят от конкретного типа их применения.

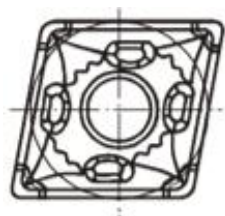


Рис. 2.1.2. СМП с лунками, канавками и уступов на лицевой поверхности

Конструкция СМП в основном включает в себя основной корпус, на котором установлены заменяемые многогранные пластины с режущими кромками. Они могут быть изготовлены из различных материалов, таких как твердосплавные сплавы, керамика или супертвердые материалы.

Конструкция СМП также может включать в себя систему фиксации пластин (гаечные, зажимные и т. д.), которая обеспечивает надежную фиксацию пластин на основном корпусе.

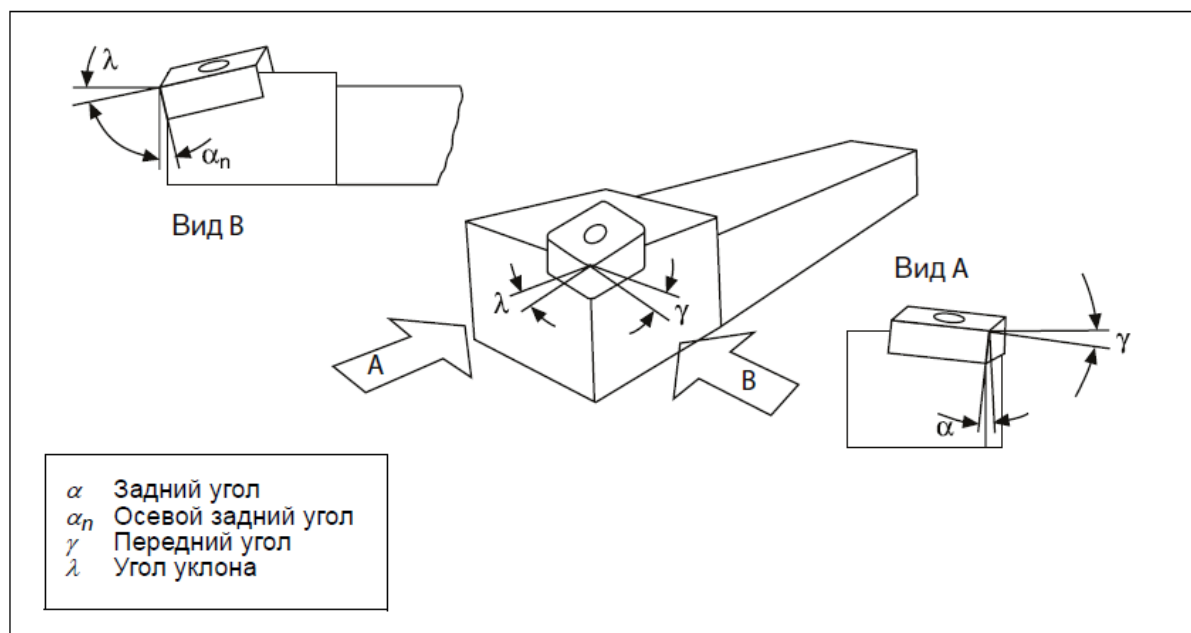


Рис. 2.1.3. Получение отрицательного переднего угла γ и отрицательного угла уклона λ главной режущей кромки

Геометрические параметры СМП включают следующие характеристики:

1. Ширина и длина пластины — это размеры основной пластины, которая крепится к станку.

2. Толщина пластины — это размер пластины, который влияет на ее жесткость и прочность.

3. Форма зажимных пазов — это форма и размеры пазов, в которые вставляются

сменные пластины.

4. Угол наклона режущих кромок — это угол между режущей кромкой и поверхностью обрабатываемой

детали.

5. Угол направления

резания — это угол между кромкой инструмента и направлением резания.

6. Число режущих кромок — это число кромок на сменной пластине.

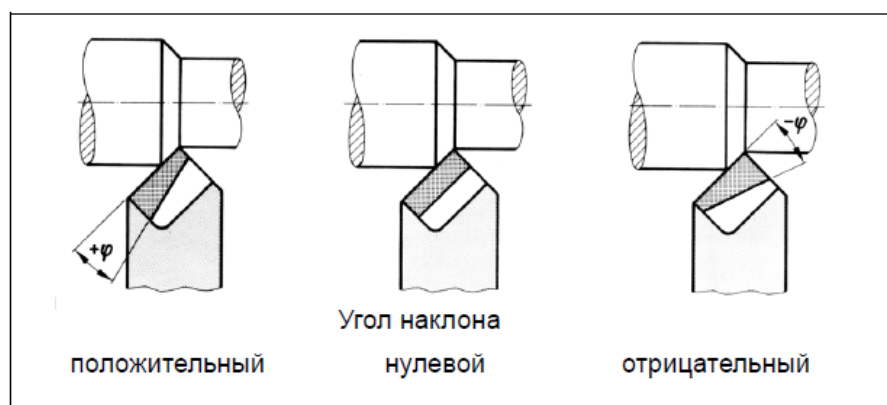


Рис. 2.1.4. Варианты углов наклона стружкоотводных ступенек

Выбирая СМП, следует учитывать несколько факторов, таких как материал, тип, поверхностная обработка, цена, специальное назначение и износостойкость.

2.2 Измерение составляющих силы резания при фрезеровании

Концевое фрезерование является одним из процессов механической обработки, при котором используется фреза для удаления материала с поверхности заготовки. Основными составляющими силы резания при концевом фрезеровании являются сила подачи P_h (P_h), боковая сила (поперечная сила) P_v (P_v), осевая сила P_x (P_x). Эти силы можно измерить динамометром, на котором закрепляется заготовка или образец.

Кроме этого выделяют силы P_z и P_y , действующие на зуб фрезы. Система этих сил поворачивается вместе с поворотом зуба (фрезы) при вращении фрезы, и поэтому в настоящее время очень сложно их непосредственно измерить. Проще всего измерить силу P_x , т.к. она не меняет своего направления.

Тангенциальная сила P_z — это сила, направленная касательно к окружности, по которой движется зуб фрезы. Эта сила направлена в том же направлении, что и вектор скорости резания v . Вектор этого направления перпендикулярен радиусу, соединяющего ось вращения фрезы с точкой на режущей кромки зуба фрезы. Эта сила изменяется по направлению и величине в зависимости от толщины среза a (мм), которая непрерывно изменяется при резании: при попутном фрезеровании толщина среза уменьшается при повороте фрезы относительно её оси вращения, а при встречном фрезеровании она увеличивается от нуля до максимума при выходе зуба из контакта с заготовкой.

Радиальная сила P_y — это сила, направленная в радиальном направлении относительно оси вращения фрезы. Она, как правило, в 2-3 раза меньше тангенциальной P_z , которая участвует в срезании слоя металла, но при износе по задней поверхности она становится существенно больше. Она важна для обеспечения точности обработки.

Сила подачи P_h — это сила, определяющая требуемую прочность механизма подачи. Но мощность станка определяется по силе P_z . Она зависит от величины подачи на зуб, от ширины и глубины фрезерования, от материала заготовки и его прочности, твёрдости и вязкости, геометрических параметров зубьев фрезы.

С помощью динамометра Kistler непрерывно измерялись составляющие P_h , P_v и P_x силы резания.

В программное обеспечение динамометра Kistler заложено, что вертикально направленная сила на мониторе обозначается как F_z , сила в горизонтальной плоскости в направлении к оператору как F_y , сила в горизонтальной плоскости в направлении справа налево как F_x .

С учётом встречного фрезерования стороны заготовки с наибольшей длиной (заготовка установлена поперёк динамометра, направление минутной подачи $s_{мин}$ (мм/мин) слева направо показано на рис. 2) сила F_x на мониторе есть сила P_h , сила F_y на мониторе есть сила P_v , а сила F_z на мониторе есть осевая сила P_x (Рис. 2.2.1).

Результаты измерения направления и величины каждой составляющей силы резания при концевой фрезе показаны на Рис 2.2.2.

Когда зуб фрезы врезается в заготовку своей задней поверхностью и округленной режущей кромкой, он отталкивает ее от оси вращения фрезы. Это создает отрицательную силу P_v , как показано на рисунке 2.2.2 между числами 1 и 2. При дальнейшем вращении зуба фрезы (рисунок 2.2.2 между числами 2 и 3) сила P_v действует в направлении оси ОУ, притягивая заготовку к оси вращения фрезы из-за положительного главного переднего угла γ . Составляющая силы P_h непрерывно увеличивается по мере поворота зуба фрезы, что не противоречит

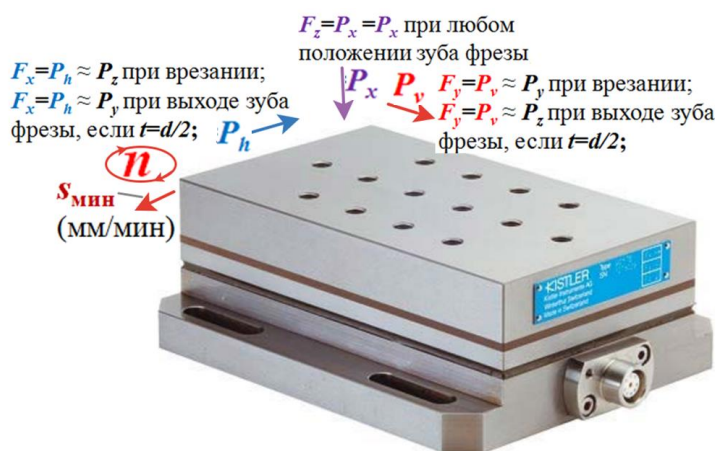


Рис. 2.2.1 Направления измеряемых сил F_x , F_y и F_z , отображаемых на мониторе динамометра Kistler, соответствие их при фрезеровании силам P_h , P_v и P_x и приблизительное соответствие тангенциальной P_z и радиальной P_y силам при врезании и при выходе зуба из контакта, если $t = d_{фр}/2$.

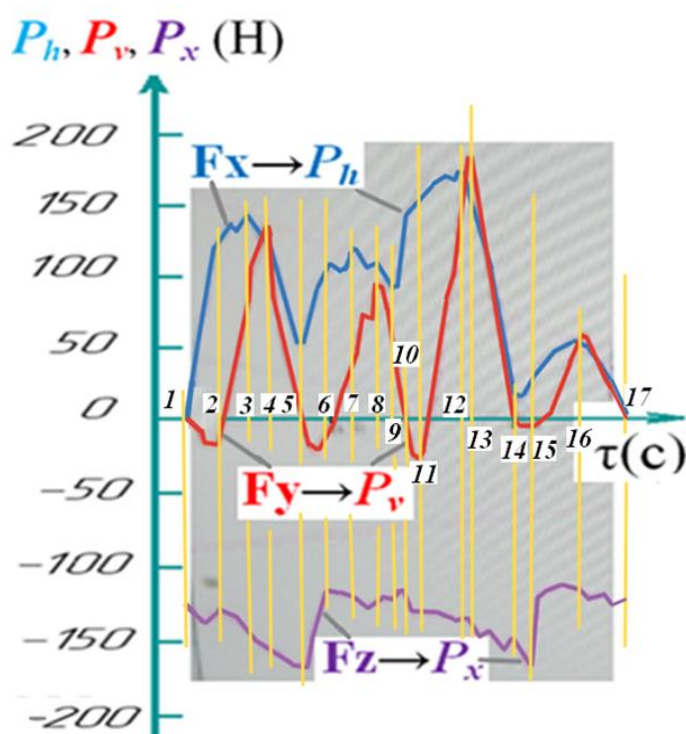


Рис 2.2.2 Графики изменения сил при повороте острой фрезы на один оборот.

взаимодействию зуба фрезы с заготовкой.

Поворот зуба фрезы на угол ψ вызывает не только увеличение толщины среза a , но и изменение направления составляющих P_z и P_y силы резания. При увеличении толщины среза сила P_z увеличивается более интенсивно, чем P_y , которая отвечает за срез стружки. По мере поворота зуба фрезы, составляющая P_v увеличивается, а составляющая P_h начинает уменьшаться между числами 3 и 4 на рисунке 5.

Дальнейший поворот фрезы приводит к уменьшению толщины среза и уменьшению составляющих P_z , P_y , P_h и P_v между числами 4 и 5 на рисунке 2.2.2. Также отрицательное значение осевой силы P_x , которая свидетельствует о стремлении фрезы поднять заготовку из-за положительного угла наклона зубьев фрезы $\omega=45^\circ$, не изменяется значительно в течение цикла.

Изменения составляющих P_h и P_v силы резания происходят не только из-за изменения толщины среза a при вращении фрезы, но и из-за изменения направления тангенциальной P_z и радиальной P_y составляющих силы резания. Большая амплитуда изменения боковой составляющей P_v в направлении наименьшей жёсткости концевой фрезы приводит к появлению вибрации, а отрицательное значение этой составляющей усугубляет негативное влияние.

При повороте следующего зуба фрезы цикл изменения составляющих сил повторяется. Важно учитывать изменения этих сил при выборе параметров и инструментов для достижения наилучшего качества при обработке заготовок.

Особенности изменения сил по направлению и величине:

Изменение составляющих P_h и P_v силы резания (силы фрезерования) происходит не только из-за изменения толщины среза a при вращении фрезы, но и из-за изменения направления тангенциальной P_z и радиальной P_y составляющих силы резания;

Большая амплитуда изменения боковой составляющей P_v в направлении наименьшей жёсткости концевой фрезы приводит к появлению вибрации, а её, пусть и небольшое по величине, отрицательное значение (отрицательный знак) усугубляет это негативное влияние.

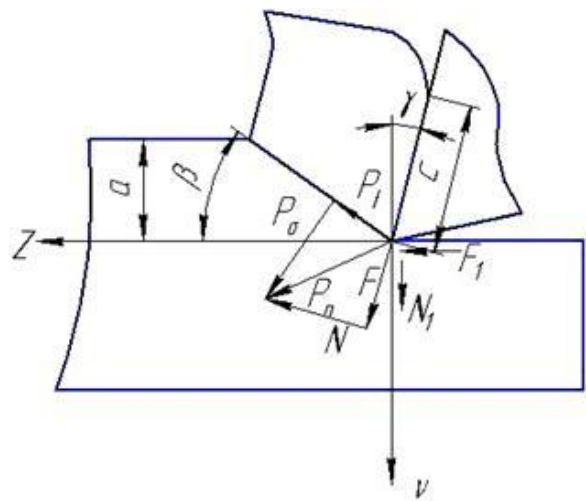
2.3 Построение эпюр контактных напряжений при обработке стали

Для определения физических составляющих силы резания на передней поверхности при обработке стали необходимо провести анализ механических условий резания. Эти условия зависят от режима резания, геометрии режущего инструмента, свойств материала обрабатываемой стали и других факторов.

В общем случае сила резания может быть разложена на несколько составляющих, таких как:

- сила трения между резцом и обрабатываемым материалом
- сила деформации материала в зоне резания
- сила выхода стружки из зоны резания

Физические составляющие силы резания относят к тем поверхностям, на которых они образуются: к передней и задней поверхностям инструмента.



Силы на передней поверхности инструмента уравнивают силы, возникающие в плоскости сдвига в результате деформации металла, переходящего в стружку.

Силы на задней поверхности инструмента являются результатом взаимодействия задней поверхности с заготовкой.

Схема сил в сечении главной секущей плоскостью представлена на Рис 2.3.1.

Здесь F , N – сила трения и сила нормального движения на передней поверхности инструмента;

F_1 , N_1 – сила трения и сила нормального давления на задней поверхности инструмента;

P_τ , P_σ – касательная и нормальная силы в плоскости сдвига

Для выделения сил, действующих на фаске износа по задней поверхности, необходимо провести анализ процесса обработки стали и определить все воздействующие на инструмент силы. В случае, если резание происходит на фрезерном станке, то сила, действующая на фаску, может быть вычислена по следующей формуле:

$$F = K_c * K_d * K_f * K_s * K_r * K_t * K_p * A_p$$

Где:

K_c - коэффициент формы резца;

K_d - коэффициент глубины резания;

K_f - коэффициент режущей силы;

K_s - коэффициент сил трения;

K_r - коэффициент резания;

K_t - коэффициент температуры;

K_p - коэффициент производительности;

A_p - площадь резца.

После определения силы, действующей на фаску износа по задней поверхности, можно построить эпюры контактных напряжений на фаске износа (Рис 2.3.2).

Для этого нужно знать геометрические параметры инструмента, например, радиус фаски, угол подхода и угол ухода. После этого можно использовать формулы нахождения контактных напряжений и построить график зависимости контактных напряжений от расстояния от вершины фаски до ее основания по задней поверхности.

Построение эпюр контактных напряжений на фаске износа по задней поверхности при обработке стали (Рис. 2.3.3) является важным этапом анализа процесса резания, который позволяет определить оптимальные параметры резания и исключить возможность повреждения инструмента.

Для расчёта прочности режущих инструментов необходимо знать распределение контактных напряжений на передней поверхности и на фаске задней поверхности. Наиболее достоверный метод для

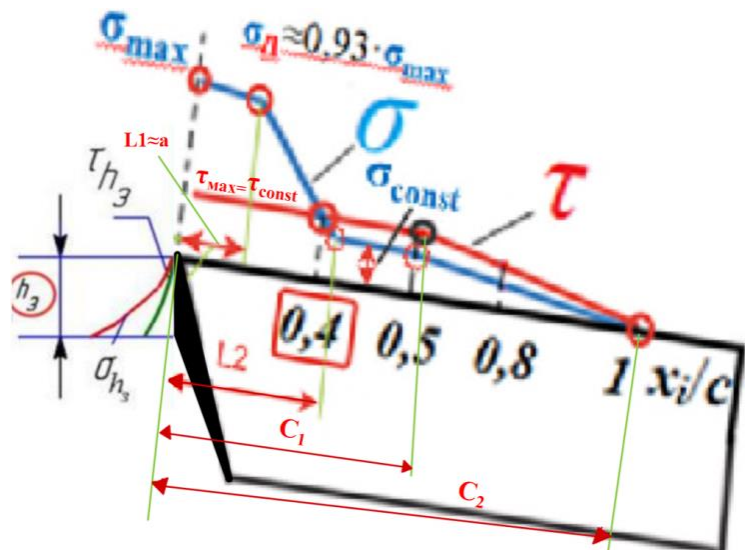


Рис. 2.3.2. Распределение контактных напряжений на поверхностях резца

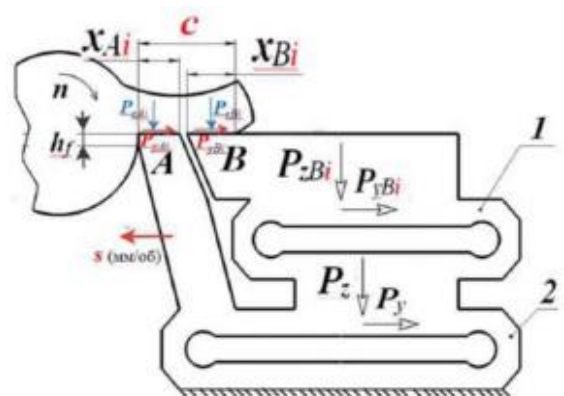


Рис. 2.3.4. Положение пластин А и В разрезного резца, закреплённых на упругих измерительных элементах 1 и 2 специального токарного динамометра конструкции В. А. Красильникова

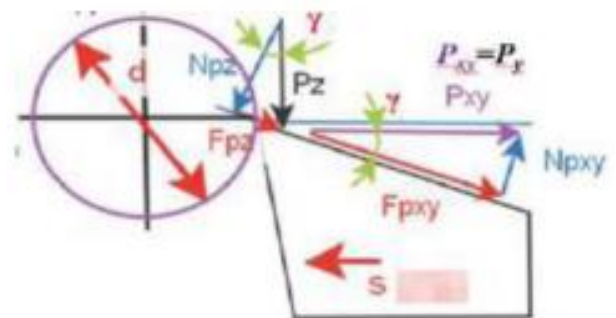


Рис. 2.3.5 Обточка периферии диска шириной b с радиальной подачей s (мм/об).

исследования контактных явлений является метод разрезного (составного) резца (Рис 2.3.4). Наиболее просто выполнять эксперименты при обточке периферии диска шириной b с радиальной подачей s (мм/об) (рис. 2.3.5) динамометра с разрезным резцом (рис. 2.3.6).

Экспериментально были получены гистограммы удельных контактных нагрузок на передней поверхности резца, по которым были построены эпюры контактных напряжений (рис. 2.3.7).

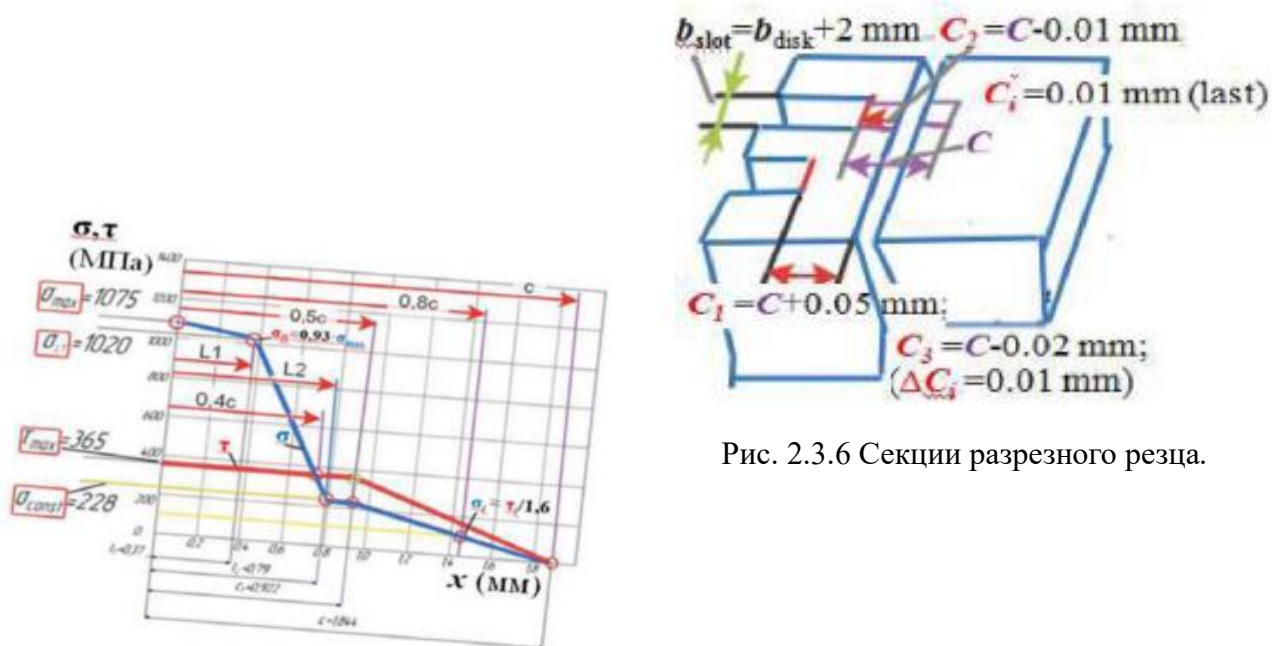


Рис. 2.3.6 Секции разрезного резца.

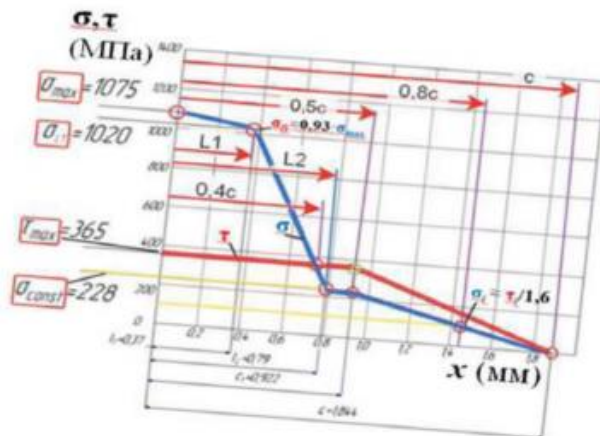


Рис. 2.3.7 Эпюры нормальных σ и касательных τ контактных напряжений (МПа) на передней поверхности резца.

2.4 Результаты исследования НДС простого режущего клина и СМП

Результаты исследования НДС (напряженно-деформированное состояние) простого режущего клина (Рис 2.4.1) и СМП (сменные многогранные пластины) (Рис 2.4.2) при обработке стали острым и изношенным инструментом показали, что при использовании изношенного инструмента может происходить увеличение силы резания, что может привести к ухудшению качества поверхности обрабатываемого изделия.

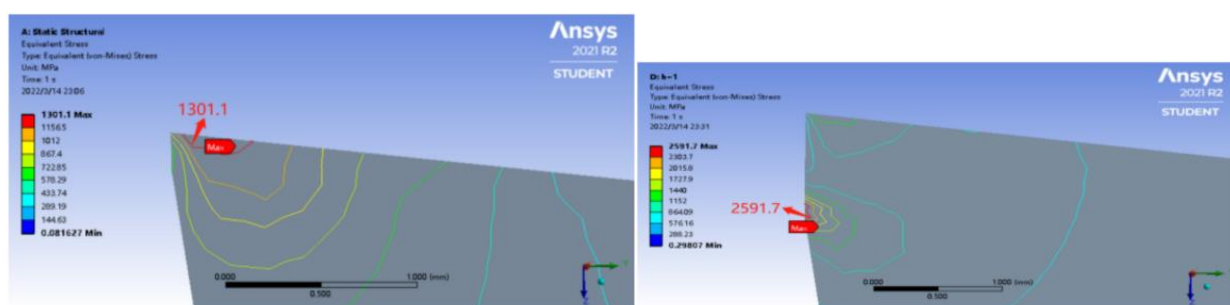


Рис 2.4.1 Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{эквmax}}$ в режущем клине ($\gamma = +7^\circ$) при толщине среза $a=0,368$ мм при различной длине фаски износа h_z : $a - h_z=0,2$ мм; $b - h_z=1$ мм

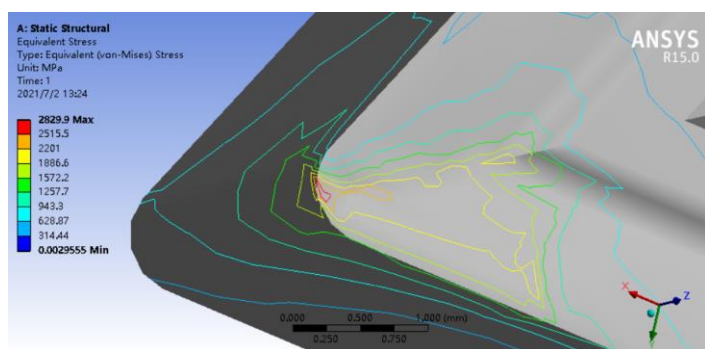


Рис 2.4.2 Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ в 3-гранной СМП при нагрузке по главной режущей кромке 90%, по вспомогательной режущей кромке 10%. Сталь 40Х – Т15К6. $\gamma = -10^\circ$. $s=0,368$ мм/об, $c = 2,02$ мм, ширина среза $b = 2$ мм.

$$F=1196 \text{ Н}, N=2020 \text{ Н}. \sigma_{\text{экв max}} = 2830 \text{ МПа}$$

Кроме того, при сравнении результатов (Рис 2.4.3) при одинаковой нагрузке выявлено, что при использовании изношенного инструмента может потребоваться увеличение толщины фаски для улучшения качества обработки.

Однако, использование

СМП может повысить точность и эффективность процесса обработки при одновременном снижении нагрузки на инструмент. Использование СМП также обеспечивает повышенную гибкость в процессе обработки, что позволяет достигать оптимального качества обработки и увеличивать срок службы режущего инструмента.

При расчёте НДС СМП необходимо приложить внешнюю нагрузку в виде небольших участков с равномерным распределением средних контактных напряжений на каждом участке. Чем больше количество участков, тем больше будет соответствие реальному нагружению. Однако увеличение количества участков увеличивает трудоёмкость подготовки к расчёту НДС.

СМП могут быть использованы не только на резцах для токарной обработке, но и на фрезах с механическим креплением СМП, что уменьшает затраты на режущий инструмент и увеличивает срок службы корпуса фрезы.

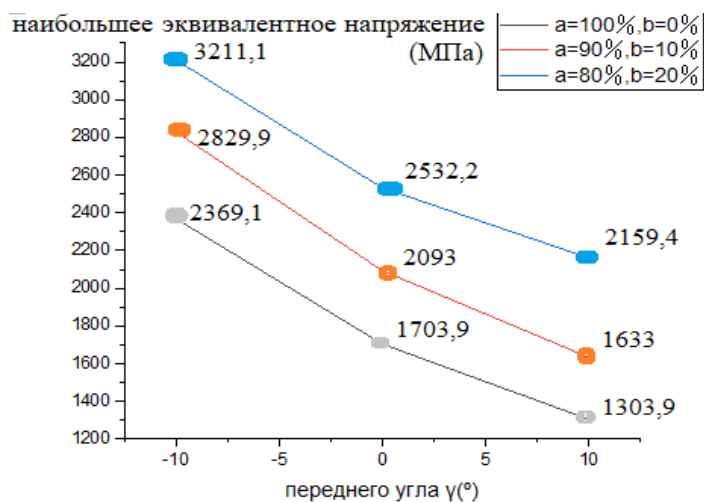


Рис. 2.4.3. Влияние доли нагрузки на главной (a) и вспомогательной (b) режущей кромки(%) и переднего угла γ (°) на величину наибольшего эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экв max}}$ (МПа) в 3-гранных СМП

2.5 Влияние аддитивной технологии на образец стали 40X13

Воздействие аддитивной технологии на физико-механические свойства образцов из стали 40X13:

- Твердость материала. Аддитивная технология может повысить твердость материала за счет создания измельченной кристаллической структуры. При этом материал может стать более неоднородным, что может повлиять на его вязкость и прочность.

- Прочность материала. Аддитивная технология может повысить прочность материала благодаря локальному уплотнению материала в критических зонах и другим изменениям в микроструктуре материала.

- Износостойкость.Аддитивная технология может повысить износостойкость материала за счет увеличения жесткости и повышения сопротивления разрушению.

Воздействие аддитивной технологии на стойкость инструмента при концевом фрезеровании:

- Точность и твёрдость поверхности обработки. Аддитивная технология (АТ) может увеличить точность исполнения размеров и формы при синтезе детали, что приведёт к уменьшению толщины припуска, а, значит, уменьшит трудоёмкость последующей обработки. Подбор режима АТ может уменьшить твёрдость поверхности образца, что приводит к снижению износа инструмента.

- Снижение затрат на изготовление инструмента. Аддитивная технология может уменьшить затраты на изготовление инструментов, что снижает подобные затраты на производство конечных изделий.

Таким образом, аддитивная технология может оказать положительное влияние на физико-механические свойства материалов, в ней использующихся, и, в частности, образцов из стали 40X13 и стойкость инструмента при концевом фрезеровании. Однако при проектировании и изготовлении инструментов необходимо учитывать свойства материала и особенности процесса изготовления.

3 Методика выполнения работы

3.1 Закрепление образца на фрезерном станке

Для изучения возможности обработки образцов, произведенных при помощи порошковой или проволоочной аддитивной технологии на металлическом 3D-принтере, требуется применение субтрактивной технологии, а именно фрезерования. Образец имеет форму прямоугольного параллелепипеда размером 60 x 20 x 20 мм. Для проведения испытаний используется консольный вертикально-фрезерный станок с системой управления ЧПУ, на котором образец, закрепленный в тисках, устанавливается на динамометре Kistler. Но при наличии подкладочной пластины, используемой при синтезе образца, он крепится с ней непосредственно к динамометру четырьмя болтами.



Рис 3.1.1. Установка заготовки на динамометре Kistler 9257B и используемый измерительный комплекс для измерения технологических составляющих F_z , F_y и F_x силы резания

Измерение составляющих силы резания проводилось с использованием токарного трехкомпонентного динамометра Kistler (см. Рис. 3.1.1), характеризующегося высокой жесткостью и точностью. Для предотвращения искажений измеряемой силы высота закрепленного в тиски образца должна быть небольшой, так как при концевом фрезеровании при большой высоте тисков возникает дополнительный момент относительно опорной поверхности динамометра. В некоторых случаях, образец, приваренный к опорной

(подкладочной) пластине в процессе изготовления методом аддитивной технологии, закреплялся к динамометру с помощью четырех болтов (см. Рис. 3.1.1.). Для этого на опорной пластине сверлились отверстия под болты, для их ввинчивания в отверстия М8-7Н на поверхности динамометра.

Для уменьшения влияния высоты закрепления на результаты измерений при использовании образцов, предварительно вырезанных из опорной пластины, было разработано соответствующее приспособление, изображенное на Рисунке 3.1.2. Образец зажимается между неподвижной планкой 1, закрепленной на динамометре двумя болтами 6, и планкой 2, закрепленной одним болтом 7 к динамометру. Закрепление образца производится затягиванием болта 3 и гайки 4. После закрепления образца эксцентрик (не указан на схеме) прижимается к планке 2 для предотвращения вибраций во время фрезерования.

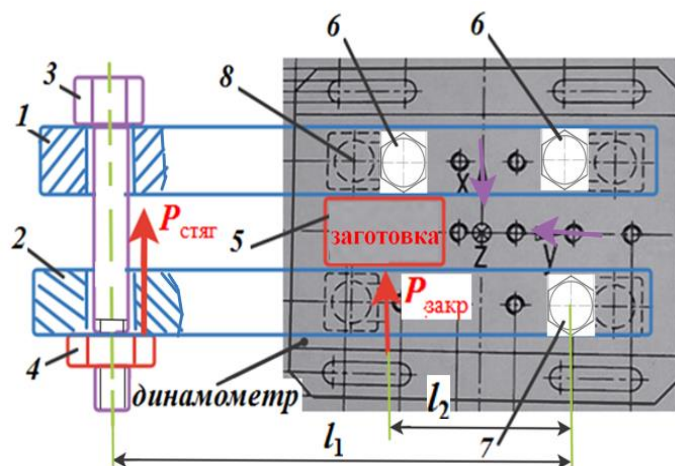


Рис.3.1.2. Схема закрепления небольшого образца на динамометре Kistler для фрезерования концевой фрезой

3.2 Измерение сил при фрезеровании

При экспериментальном исследовании была выполнена обработка заготовки, изготовленной методом аддитивной технологии из стали 40X13, при помощи четырехзубых концевых фрез из твердого сплава ВК8. Во время обработки, составляющие силы резания P_h , P_v и P_x были непрерывно измерены динамометром Kistler.

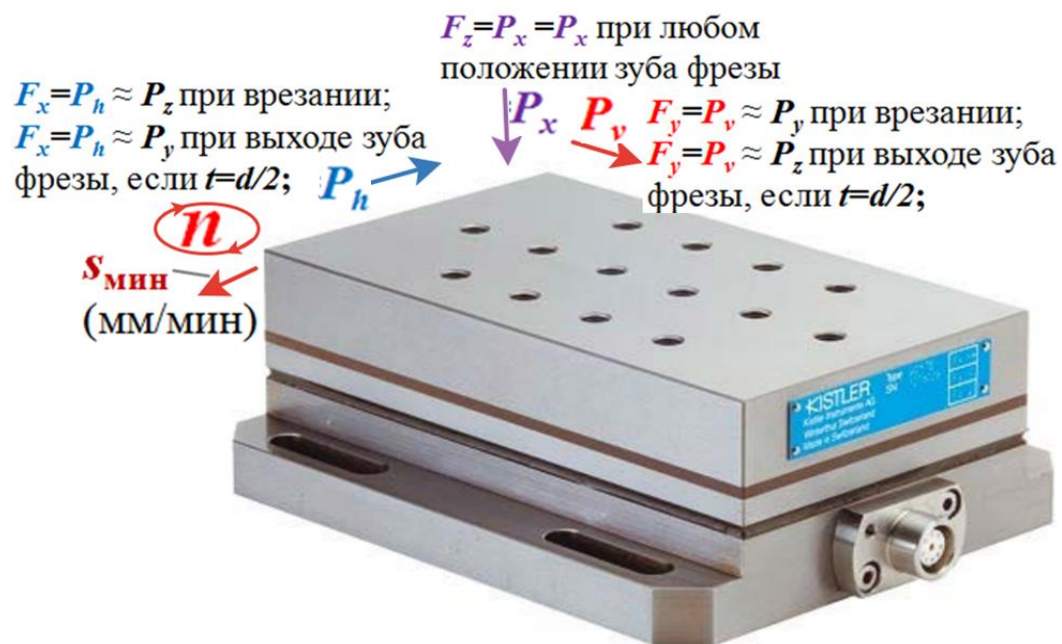


Рис. 3.2.1. Направления измеряемых сил F_x , F_y и P_z , отображаемых на мониторе динамометра Kistler, соответствие их при фрезеровании силам P_h , P_v и P_x и приблизительное соответствие тангенциальной P_z и радиальной P_y силам при врезании и при выходе зуба из контакта, если $t = d_{фр}/2$.

В программное обеспечение динамометра Kistler входит определение вертикальной силы как F_z , силы в горизонтальной плоскости, направленной к оператору, как F_y , а силы в горизонтальной плоскости, направленной справа налево, как F_x . Учитывая факторы, связанные с направлением фрезерования,

сторона заготовки с наибольшей длиной (заготовка установлена поперек динамометра, направление минутной подачи $s_{\text{мин}}$ (мм/мин) слева направо показано на Рисунке 3.2.1), сила F_x на мониторе соответствует силе P_h , сила F_y на мониторе - силе P_v , а сила F_z на мониторе - осевой силе P_x (Рисунок 3.2.1).

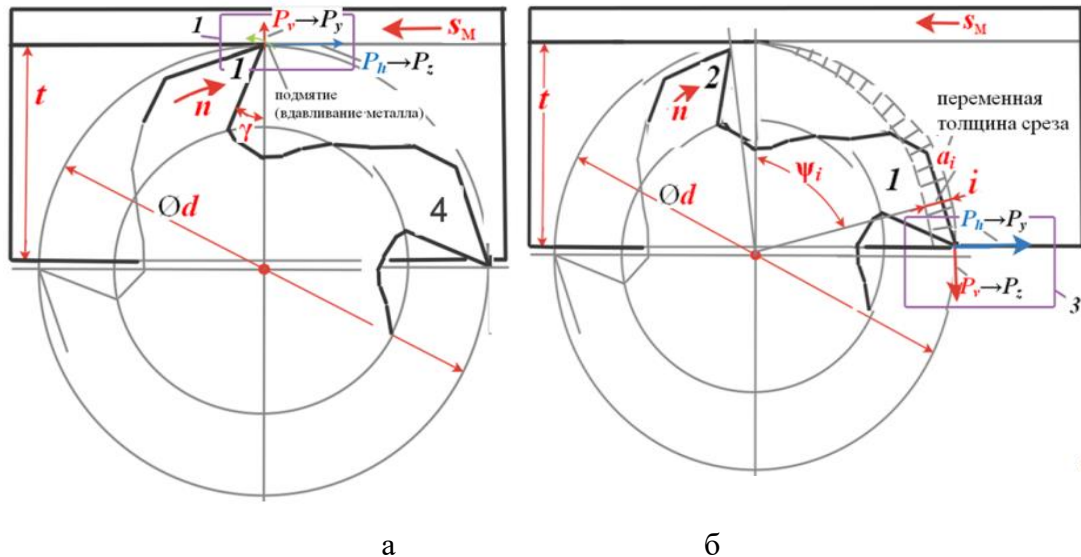


Рис. 3.2.2. Схема направления составляющих силы резания при несимметричном встречном концевом фрезеровании четырёх зубой фрезой при глубине фрезерования $t = d/2 - 0,2$ мм: а – при врезании зуба № 1; б – при выходе зуба № 1 из контакта с заготовкой. Наибольшая толщина среза при выходе зуба из контакта

$$a_{\text{пвх}} \approx s_z \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{t}{d}}$$

В процессе фрезерования невозможно измерить тангенциальную составляющую силы P_z , направленную по вектору скорости резания v , а также радиальную составляющую силы P_y , направленную к оси вращения фрезы. Это связано с тем, что при вращении фрезы не только меняется толщина среза $a_i = s_z \cdot \sin \psi$ (мм) (см. Рисунок 3.2.2 б), но и направление указанных составляющих. Поэтому в ходе исследований было принято допущение, что при одинаковой толщине среза при фрезеровании и токарной обработке распределение контактных напряжений будет примерно одинаковым.

Таблица 3.2.1 – Соответствие между силами при встречном фрезеровании

		При врезании зуба	При выходе зуба
Обозначение силы на мониторе	Сила, измеряемая при фрезеровании	Сила, действующая на зуб фрезы	Сила, действующая на зуб фрезы
P_x	P_h	P_z	P_y
P_y	P_v	P_y	P_z
P_z	P_x		

Когда глубина фрезерования t примерно равна радиусу фрезы, то при врезании зуба в заготовку при встречном фрезеровании на экране монитора появляется составляющая $F_x = P_h$, которая представляет силу P_z , поскольку при врезании она направлена в противоположном направлении относительно направления подачи стола s_m , т. е. когда центральный угол ψ небольшой. Составляющая $F_y = P_v$ представляет собой силу P_y , так как при врезании она направлена радиально и перпендикулярно направлению подачи.

4 Исследовательская часть ВКР

4.1 Исследование использования острых фрез в концевом фрезеровании

Изменение составляющих силы резания при концевом фрезеровании образцов из стали 40Х13 может зависеть от нескольких факторов, таких как направление (встречное или попутное) фрезерования острой фрезой, подача, глубина и ширина фрезерования, диаметр фрезы, материал инструмента и количество зубьев фрезы.

Обычно при попутном фрезеровании сила резания больше, чем при встречном фрезеровании, так как в этом случае происходит большее сопротивление режущей кромки материалу.

Результаты исследования составляющей силы резания **встречного** фрезерования в зависимости от времени были получены и нанесены на график после измерения динамометром Kistler (рис. 4.1.1).

Результаты исследования изменения по величине составляющих силы резания в зависимости от времени при **попутном**

фрезеровании представлены на графиках (рис. 4.1.2).

Подача и глубина фрезерования также оказывают влияние на составляющие силы резания, причем при увеличении этих параметров сила резания возрастает. Диаметр фрезы и материал инструмента также влияют на

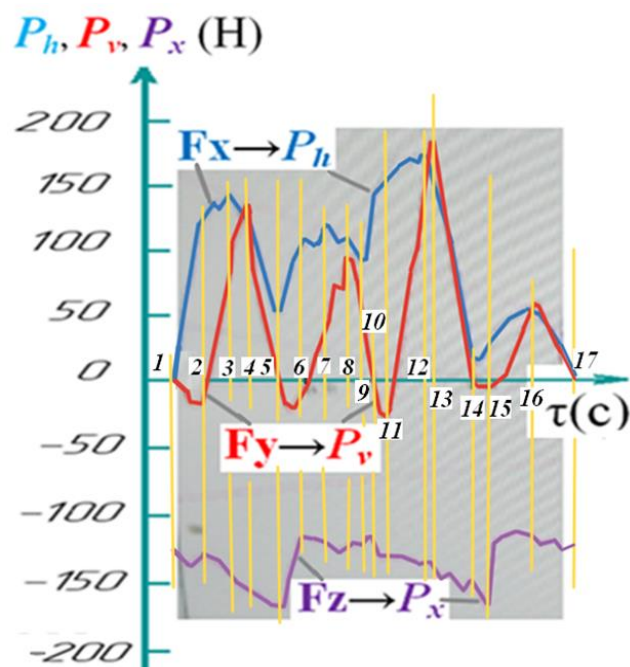


Рис 4.1.1 Графики изменения сил при повороте острой фрезы на один оборот.

Встречное фрезерование 4-х зубной фрезой $\varnothing 8$ мм, $t=3,8$ мм, $b=2$ мм, $n=500$ об/мин, $s_m=28$ мм/мин, 40Х13 (образец №1 АТ) – твердый сплав ВК8.

составляющие силы резания, так при использовании быстрорежущих (Р6М5) фрез силы существенно больше, чем при фрезеровании твёрдосплавными (ВК8) фрезами с одинаковой геометрией, диаметром и режимами.

Наши эксперименты показали, что применение быстрорежущих фрез для фрезерования образцов из стали 40Х13 после их получения методами аддитивной

технологии **невозможно** из-за их очень интенсивного износа. Поэтому и силы больше, т. к. практически сразу происходит округление режущих кромок и даже их пластическая деформация. Особенно интенсивно износ протекает при обработке корки, где твёрдость

Количество зубьев фрезы также влияет на составляющие силы резания, при этом применение фрезы с большим количеством зубьев приводит к более равномерному фрезерованию, позволяет увеличить производительность обработки при такой же подаче на зуб, но если при этом увеличить частоту вращения фрезы.

В целом на производительность обработки влияет только величина минутной подачи s_m , а скорость резания v только через увеличение частоты вращения n , а подача на зуб s_z – через увеличение минутной подачи:

$$s_m = s_z \times n \times z (\text{мм/мин})$$

$$n = 1000 \times v / (\pi \times d) (\text{об/мин}).$$

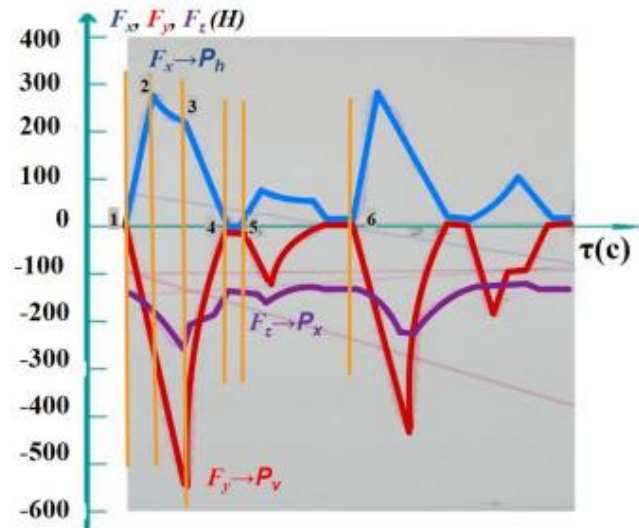


Рис 4.1.2 Графики изменения сил при повороте острой фрезы на один оборот.

Попутное фрезерование 4-х зубной фрезой Ø8 мм, $t=4$ мм, $b=2$ мм, $n=500$ об/мин, $s_m=104$ мм/мин,

40Х13 (образец №1 АТ) – твердый сплав ВК8.

4.2 Исследование использования изношенных фрез в концевом фрезеровании

Износ концевой фрезы в основном влияет на составляющие силы P_v и P_h . Сила P_x , действующая вдоль оси фрезы, изменяется незначительно, и мало влияет на вероятность поломки фрезы, т.к. в этом направлении фреза имеет высокую жёсткость. Износ твёрдосплавных фрез по задней поверхности главной режущей кромки происходит не так интенсивно, как износ и выкрашивание по уголкам, т.е. по вершинам. Наиболее сильно износ влияет на силы при встречном фрезеровании, поэтому был выполнен анализ процесса встречного фрезерования с использованием изношенной концевой фрезы.

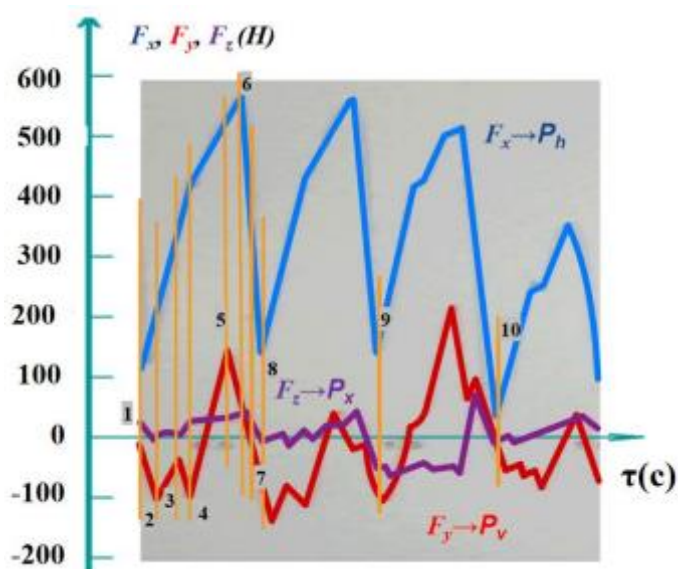


Рис 4.2.1 Графики изменения сил при повороте изношенной фрезы на один оборот. Встречное фрезерование 4-х зубной фрезой $\varnothing 8$ мм, $t=3,8$ мм,

$$b=2 \text{ мм,}$$

$$n=500 \text{ об/мин, } s_m=28 \text{ мм/мин,}$$

образец №1 – твердый сплав

В процессе фрезерования выполнялась запись изменений сил с помощью приложения DynoWare динамометра Kistler (рис. 4.2.1).

Составляющие силы резания зависят от параметров фрезерования: подачи, глубины и ширины фрезерования, скорости резания, а также параметров фрезы – её диаметра, материала фрезы, количества зубьев, угла подъёма винтовой канавки, переднего угла.

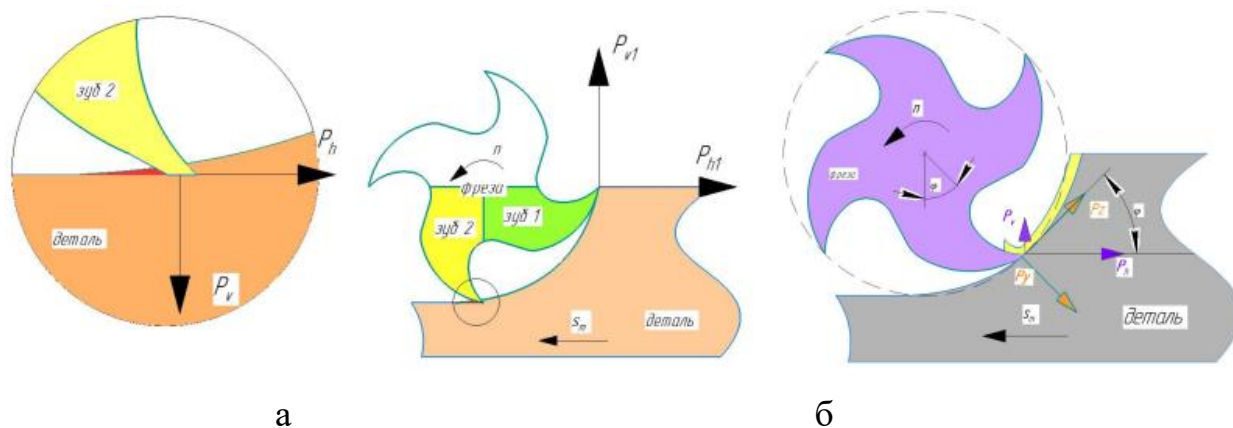


Рис 4.2.2. Составляющие силы, действующие на деталь при встречном фрезеровании при
врезании (а) и после врезания (б) изношенной концевой фрезой

Подача, глубина и ширина фрезерования влияют на составляющие P_v и P_h силы резания, действующие в горизонтальной плоскости на виде сверху, и на осевую силу P_x , действующую вдоль оси фрезерования. Увеличение диаметра фрезы благоприятно сказывается на процессе резания, т.к. при этом не только увеличивается жёсткость, но и улучшается теплоотвод в тело фрезы, увеличивается время холостого пробега, в течении которого зуб не режет, а охлаждается до следующего врезания. Всё это увеличивает стойкость фрезы T (мин) или при прежней стойкости позволяет увеличить минутную подачу или глубину и ширину фрезерования.

Наши эксперименты показали, что для субтрактивной обработки желательно использовать твёрдосплавные фрезы диаметром не менее 12 мм. Однако использование фрез диаметром более 16 мм экономически невыгодно из-за их высокой стоимости, или требуется провести стойкостные испытания, а уже на их основании и стоимости фрез делать экономические расчёты.

При обработке небольших заготовок или при наличии проблем по доступу к обрабатываемым поверхностям приходится использовать фрезы малого диаметра (иногда даже менее 6 мм), что для твёрдого сплава весьма опасно с точки зрения прочности фрезы. В этом случае приходится ограничить глубину фрезерования t , а уже потом ширину фрезерования B , т.к. при неизменности площади сечения среза ($B \times t$) желательно увеличить B и

уменьшать t , т.к. это увеличивает теплоотвод в тело фрезы и немного уменьшает расстояние l от зоны резания до цанги, в которой закрепляются концевые фрезы при их цилиндрическом хвостовике. При этом уменьшается изгибающий момент $M = P_{hv} \times l$ (Н·м). В формуле используется результирующая составляющая P_{hv} , которая рассчитывается по формуле $P_{hv} = (P_h^2 + P_v^2)^{1/2}$ (Н).

Как показали наши эксперименты, при одинаковых режимах резания при попутном фрезеровании составляющая вдоль направления подачи P_h меньше, чем при встречном фрезеровании, однако боковая сила P_v больше, чем при встречном. При этом результирующая составляющая P_{hv} практически одинакова.

Увеличение количества зубьев z (шт.) позволяет снизить силовую и тепловую нагрузку на зуб фрезы, тем самым увеличить стойкость фрезы. Для обработки заготовок после аддитивной формования желательно использовать наибольшее из возможных количество зубьев, но это увеличивает стоимость фрез, поэтому необходим экономический анализ. Увеличение количества зубьев фрезы уменьшает неравномерность фрезерования и улучшает качество обработанной поверхности, но в основном по высоте обрабатываемого уступа. Точность обработки также немного увеличивается.

В целом, использование изношенных фрез для встречного фрезерования может привести к выкрашиванию зубьев или даже поломке фрезы в момент врезания изношенного зуба в заготовку. При попутном фрезеровании износ не так опасен, т. к. отсутствует период давления фаски износа по задней поверхности на заготовку во время врезания.

Как показали наши эксперименты, увеличение скорости резания приводит к существенному уменьшению составляющих силы резания, однако имеется ограничение по частоте вращения. В связи с малым диаметром цельных концевых фрез необходимо использовать высокую частоту вращения $n = 1000 \times v / (\pi \times d)$ (об/мин). Так, при диаметре фрезы $d = 12$ мм приемлемая скорость резания твёрдосплавным режущим инструментом $v = 150$ м/мин. Тогда частота вращения шпинделя должна быть почти 4 000 об/мин. На обычном фрезерном станке невозможно обеспечить частоту вращения шпинделя более

2 500 об/мин, поэтому требуется применение вертикально-фрезерного станка с ЧПУ или обрабатывающего центра, на которых возможно использовать n до 5 000 об/мин. Увеличение частоты вращения шпинделя может привести к появлению вибрации, особенно если войти в полосу резонансных частот, т.е. когда частота вынужденных колебания от изменения сил резания и от дисбаланса технологической оснастки на шпинделе (цангового патрона с цангой и фрезой) совпадает с частотой собственных колебаний. Дополнительным источником колебаний выступает и радиальное биение зубьев. Как показали наши исследования, радиальное биение приводит в неодинаковой величине сил резания на разных зубьях (см. рис. 4.1.1, 4.1.2, 4.2.1). В настоящее время всё чаще используются станки с автоматической динамической балансировкой шпинделя с установленной на ней оснасткой и позволяющие использовать частоту вращения шпинделя при фрезеровании до 10 000 об/мин.

Конечно, можно использовать твёрдосплавные фрезы и при меньшей частоте вращения, но это будет менее эффективно. Увеличение скорости резания приводит к тому, что температура резания увеличивается, как и температура режущих кромок. Это приводит к уменьшению стойкости инструмента, но, с другой стороны, уменьшается хрупкость твёрдого сплава и даже может происходить «самозалечивание» микротрещин (за счёт размягчения кобальтовой связки), появляющихся от больших напряжений в режущем инструменте.

4.3 Определение физических составляющих силы резания на передней поверхности

Сталь 40Х13 широко используется в производстве, и при ее обработке большая часть нагрузки от силы резания распределяется на главную режущую кромку. Это позволяет считать напряженно-деформированное состояние режущего инструмента в главной секущей плоскости плоским (см. рис. 4.3.1 б). Наибольшее касательное напряжение на передней поверхности может быть рассчитано по уравнению:

$$\tau_{max} = \tau_{const} = \frac{F}{c \times 0,75 \times b_c}$$

где F – касательная сила на передней поверхности (Н); c – длина контакта стружки (мм); b – ширина среза (мм).

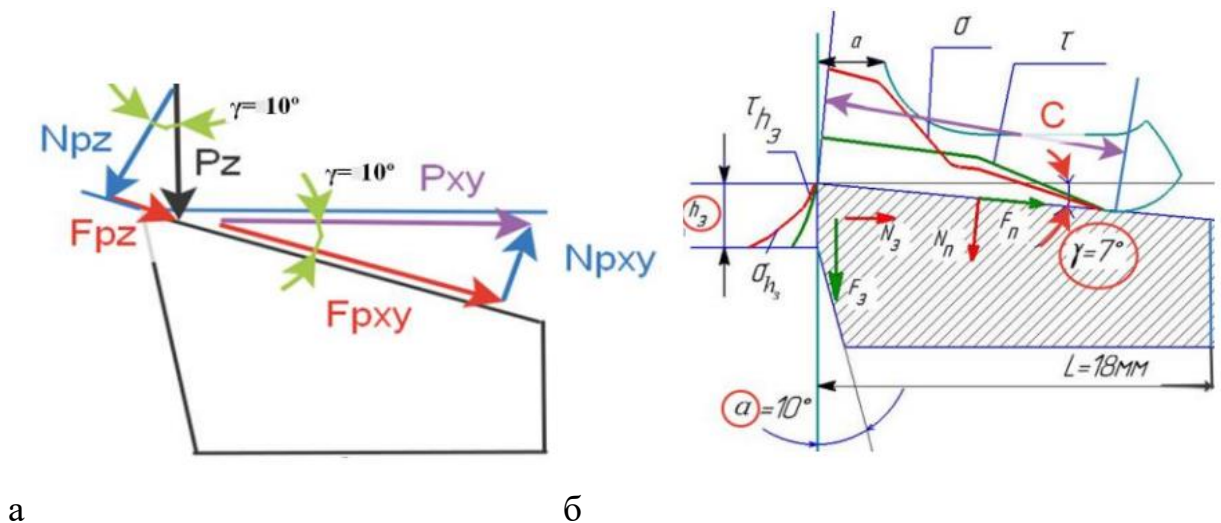


Рис. 4.3.1 – Составляющие силы резания (а), и распределение контактных напряжений на поверхностях резца (б).

При фрезеровании концевой фрезой ширина среза b равна длине контакта главной режущей кромки с заготовкой, которая зависит от ширины фрезерования B , угла наклона винтовой канавки ω , диаметра фрезы d и глубины фрезерования t .

Исходя из экспериментов [12] можно принять, что при ширине

фрезерования $B = 2$ мм составляющие силы, действующие на основную режущую кромку на цилиндрической части $P_{v\Gamma}$, $P_{h\Gamma}$, примерно в 2 раза больше, чем составляющие силы, действующие на вспомогательную режущую кромку на торцевой части и на вершине зубьев фрезы P_{vB} , P_{hB} ; составляющая сила, действующая на основную режущую кромку $P_{x\Gamma}$, примерно в 9 раз больше чем составляющие силы, действующие на вспомогательную режущую кромку P_{xB} . Поэтому:

$$P_{x\Gamma} = P_{x\max} \times 9/8; \quad P_{h\Gamma} = P_{h\max} \times 2/3; P_{v\Gamma} = P_{v\max} \times 2/3;$$

$$P_{xB} = P_{x\max} \times 1/8; P_{hB} = P_{h\max} \times 1/3; P_{vB} = P_{v\max} \times 1/3.$$

где $P_{h\max}$ – максимальное значение составляющей силы в направлении подачи; $P_{v\max}$ – максимальное значение составляющей силы, перпендикулярной направлению подачи; $P_{x\max}$ – максимальное значение составляющей силы вдоль оси фрезы.

На рис. 4.3.2 представлена схема направления сил. Составляющие силы, действующие в касательном направлении:

Составляющие силы, действующие в касательном направлении:

$$P_{z\Gamma} = P_{h\Gamma} \times \cos\psi + P_{v\Gamma} \times \sin\psi;$$

$$P_{zB} = P_{hB} \times \cos\psi + P_{vB} \times \sin\psi;$$

составляющие силы, действующие в радиальном направлении:

$$P_{y\Gamma} = P_{h\Gamma} \times \sin\psi - P_{v\Gamma} \times \cos\psi;$$

$$P_{yB} = P_{hB} \times \sin\psi - P_{vB} \times \cos\psi.$$

где ψ – угол контакта. Из рис. 4.1.11.

при наибольшей толщине среза $a_{\max}$, $\arcsin\psi = \frac{\sqrt{Dt-t^2}}{D/2} = \frac{\sqrt{8 \times 4 - 4^2}}{8/2} = 90^\circ$.

$$P_{z\Gamma} = P_{v\Gamma}; P_{y\Gamma} = P_{h\Gamma}; P_{zB} = P_{vB}; P_{yB} = P_{hB}.$$

При малой величине угла $\gamma = 7^\circ$ допустимо принять, что передний угол в сечении, перпендикулярном оси вращения фрезы $\gamma_{\text{рад}}$, примерно равен

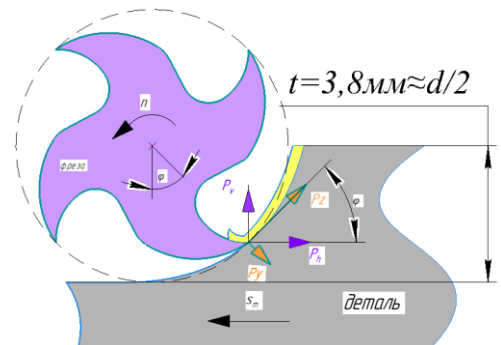


Рис. 4.3.2. Составляющие силы P_y и P_z , которые приводят к появлению технологических сил при фрезеровании (P_h , P_v). Сила P_y направлена от оси фрезы, а P_z – тангенциально, т.е. касательно к положению режущей кромки зуба при вращении фрезы

переднему углу в главной секущей плоскости к главной режущей кромке на цилиндрической части концевой фрезы γ . При таком допущении можно вывести уравнения для расчёта нормальной N и касательной F сил на передней поверхности зуба фрезы:

$$N = P_{z\Gamma} \times \cos\gamma - P_{y\Gamma} \times \sin\gamma;$$

$$F = P_{z\Gamma} \times \sin\gamma + P_{y\Gamma} \times \cos\gamma.$$

В итоге:

$$N = P_{v\max} \times 2/3 \times \cos 7^\circ - P_{h\max} \times 2/3 \times \sin 7^\circ \quad (4.3.1)$$

$$F = P_{v\max} \times 2/3 \times \sin 7^\circ + P_{h\max} \times 2/3 \times \cos 7^\circ \quad (4.3.2)$$

$$P_{x\Gamma} = P_{x\max} \times 9/8 \quad (4.3.3)$$

$$P_{z\Gamma} = P_{v\max} \times 1/3 \quad (4.3.4)$$

$$P_{y\Gamma} = P_{h\max} \times 1/3 \quad (4.3.5)$$

$$P_{x\Gamma} = P_{x\max} \times 1/8 \quad (4.3.6)$$

В таблицах 4.3.1–4.3.4 представлены результаты измерения технологических составляющих силы резания с помощью динамометра Kistle.

Таблица 4.3.1 —Наибольшие силы при попутном фрезеровании 6-изубой фрезой.

$d=12$ мм, $t=3$ мм, $B=2$ мм, $n=2000$ об/мин (образец № 3-твердый сплав ВК8)

Минутная подача s_m , мм/мин	P_h , Н	P_v , Н	P_x , Н
5,6	17	48	45
14	26	65	54
28	35	87	60
56	51	126	71

Таблица 4.3.2 —Наибольшие силы при попутном фрезеровании 6-изубой фрезой. $d=12$ мм,

$B=2$ мм, $n=2000$ об/мин, $s_m=28$ мм/мин (образец № 3-твердый сплав ВК8)

Глубина фрезерования t , мм	P_h , Н	P_v , Н	P_x , Н
3	36	90	47
2	33	80	55
1	30	55	60
0,5	26	45	63

Таблица 4.3.3 —Наибольшие силы при попутном фрезеровании 6-и зубой фрезой.
 $d=12$ мм, $n=2000$ об/мин, $s_m=28$ мм/мин(образец № 3-твердый сплав ВК8)

Ширина фрезерования B , мм	P_h , Н	P_v , Н	P_x , Н
8	48	105	95
4	37	80	100
1	24	28	107
0,2	15	17	112

Таблица 4.3.4 —Наибольшие силы при попутном фрезеровании 4-х зубой фрезой.
 $d=8$ мм, $B=2$ мм, $t=4$ мм, $s_m=56$ мм/мин(образец № 3-твердый сплав ВК8)

Частота вращения n , об/мин	P_h , Н	P_v , Н	P_x , Н
2000	50	146	116
1000	131	250	151
500	170	311	195

Поскольку сила F_x на мониторе — это сила P_h , сила F_y на мониторе — это сила P_v , а сила F_z на мониторе — это осевая сила P_x , $\gamma = 7^\circ$, поэтому составляющие физической силы резания на передней поверхности рассчитываются по уравнениям (4.3.1–4.3.4) и заносятся в таблицы 4.3.5–4.3.8:

Таблица 4.3.5 —Наибольшие силы при попутном фрезеровании 6-и зубой фрезой.
 $d=12$ мм $t=3$ мм, $B=2$ мм, $n=2000$ об/мин (образец № 3-твердый сплав ВК8)

Минутная подача s_m , мм/мин	F	N
5,6	15	30
14	22	41
28	30	55
56	44	79

Таблица 4.3.6 —Наибольшие силы при попутном фрезеровании 6-и зубой фрезой.
 $d=12$ мм, $s_m=28$ мм/мин, $B=2$ мм, $n=2000$ об/мин (образец № 3-твердый сплав ВК8)

Глубина фрезерования t , мм	F	N
3	31	57
2	28	50
1	24	34
0,5	21	28

Таблица 4.3.7 —Наибольшие силы при попутном фрезеровании 6-изубой фрезой.
 $d=12$ мм, $s_m=28$ мм/мин, $t=2$ мм, $n=2000$ об/мин (образец № 3-твердый сплав ВК8)

Ширина фрезерования B , мм	F	N
8	40	66
4	31	50
1	18	17
0,2	11	10

Таблица 4.3.8 —Наибольшие силы при попутном фрезеровании 4-х зубой фрезой.
 $d=8$ мм, $s_m=56$ мм/мин, $t=4$ мм, $B=2$ мм(образец № 3-твердый сплав)

Частотой вращения n , об/мин	F	N
2000	45	93
1000	107	155
500	138	192

4.4 Построение эпюр контактных напряжений на передней поверхности

- **Подача $s_m = 28$ мм/мин:**

По результатам эксперимента были получены следующие данные:

при встречном фрезеровании 4-х зубной острой фрезой $\varnothing d = 8$ мм, глубине $t = 4$ мм, ширине $B = 2$ мм, частоте вращения $n = 500$ об/мин, подаче в минуту $s_m = 28$ мм/мин (образец №1-твердый сплав), $P_{h\max} = 130$ Н, $P_{v\max} = 120$ Н, $P_{x\max} = 160$ Н, максимальная толщина среза:

$$a_{\max} = 2S_z \sqrt{t/D - (t/D)^2} = 2 \frac{s_m}{z \times n} \sqrt{t/D - (t/D)^2} \quad (4.4.1)$$

$$a_{\max} = 2 \frac{28}{4 \times 500} \sqrt{4/8 - (4/8)^2} = 0,014 \text{ мм}$$

По формуле 4.3.1÷4.3.6 можно получить:

$$N = 120 \times \frac{2}{3} \times \cos 7^\circ - 130 \times \frac{2}{3} \times \sin 7^\circ = 69 \text{ Н};$$

$$F = 120 \times \frac{2}{3} \times \sin 7^\circ + 130 \times \frac{2}{3} \times \cos 7^\circ = 96 \text{ Н};$$

$$P_{xT} = 160 \times 9/8 = 180 \text{ (Н)}; P_{zB} = 120 \times \frac{1}{3} = 40 \text{ Н};$$

$$P_{yB} = 130 \times \frac{1}{3} = 43 \text{ Н}; P_{xB} = 160 \times \frac{1}{8} = 20 \text{ Н}.$$

В результате экспериментов были получены следующие графики (рис. 4.4.1 и 4.4.2).

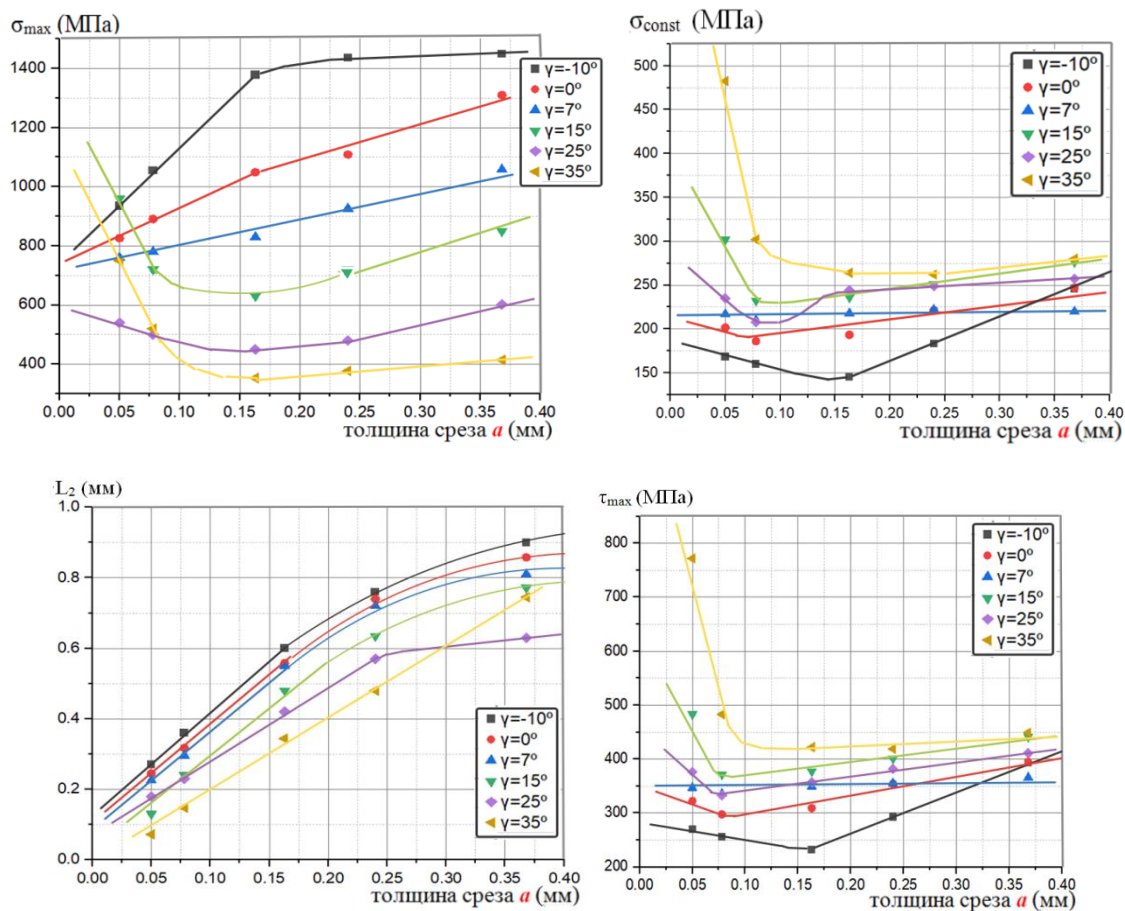


Рис 4.4.1– Влияние толщины среза a и переднего угла γ на основные параметры эпюр нормальных σ и касательных τ контактных напряжений

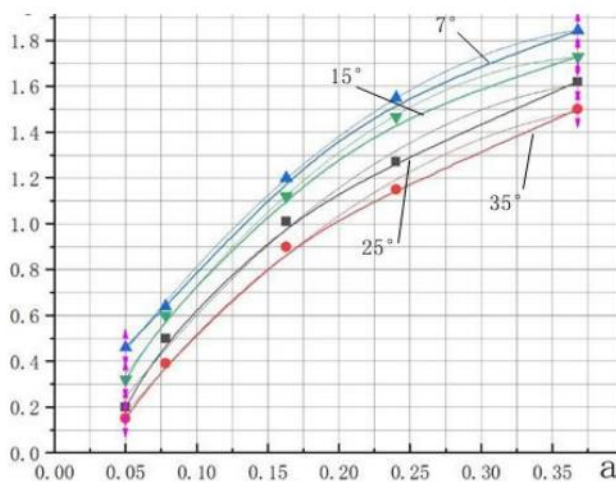


Рис 4.4.2– Влияние толщины среза и переднего угла на длину контактной стружки с передней поверхностью резца при обработке стали 40Х

Поскольку максимальная толщина среза равна $a_{max} = 0,014$ мм , следующие основные параметры могут быть получены в соответствии с приведенным выше рисунком, используя максимальную толщину срезуи связанные с ней параметры:

$$c=0,15\text{мм}, \sigma_{max}=730\text{МПа}, \sigma_{const}=220\text{МПа}, L_2=0,05\text{мм}.$$

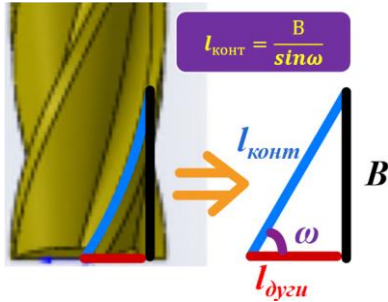


Рис 4.4.3– Схема, используемая для определения длины контакта режущей кромки с заготовкой при полном врезании зубьев фрезы в заготовку

Обычно при фрезеровании стали длина пластического участка контакта стружки с передней поверхностью зуба $c_1 \approx 0,5c = 0,075$ мм.

Эпюра нормальных напряжений немного корректируется, чтобы $\frac{N}{l_{\text{конт}}} = \int_0^c \sigma(x) dx$ и получалась окончательная эпюра нормальных напряжений (Рис 4.4.4), где $l_{\text{конт}}$ – длина контакта по главной режущей кромке с заготовкой, $l_{\text{конт}} = \frac{B}{\sin \omega} = \frac{2}{\sin 40^\circ} = 3,1$ мм(см. рис. 4.4.3.).

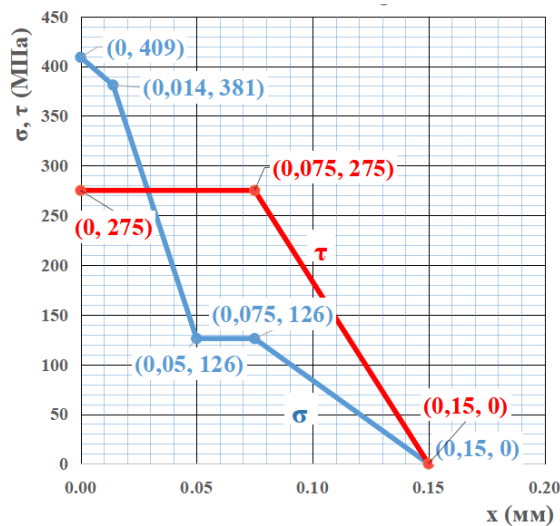


Рис 4.4.4– Эпюры контактных напряжений на передней поверхности зуба при встречном фрезеровании 4-х зубой фрезой $\varnothing d = 8$ мм с глубиной $t = 4$ мм, шириной $B = 2$ мм, с частотой вращения $n = 500$ об/мин, с подачей в минуту $s_m = 28$ мм/мин, $c = 0,15$ мм, образец №1-твердый сплав.

Максимальное касательное напряжение, действующее на переднюю

поверхность зуба:

$$\tau_{max} = \tau_{const} = \frac{F}{(c \times 0,75 \times l_{\text{конт}})} \quad (4.4.2)$$

$$\tau_{max} = \tau_{const} = \frac{96}{(0,15 \times 0,75 \times 3,1)} = 275 \text{ МПа}$$

Для подготовки к расчёту напряжённо-деформированного состояния (НДС) методом конечных элементов (МКЭ) передняя поверхность режущего клина делится на несколько областей и к каждой i -той области прикладываются соответствующие средние нормальное $\sigma_{ср\,i}$ и касательное $\tau_{ср\,i}$ контактные напряжения, определённые в середине каждого i -того участка по эграм контактных напряжений.

Таблица 4.4.1– Удельные технологические силы q_{yi} и q_{zi} (МПа) на участках передней поверхности зуба фрезы при расчёте НДС зуба. $s_m = 28$ мм/мин, $l_{\text{конт}} = 3,1$ мм ($\gamma = 7^\circ$, $\omega = 40^\circ$, $c = 0,15$ мм, образец №1-твердый сплав)

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	σ_i , МПа	τ_i , МПа	q_{yi} , МПа	q_{zi} , МПа
1	2	3	4	5	6
1	0-0,014	395	275	225	426
2	0,014-0,026	338,5	275	232	369
3	0,026-0,038	253,5	275	242	285
4	0,038-0,05	168,5	275	252	201
5	0,05-0,075	126	275	258	159
6	0,075-0,1	105	229	214	132
7	0,1-0,125	63	137,5	129	79
8	0,125-0,15	21	45,8	43	26

Примечание: q_{yi} — напряжение, действующее на область i в радиальном направлении относительно оси фрезы, $q_{yi} = \tau_i \times \cos \gamma - \sigma_i \times \sin \gamma$, q_{zi} — напряжение, действующее на область i в тангенциальном направлении, $q_{zi} = \tau_i \times \sin \gamma + \sigma_i \times \cos \gamma$, передний угол $\gamma = 7^\circ$.

Напряжение, действующее на каждую область вдоль оси фрезы:

$$q_{xi} = P_{\text{хг}}/8 = 180/8 = 22,5 \text{ МПа.}$$

Считаем, что составляющие силы действуют на площадь передней поверхности **вспомогательной** режущей кромки в виде прямоугольника шириной $b_b = 0,28$ мм и высотой $a_b = 0,4$ мм. Так как площадь этой прямоугольной области мала, считаем, что контактные напряжения распределены по этой площади равномерно.

● **Подача $s_m = 14$ мм/мин:**

По результатам эксперимента были получены следующие данные:

при встречном фрезеровании 4-х зубной острой фрезой $\varnothing d = 8$ мм, глубине $t = 4$ мм, ширине $B = 2$ мм, частоте вращения $n = 500$ об/мин, подаче в минуту $s_m = 14$ мм/мин (образец №1-твердый сплав), $P_{h\max} = 88$ Н, $P_{v\max} = 75$ Н, $P_{x\max} = 145$ Н, максимальная толщина среза:

$$a_{\max} = 2S_z \sqrt{t/D - (t/D)^2} = 2 \frac{s_m}{z \times n} \sqrt{t/D - (t/D)^2} \quad (4.4.1)$$

$$a_{\max} = 2 \frac{14}{4 \times 500} \sqrt{4/8 - (4/8)^2} = 0,007 \text{ мм}$$

По формуле 4.3.1÷4.3.6 можно получить:

$$N = 75 \times \frac{2}{3} \times \cos 7^\circ - 88 \times \frac{2}{3} \times \sin 7^\circ = 42,5 \text{ Н};$$

$$F = 75 \times \frac{2}{3} \times \sin 7^\circ + 88 \times \frac{2}{3} \times \cos 7^\circ = 64,3 \text{ Н};$$

$$P_{xг} = 145 \times 9/8 = 163(\text{Н}); P_{zв} = 75 \times \frac{1}{3} = 25\text{Н};$$

$$P_{yв} = 88 \times \frac{1}{3} = 29 \text{ Н}; P_{xв} = 145 \times \frac{1}{8} = 18 \text{ Н}.$$

Поскольку максимальная толщина среза равна $a_{\max} = 0,007$ мм, следующие основные параметры могут быть получены при использовании максимальной толщины среза согласно рис 4.4.1 и рис 4.4.2:

$$c = 0,088 \text{ мм}, \sigma_{\max} = 700 \text{ МПа}, \sigma_{\text{const}} = 210 \text{ МПа}, L_2 = 0,03 \text{ мм}.$$

Обычно при фрезеровании стали длина пластического участка контакта стружки с передней поверхностью зуба $c_1 \approx 0,5c = 0,044$ мм.

Эпюра нормальных напряжений немного корректируется, чтобы $\frac{N}{l_{\text{конт}}} = \int_0^c \sigma(x) dx$ и получалась окончательная эпюра нормальных напряжений (Рис 4.4.5), где $l_{\text{конт}}$ — длина контакта по главной режущей кромке с заготовкой, $l_{\text{конт}} =$

$$\frac{B}{\sin \omega} = \frac{2}{\sin 40^\circ} = 3,1 \text{ мм (см. рис. 4.4.3.)}$$

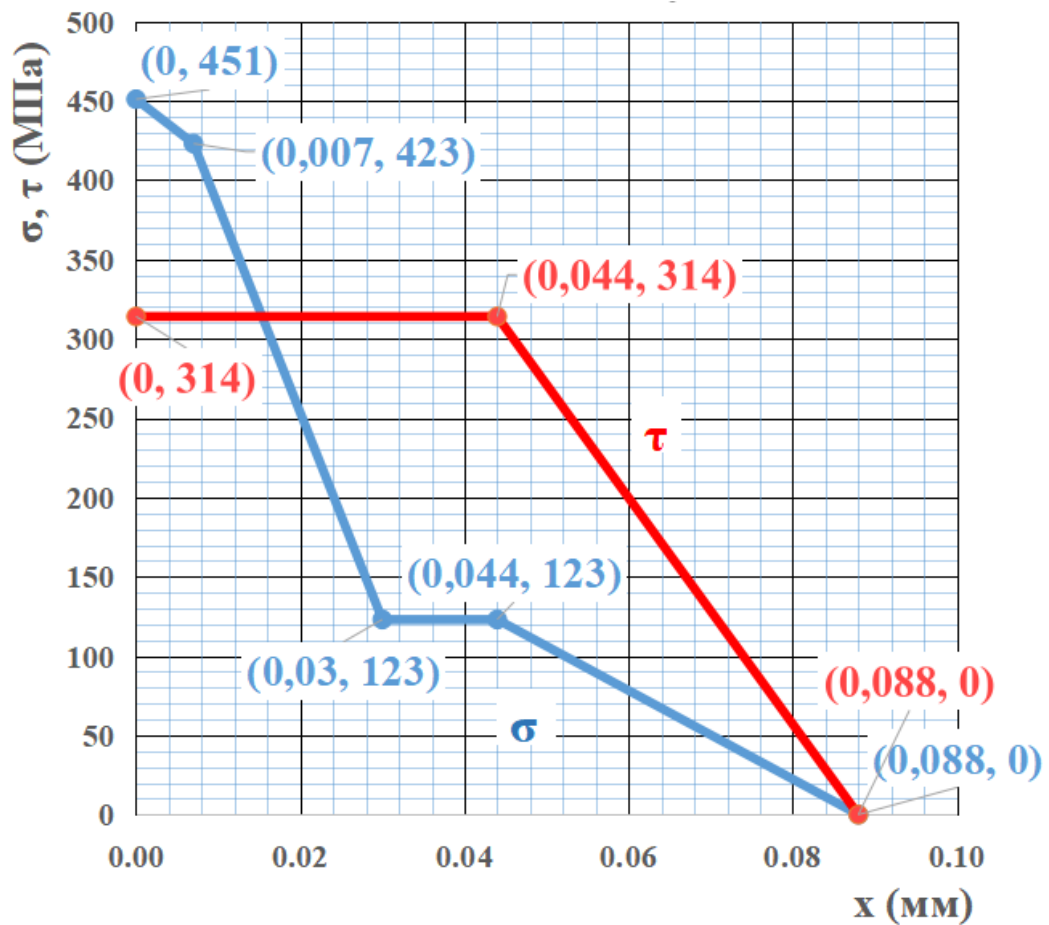


Рисунок 4.4.5– Эпюры контактных напряжений на передней поверхности при встречном фрезеровании. $z = 4$ шт., $d = 8$ мм, $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, $s_m = 14$ мм/мин, $c = 0,088$ мм, образец №1-твердый сплав.

Максимальное касательное напряжение, действующее на переднюю поверхность зуба:

$$\tau_{max} = \tau_{const} = \frac{F}{(c \times 0,75 \times l_{\text{конт}})} \quad (4.4.2)$$

$$\tau_{max} = \tau_{const} = \frac{64,3}{(0,088 \times 0,75 \times 3,1)} = 314 \text{ Мпа}$$

Напряжение, действующее на каждую область вдоль оси фрезы:

$$q_{xri} = P_{xri} / 8 = 163 / 8 = 20,4 \text{ МПа.}$$

Таблица 4.4.2– Удельные технологические силы q_{yzi} и q_{zxi} (МПа) на участках передней поверхности зуба фрезы при расчёте НДС зуба. $s_m = 14$ мм/мин, $z = 4$ шт., $d = 8$ мм, $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, образец №1-твердый сплав, ширина контакта (длина контакта с заготовкой вдоль главной режущей кромки) $l_{\text{конт}} = 3,1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $\omega = 40^\circ$, $c = 0,088$ мм.

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	σ_i , МПа	τ_i , МПа	q_{yri} , МПа	q_{zri} , МПа
1	2	3	4	5	6
1	0-0,007	437	314	258	472
2	0,007-0,015	373	314	266	408
3	0,015-0,022	273	314	278	309
4	0,022-0,03	173	314	291	210
5	0,03-0,044	123	314	297	160
6	0,044-0,059	102,5	262	248	134
7	0,059-0,073	61,5	157	148	80
8	0,073-0,088	20,5	52	49	27

Примечание: q_{yri} — напряжение, действующее на область i в радиальном направлении относительно оси фрезы, $q_{yri} = \tau_i \times \cos \gamma - \sigma_i \times \sin \gamma$, q_{zri} — напряжение, действующее на область i в тангенциальном направлении, $q_{zri} = \tau_i \times \sin \gamma + \sigma_i \times \cos \gamma$, передний угол $\gamma = 7^\circ$.

Считаем, что составляющие силы действуют на площадь передней поверхности **вспомогательной** режущей кромки в виде прямоугольника шириной $b_b = 0,14$ мм и высотой $a_b = 0,4$ мм.

● **Подача $s_m = 56$ мм/мин:**

По результатам эксперимента были получены следующие данные:

при встречном фрезеровании 4-х зубной острой фрезой $\varnothing d = 8$ мм, глубине $t = 4$ мм, ширине $B = 2$ мм, частоте вращения $n = 500$ об/мин, подаче в минуту $s_m = 56$ мм/мин (образец №1-твердый сплав), $P_{h\max} = 180$ Н, $P_{v\max} = 216$ Н, $P_{x\max} = 174$ Н, максимальная толщина среза:

$$a_{\max} = 2S_z \sqrt{t/D - (t/D)^2} = 2 \frac{s_m}{z \times n} \sqrt{t/D - (t/D)^2} \quad (4.4.1)$$

$$a_{\max} = 2 \frac{56}{4 \times 500} \sqrt{4/8 - (4/8)^2} = 0,028 \text{ мм}$$

По формуле 4.3.1÷4.3.6 можно получить:

$$N = 216 \times \frac{2}{3} \times \cos 7^\circ - 180 \times \frac{2}{3} \times \sin 7^\circ = 128 \text{ Н};$$

$$F = 216 \times \frac{2}{3} \times \sin 7^\circ + 180 \times \frac{2}{3} \times \cos 7^\circ = 137 \text{ Н};$$

$$P_{x\Gamma} = 174 \times \frac{9}{8} = 196 \text{ (Н)}; P_{zB} = 216 \times \frac{1}{3} = 72 \text{ Н};$$

$$P_{yB} = 180 \times \frac{1}{3} = 60 \text{ Н}; P_{xB} = 174 \times \frac{1}{8} = 21,75 \text{ Н}.$$

Поскольку максимальная толщина среза равна $a_{\max} = 0,028$ мм, следующие основные параметры могут быть получены при использовании максимальной толщины среза согласно рис 4.4.1 и рис 4.4.2:

$$c = 0,268 \text{ мм}, \sigma_{\max} = 750 \text{ МПа}, \sigma_{\text{const}} = 230 \text{ МПа}, L_2 = 0,1 \text{ мм}.$$

Обычно при фрезеровании стали длина пластического участка контакта стружки с передней поверхностью зуба $c_1 \approx 0,5c = 0,134$ мм.

Эпюра нормальных напряжений немного корректируется, чтобы $\frac{N}{l_{\text{конт}}} = \int_0^c \sigma(x) dx$ и получалась окончательная эпюра нормальных напряжений (Рис 4.4.6), где $l_{\text{конт}}$ — длина контакта по главной режущей кромке с заготовкой, $l_{\text{конт}} = \frac{B}{\sin \omega} = \frac{2}{\sin 40^\circ} = 3,1 \text{ мм}$ (см. рис. 4.4.3.).

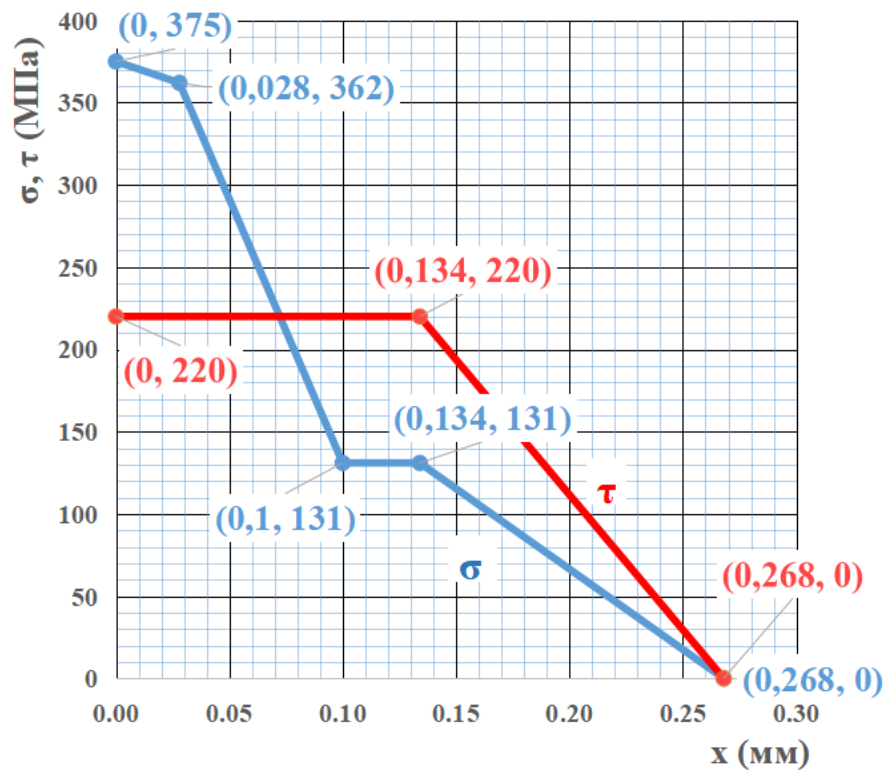


Рисунок 4.4.6– Эпюры контактных напряжений на передней поверхности при встречном фрезеровании. $z = 4$ шт., $d = 8$ мм, $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, $s_m = 56$ мм/мин, $c = 0,268$ мм, образец №1-твердый сплав.

Максимальное касательное напряжение, действующее на переднюю поверхность зуба:

$$\tau_{max} = \tau_{const} = F / (c \times 0,75 \times l_{\text{конт}}) \quad (4.4.2)$$

$$\tau_{max} = \tau_{const} = \frac{137}{(0,268 \times 0,75 \times 3,1)} = 220 \text{ Мпа}$$

Напряжение, действующее на каждую область вдоль оси фрезы:

$$q_{xri} = P_{xг} / 8 = 196 / 8 = 24,5 \text{ Мпа}$$

Таблица 4.4.3– Удельные технологические силы q_{yzi} и q_{zzi} (МПа) на участках передней поверхности зуба фрезы при расчёте НДС зуба. $s_m = 56$ мм/мин, $z = 4$ шт., $d = 8$ мм, $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, образец №1-твердый сплав, ширина контакта (длина контакта с заготовкой вдоль главной режущей кромки) $l_{\text{конт}} = 3,1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $\omega = 40^\circ$, $c = 0,268$ мм.

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	σ_i , МПа	τ_i , МПа	q_{yri} , МПа	q_{zri} , МПа
1	2	3	4	5	6
1	0-0,028	368,5	220	173	393
2	0,028-0,056	323,5	220	179	348
3	0,056-0,076	246,5	220	188	271
4	0,076-0,1	169,5	220	198	195
5	0,1-0,134	131	220	202	157
6	0,134-0,179	109	183	168	130
7	0,179-0,223	66	110	101	79
8	0,223-0,268	22	37	34	26

Примечание: q_{yri} — напряжение, действующее на область i в радиальном направлении относительно оси фрезы, $q_{yri} = \tau_i \times \cos \gamma - \sigma_i \times \sin \gamma$, q_{zri} — напряжение, действующее на область i в тангенциальном направлении, $q_{zri} = \tau_i \times \sin \gamma + \sigma_i \times \cos \gamma$, передний угол $\gamma = 7^\circ$.

Считаем, что составляющие силы действуют на площадь передней поверхности **вспомогательной** режущей кромки в виде прямоугольника шириной $b_b = 0,56$ мм и высотой $a_b = 0,4$ мм.

● Частота вращения $n = 1000$ об/мин:

По результатам эксперимента были получены следующие данные:

при встречном фрезеровании 4-х зубной острой фрезой $\varnothing d = 8$ мм, глубине $t = 4$ мм, ширине $B = 2$ мм, частоте вращения $n = 1000$ об/мин, подаче в минуту $s_M = 56$ мм/мин (образец №1-твердый сплав), $P_{h\max} = 170$ Н, $P_{v\max} = 165$ Н, $P_{x\max} = 165$ Н, максимальная толщина среза:

$$a_{\max} = 2S_z \sqrt{t/D - (t/D)^2} = 2 \frac{s_M}{z \times n} \sqrt{t/D - (t/D)^2} \quad (4.4.1)$$

$$a_{\max} = 2 \frac{56}{4 \times 1000} \sqrt{4/8 - (4/8)^2} = 0,014 \text{ мм}$$

По формуле 4.3.1÷4.3.6 можно получить:

$$N = 165 \times \frac{2}{3} \times \cos 7^\circ - 170 \times \frac{2}{3} \times \sin 7^\circ = 95 \text{ Н};$$

$$F = 165 \times \frac{2}{3} \times \sin 7^\circ + 170 \times \frac{2}{3} \times \cos 7^\circ = 126 \text{ Н};$$

$$P_{xг} = 165 \times \frac{9}{8} = 186 \text{ (Н)}; P_{zв} = 165 \times \frac{1}{3} = 55 \text{ Н};$$

$$P_{yв} = 170 \times \frac{1}{3} = 57 \text{ Н}; P_{xв} = 165 \times \frac{1}{8} = 21 \text{ Н}.$$

Поскольку максимальная толщина среза равна $a_{\max} = 0,014$ мм, следующие основные параметры могут быть получены при использовании максимальной толщины среза согласно рис 4.4.1 и рис 4.4.2:

$$c = 0,15 \text{ мм}, \sigma_{\max} = 730 \text{ МПа}, \sigma_{\text{const}} = 220 \text{ МПа}, L_2 = 0,05 \text{ мм}.$$

Обычно при фрезеровании стали длина пластического участка контакта стружки с передней поверхностью зуба $c_1 \approx 0,5c = 0,075 \text{ мм}$.

Эпюра нормальных напряжений немного корректируется, чтобы $\frac{N}{l_{\text{конт}}} = \int_0^c \sigma(x) dx$ и получалась окончательная эпюра нормальных напряжений (Рис 4.4.7), где $l_{\text{конт}}$ — длина контакта по главной режущей кромке с заготовкой, $l_{\text{конт}} = \frac{B}{\sin \omega} = \frac{2}{\sin 40^\circ} = 3,1 \text{ мм}$ (см. рис. 4.4.3.).

Максимальное касательное напряжение, действующее на переднюю поверхность зуба:

$$\tau_{max} = \tau_{const} = F / (c \times 0,75 \times l_{\text{конт}}) (4.4.2)$$

$$\tau_{max} = \tau_{const} = \frac{126}{(0,15 \times 0,75 \times 3,1)} = 361 \text{ МПа}$$

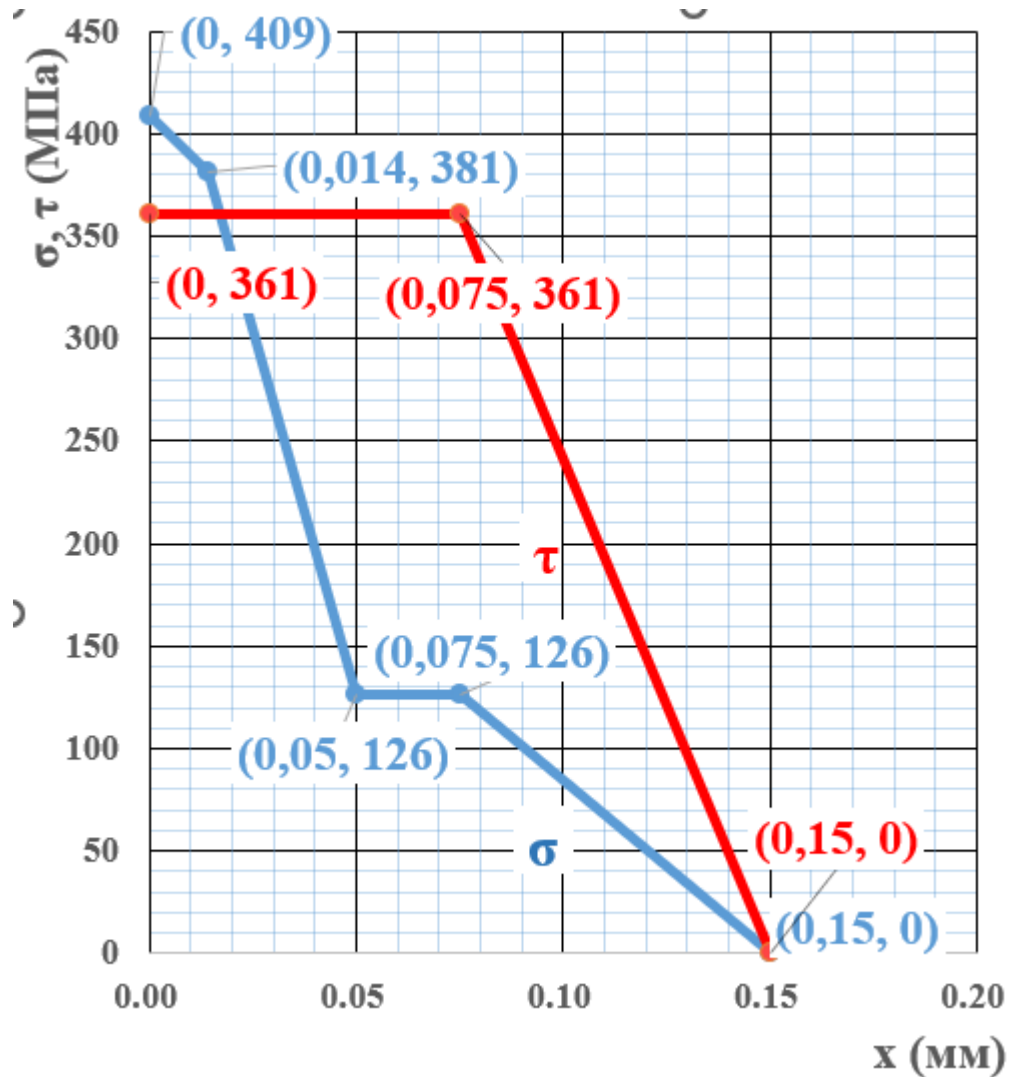


Рисунок 4.4.7– Эпюры контактных напряжений на передней поверхности при встречном фрезеровании. $z = 4$ шт., $d = 8$ мм, $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $n = 1000$ об/мин, $s_m = 56$ мм/мин, $c = 0,15$ мм, образец №1-твердый сплав.

Напряжение, действующее на каждую область вдоль оси фрезы:

$$q_{xgi} = P_{xг} / 8 = 186 / 8 = 23,25 \text{ МПа.}$$

Таблица 4.4.4– Удельные технологические силы q_{yzi} и q_{zri} (МПа) на участках передней поверхности зуба фрезы при расчёте НДС зуба. $s_m = 56$ мм/мин, $z = 4$ шт., $d = 8$ мм, $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $n = 1000$ об/мин, образец №1-твердый сплав, ширина контакта (длина контакта с заготовкой вдоль главной режущей кромки) $l_{\text{конт}}=3,1$ мм, $\gamma=7^\circ$, $\omega=40^\circ$, $c = 0,15$ мм.

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	σ_i , МПа	τ_i , МПа	q_{yri} , МПа	q_{zri} , МПа
1	2	3	4	5	6
1	0-0,014	395	361	310	436
2	0,014-0,026	338,5	361	317	380
3	0,026-0,038	253,5	361	327	296
4	0,038-0,05	168,5	361	338	211
5	0,05-0,075	126	361	343	169
6	0,075-0,1	105	301	286	141
7	0,1-0,125	63	180,5	171	85
8	0,125-0,15	21	60	57	28

Примечание: q_{yri} — напряжение, действующее на область i в радиальном направлении относительно оси фрезы, $q_{yri} = \tau_i \times \cos\gamma - \sigma_i \times \sin\gamma$, q_{zri} — напряжение, действующее на область i в тангенциальном направлении, $q_{zri} = \tau_i \times \sin\gamma + \sigma_i \times \cos\gamma$, передний угол $\gamma=7^\circ$.

Считаем, что составляющие силы действуют на площадь передней поверхности **вспомогательной** режущей кромки в виде прямоугольника шириной $b_b = 0,28$ мм и высотой $a_b = 0,4$ мм.

4.5 Исследование НДС острой фрезы

● Исследование влияния подачи на НДС

Для исследования напряженно-деформированного состояния острой фрезы для расчета используется программа ANSYS.

В программе ANSYS напряжения, действующие на главную режущую кромку, и силы, действующие на вспомогательную режущую кромку, приложатся на красную область режущей кромки, где передний угол $\gamma = 7^\circ$, задний угол $\alpha = 5^\circ$ и угол наклона главной режущей кромки $\omega = 40^\circ$ (Рис 4.5.1).

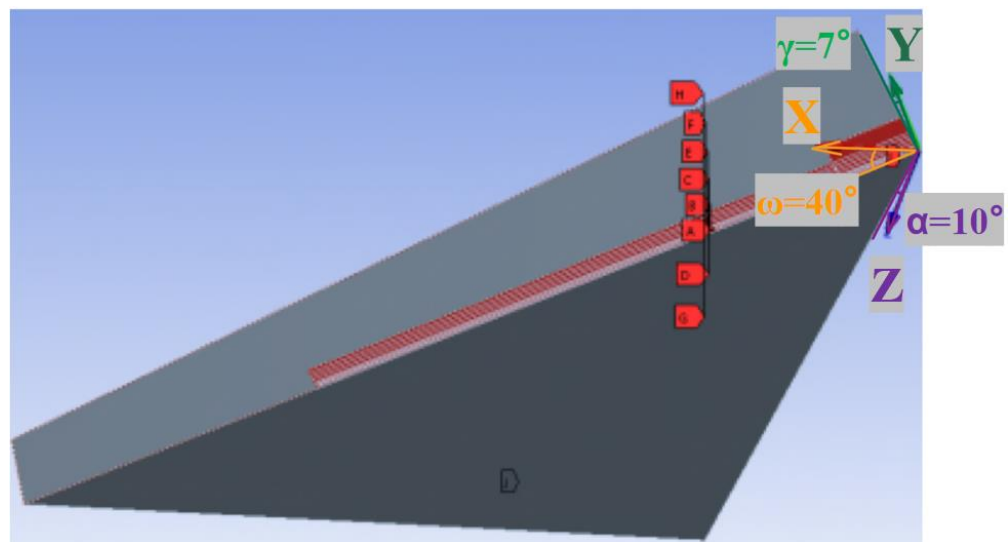
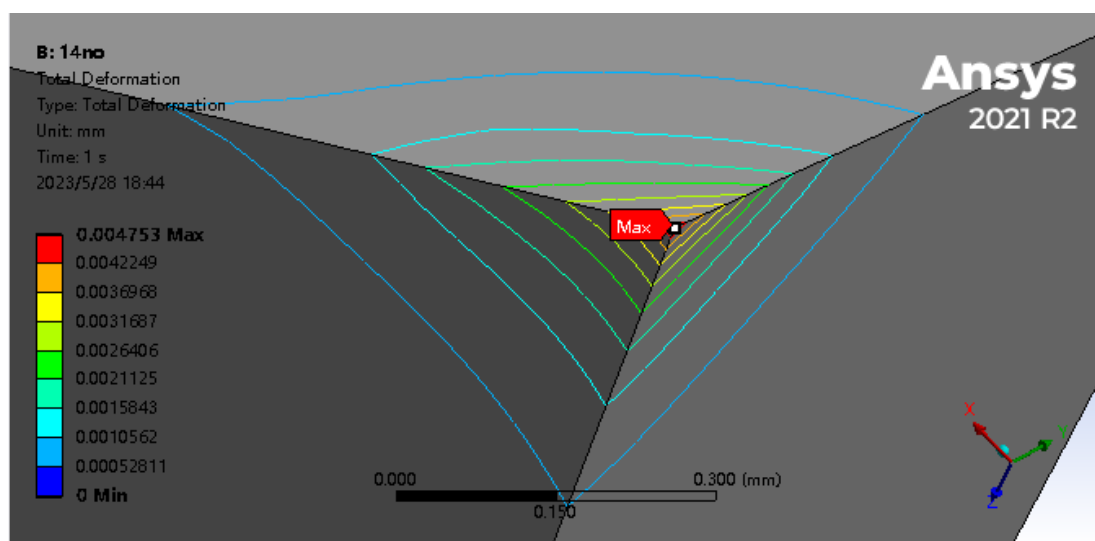
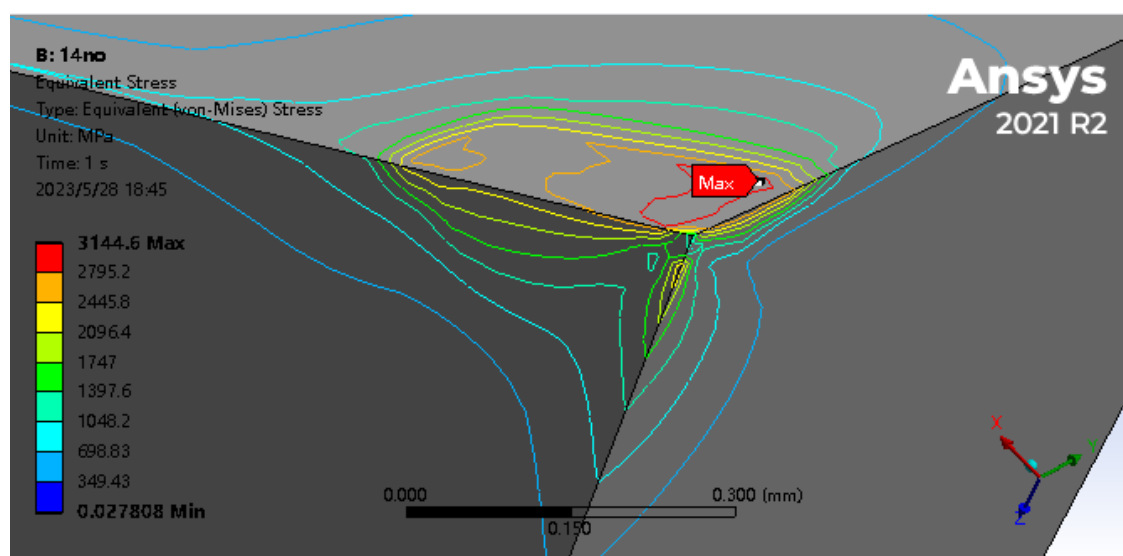


Рис 4.5.1. Приложение внешних нагрузок на режущую кромку

Результаты расчетов напряжений в режущем клине методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программы ANSYS представлены на рис.4.5.2. ÷ 4.5.4.



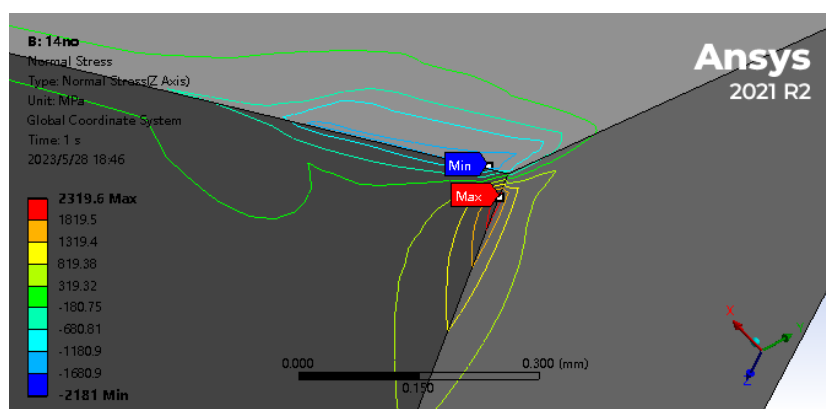
а



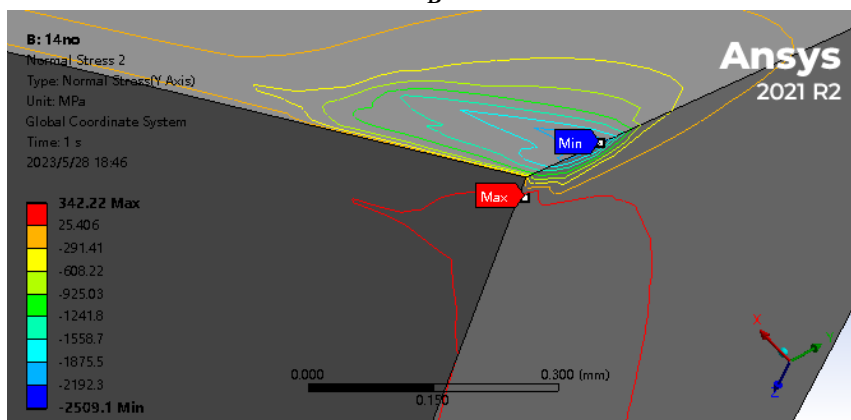
б

Рис 4.5.2– Распределение общей внутренней деформации ε (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX.

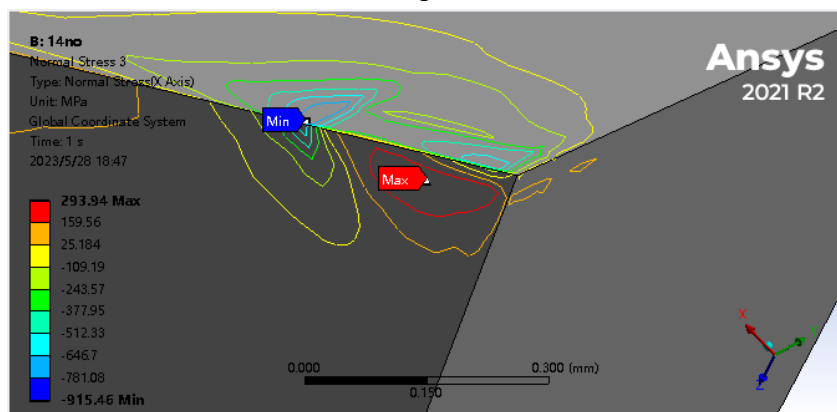
Встречное фрезерование 4-х зубной острой фрезой. $s_m = 14$ мм/мин, образец №1-твердый сплав, $d = 8$ мм, $B = 2$ мм, $t = 4$ мм, $l_{\text{конт}} = 3,1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $\omega = 40^\circ$, $n = 500$ об/мин, $c = 0,088$ мм.



Б



Г

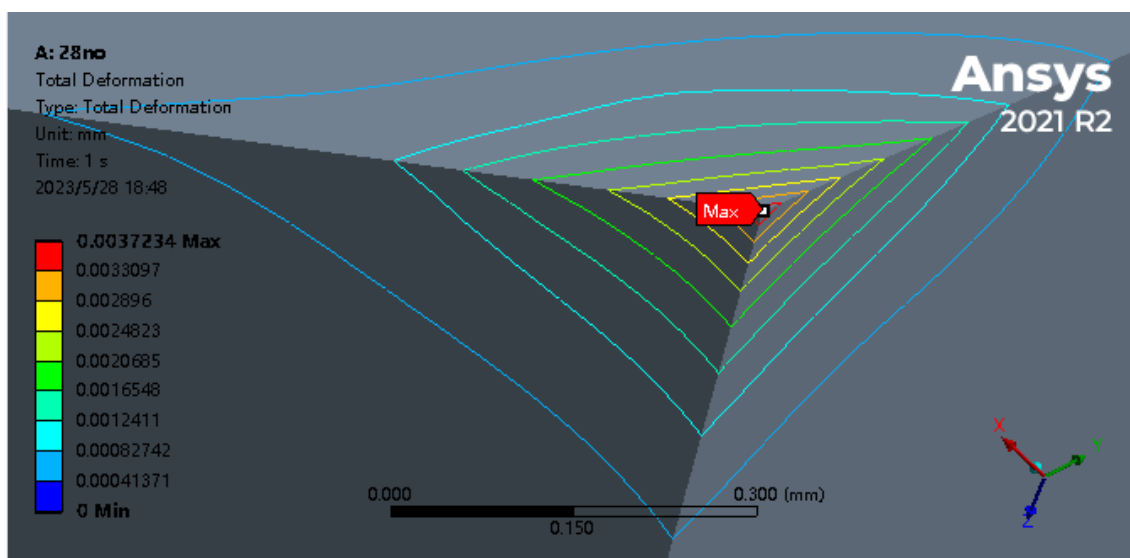


Д

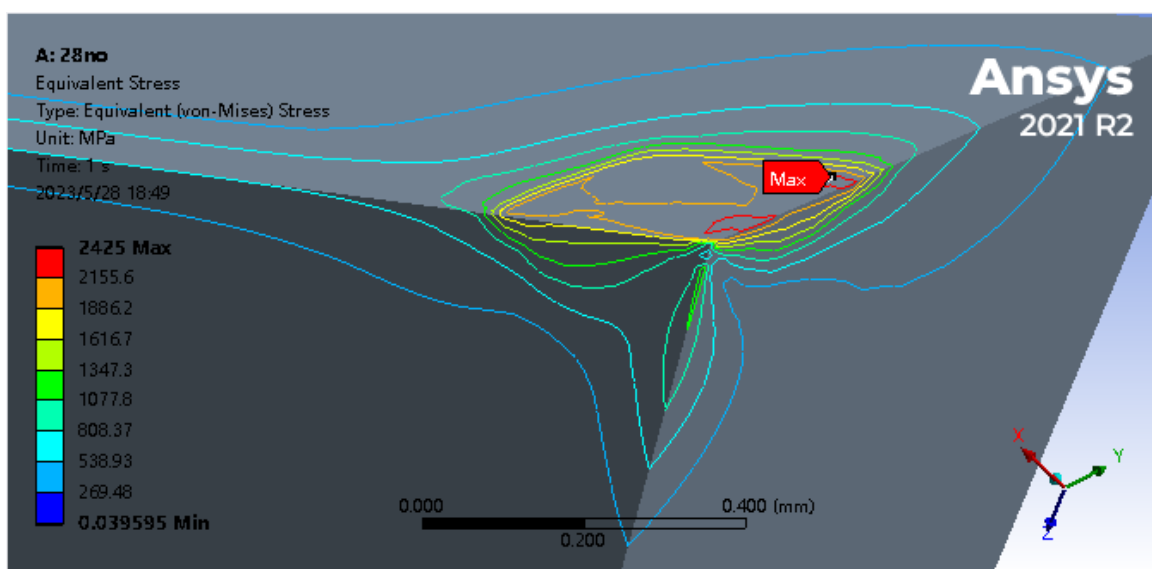
Рис 4.5.2 (продолжение)– Распределение общей внутренней деформации ε (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX.

Встречное фрезерование 4-х зубной острой фрезой. $s_m = 14$ мм/мин, образец №1-твердый сплав, $d = 8$ мм, $B = 2$ мм, $t = 4$ мм, $l_{\text{конт}} = 3,1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $\omega = 40^\circ$,

$n = 500$ об/мин, $c = 0,088$ мм.



а

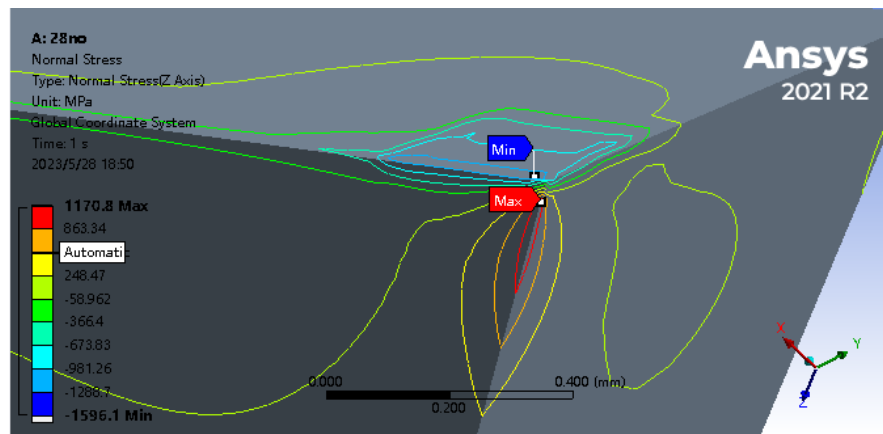


б

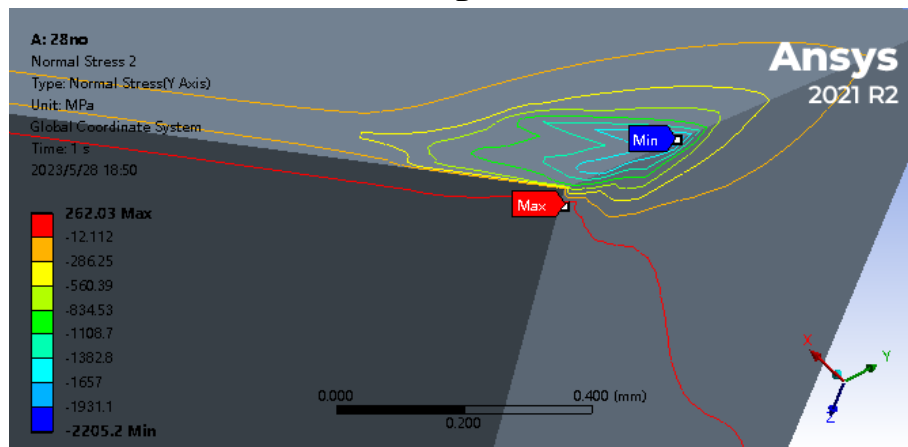
Рис 4.5.3– Распределение общей внутренней деформации ε (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX

Встречное фрезерование 4-х зубной острой фрезой. $s_m = 28$ мм/мин, образец №1-твердый сплав, $d = 8$ мм, $B = 2$ мм, $t = 4$ мм, $l_{\text{конт}} = 3,1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $\omega = 40^\circ$,

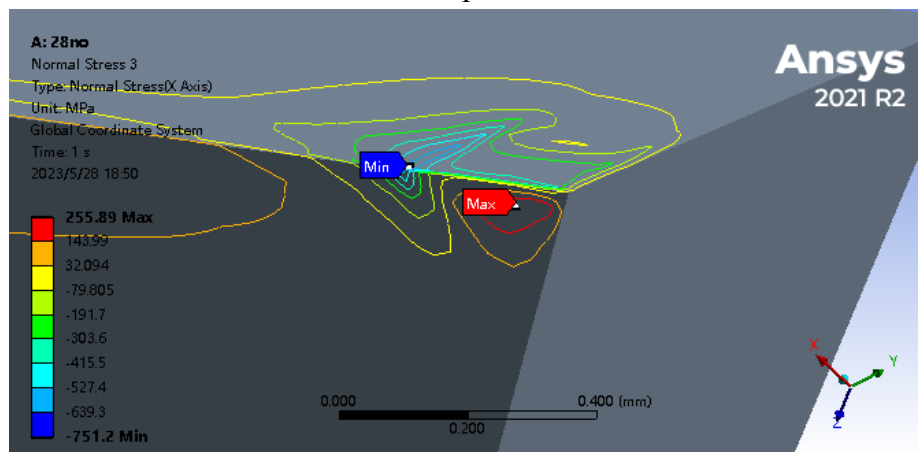
$n = 500$ об/мин, $c = 0,15$ мм.



В



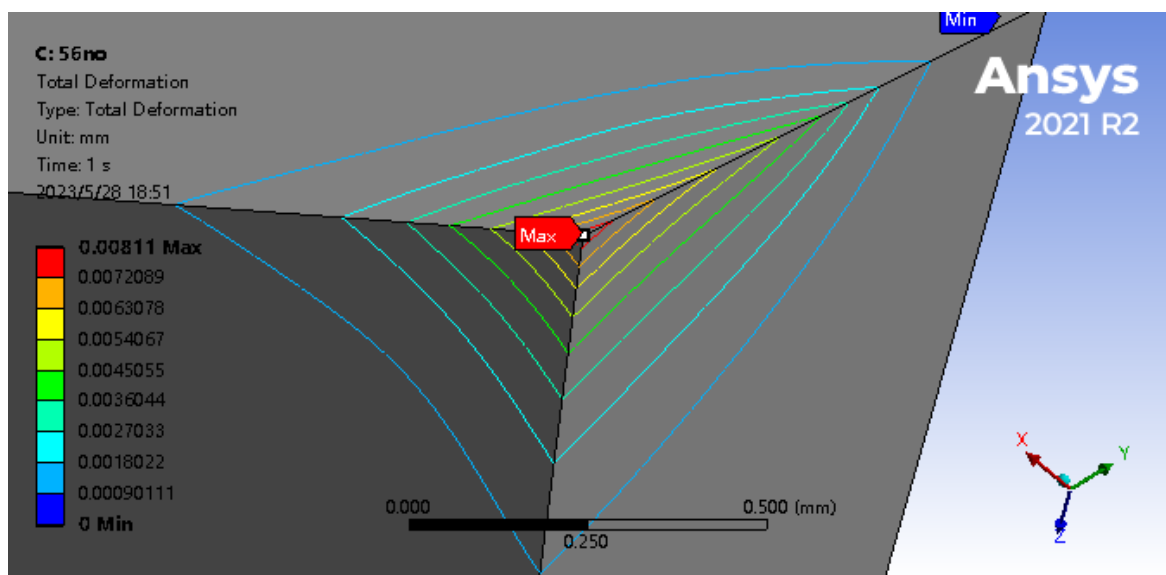
Г



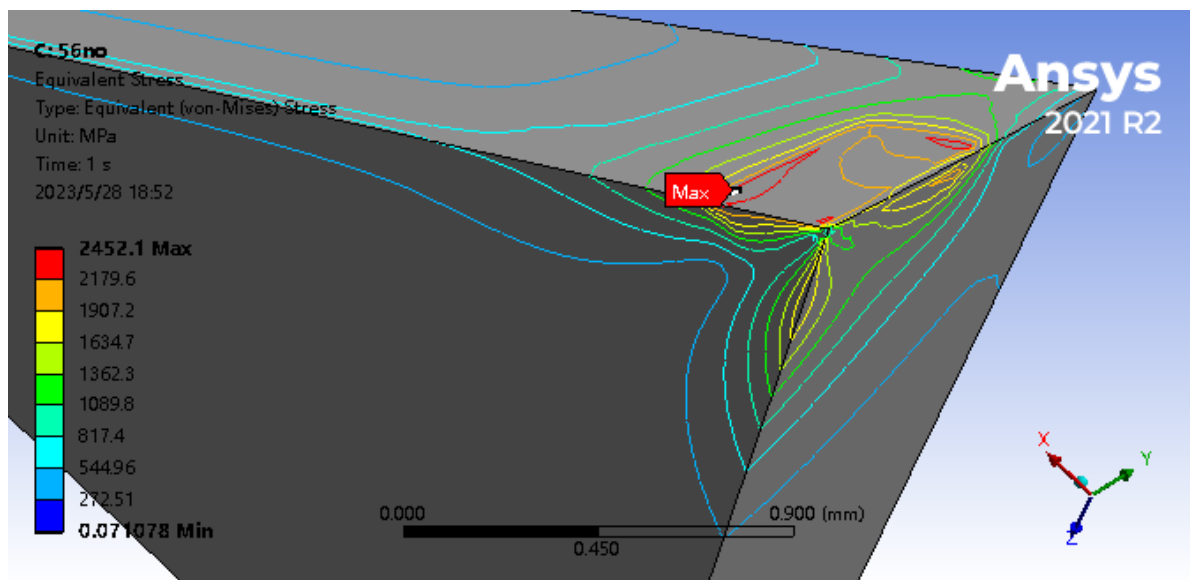
Д

Рис 4.5.3 (продолжение)– Распределение общей внутренней деформации ϵ (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX

Встречное фрезерование 4-х зубной острой фрезой. $s_m = 28$ мм/мин, образец №1-твердый сплав, $d = 8$ мм, $B = 2$ мм, $t = 4$ мм, $l_{\text{конт}} = 3,1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $\omega = 40^\circ$, $n = 500$ об/мин, $c = 0,15$ мм.



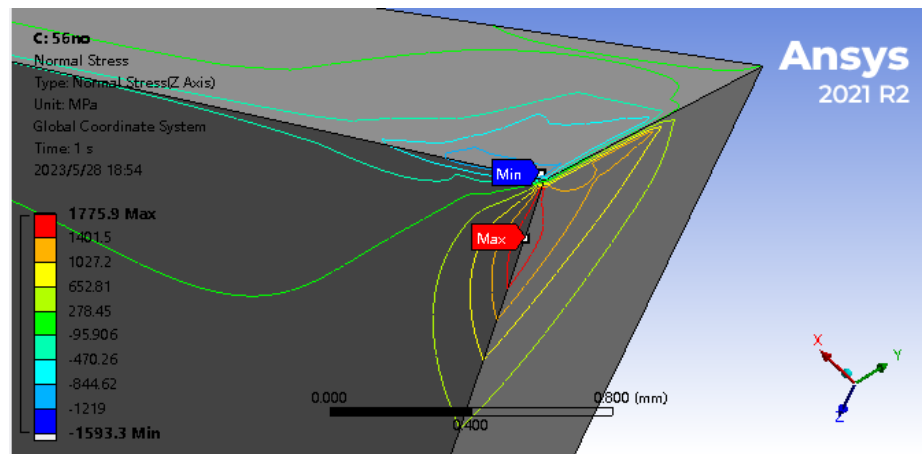
а



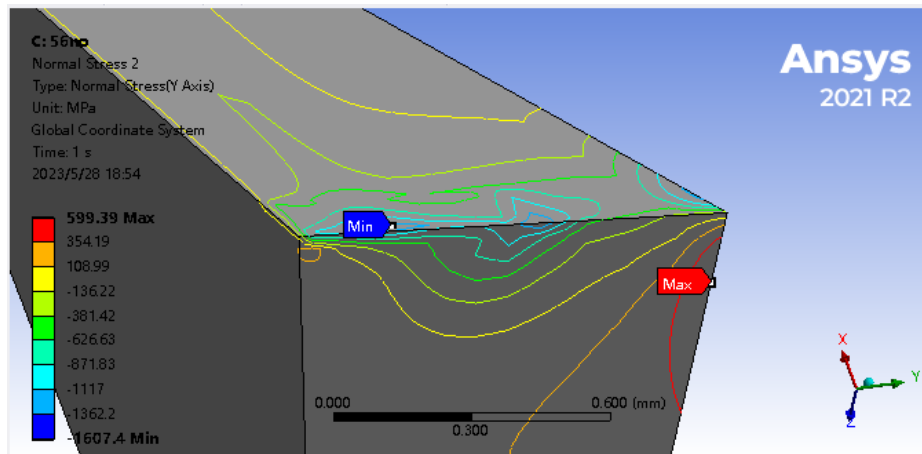
б

Рис 4.5.4–Распределение общей внутренней деформации ϵ (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX

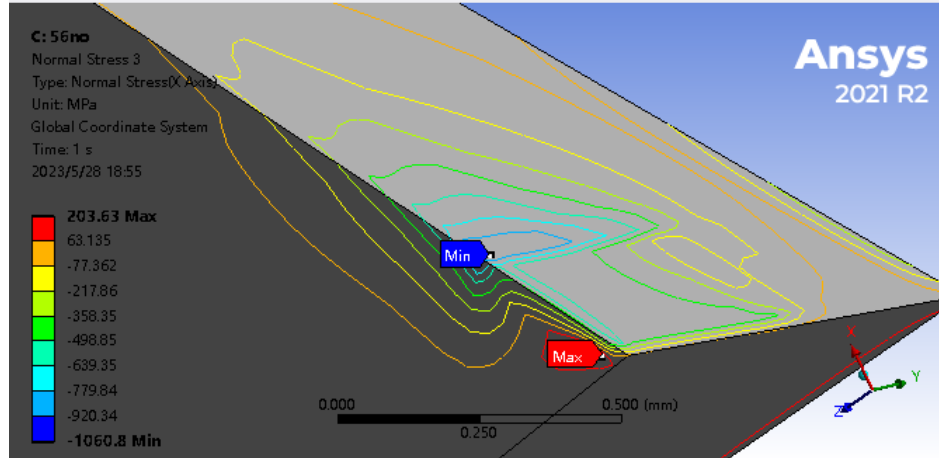
Встречное фрезерование 4-х зубной острой фрезой. $s_m = 56$ мм/мин, образец №1-твердый сплав, $d = 8$ мм, $B = 2$ мм, $t = 4$ мм, $l_{\text{конт}} = 3,1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $\omega = 40^\circ$, $n = 500$ об/мин, $c = 0,268$ мм.



Б



Г



Д

Рис 4.5.4 (продолжение)– Распределение общей внутренней деформации ϵ (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX

Встречное фрезерование 4-х зубной острой фрезой. $s_m = 56$ мм/мин, образец №1-твердый сплав, $d = 8$ мм, $B = 2$ мм, $t = 4$ мм, $l_{\text{конт}} = 3,1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $\omega = 40^\circ$,

$n = 500$ об/мин, $c = 0,268$ мм.

С увеличением подачи в минуту s_m , т.е. при подаче в минуту от 14 мм/мин до 28 мм/мин, максимальное эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$ уменьшается (рис. 4.5.5.) за счет уменьшения упругого восстановления поверхности резания и уменьшения вдавливания обрабатываемого материала под режущую кромку, и, соответственно, уменьшения контактных нагрузок со стороны режущей кромки и задней поверхности.

Также из-за увеличения контакта стружки ss передней поверхностью уменьшается максимальная общая деформация ε_{max} (рис. 4.5.6.), при этом ε_{max} приходится на пересечении главной и вспомогательной режущих кромок.

Поскольку подача в минуту

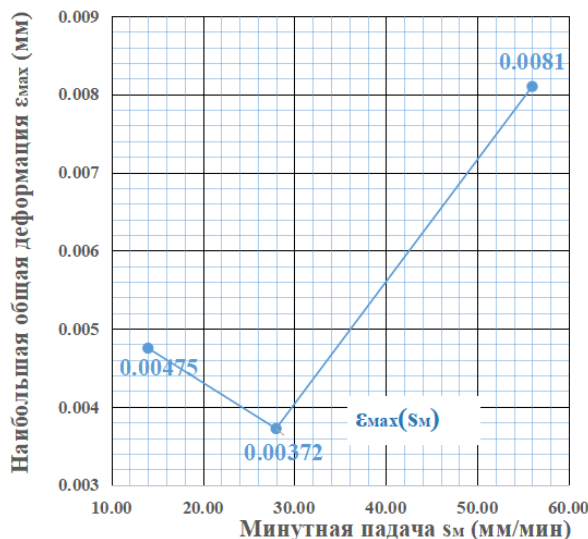


Рис 4.5.6– График влияния минутной

подачи s_m (мм/мин) на величину наибольшей деформации ε_{max} в режущем клине при встречном фрезеровании 4-х зубой острой фрезой $d = 8$ мм, $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, образец №1-твердый сплав.

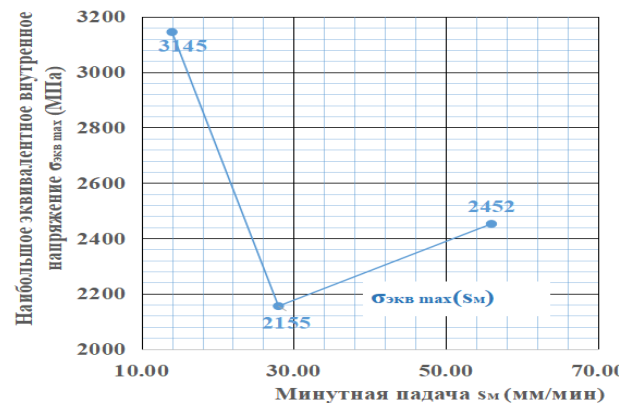


Рис 4.5.5. График влияния минутной подачи

s_m (мм/мин) на наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$, действующее в режущем клине при встречном фрезеровании 4-х зубой острой фрезой $d = 8$ мм, $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, образец №1-твердый сплав.

небольшая, силы, действующие на главную режущую кромку небольшие, максимальное эквивалентное контактное напряжение распределяется на передней поверхности вспомогательной режущей кромки и в основном определяется напряжением σ_y в радиальном направлении относительно оси фрезы.

С продолжающимся увеличением подачи в минуту s_m , т.е. при подаче в минуту от 28 мм/мин до 56 мм/мин, максимальное эквивалентное контактное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$ увеличивается за счет увеличения составляющих сил P_h , P_v , P_x , увеличивается общая деформация ε , но её наибольшая величина ε_{max} ещё приходится на пересечение главной и вспомогательной режущей кромки.

Поскольку подача в минуту большая, силы, действующие на главную режущую кромку большие, максимальное эквивалентное контактное напряжение распределяется на передней поверхности главной режущей кромки и в основном определяется напряжением вдоль оси фрезы σ_x .

● Исследование влияния частоты вращения на НДС

В программе ANSYS напряжения, действующие на главную режущую кромку, и силы, действующие на вспомогательную режущую кромку, приложатся на красную область режущей кромки, где передний угол $\gamma = 7^\circ$, задний угол $\alpha = 5^\circ$ и угол наклона главной режущей кромки $\omega = 40^\circ$ (Рис 4.5.1).

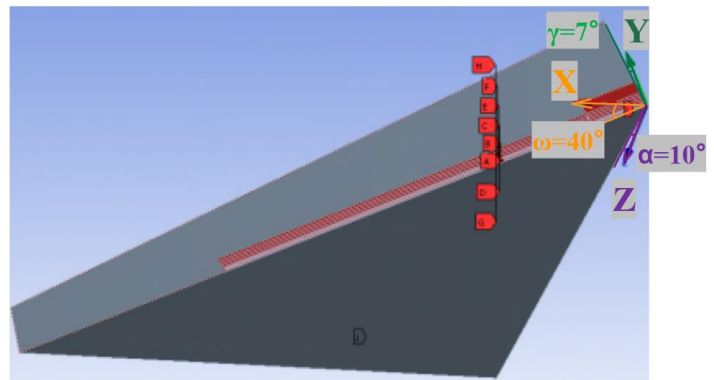
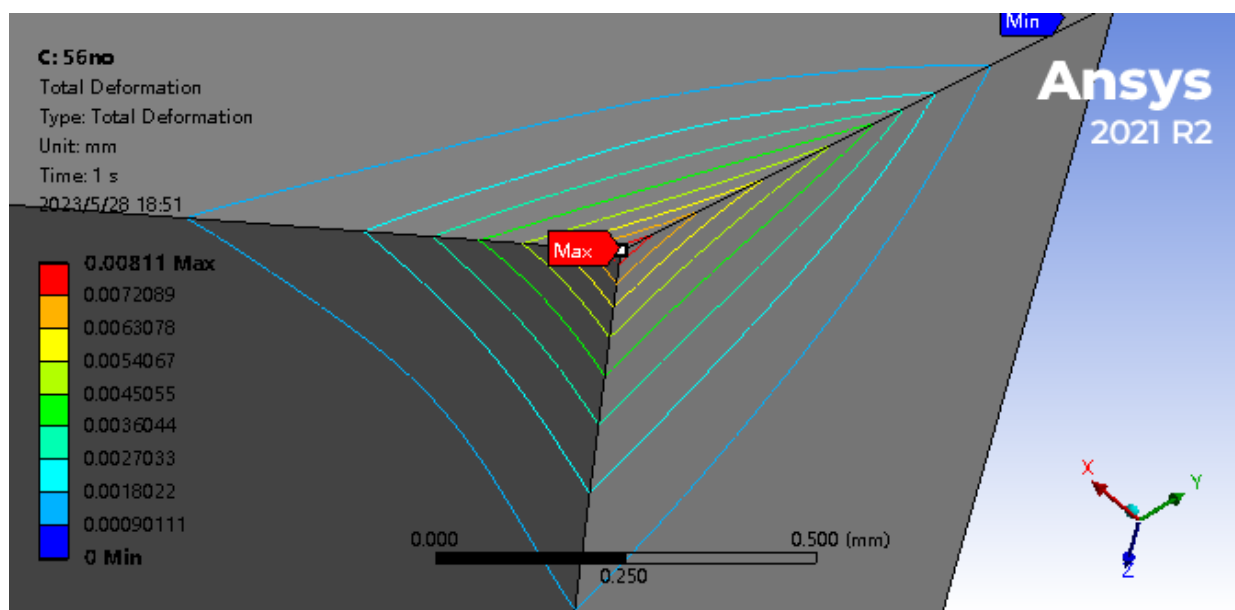
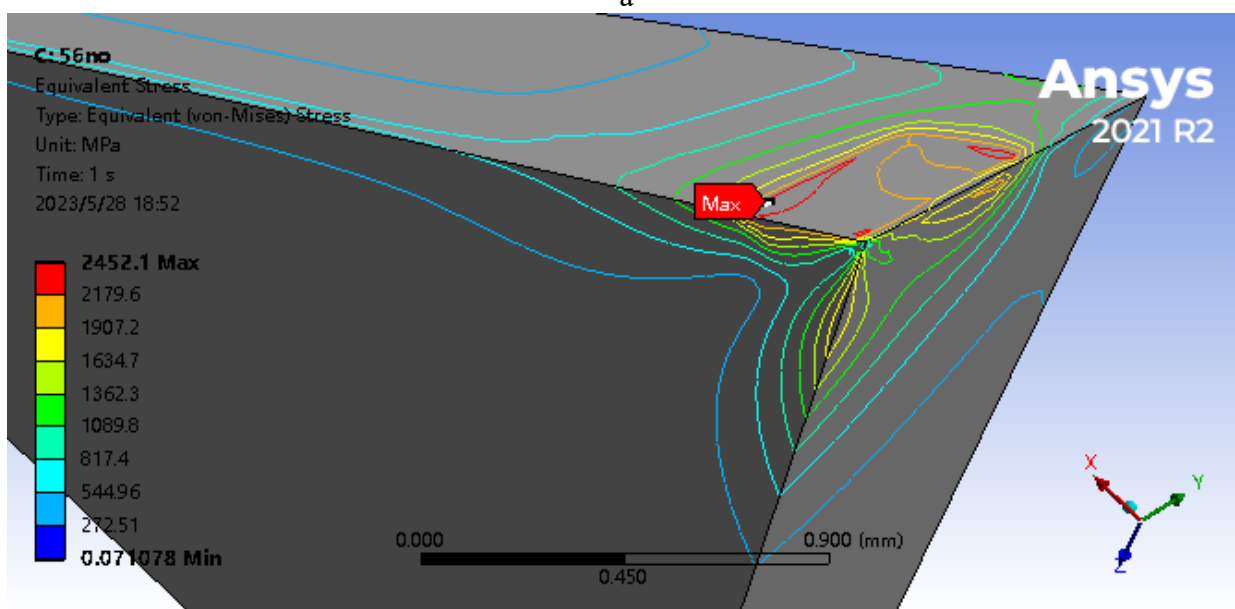


Рис 4.5.1 (дубль). Приложение внешних нагрузок на режущую кромку

Результаты расчетов напряжений в режущем клине методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программы ANSYS представлены на рис.4.5.7. ÷ 4.5.8.



a



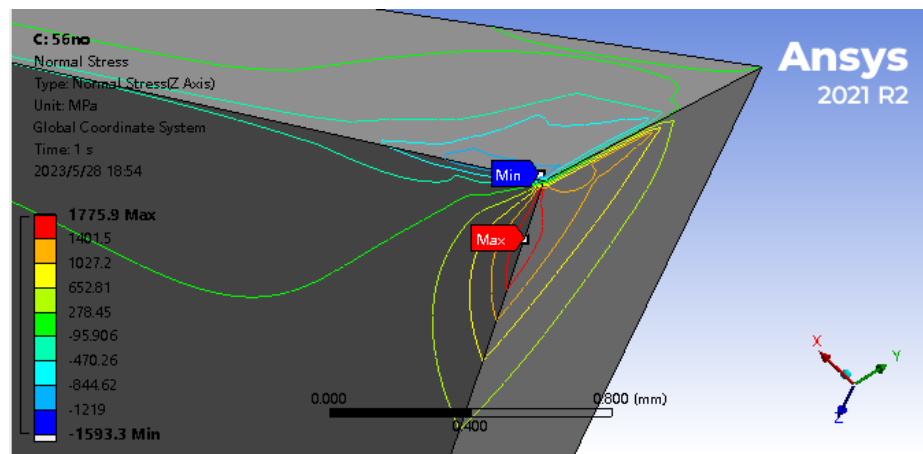
б

Рис 4.5.7–Распределение общей внутренней деформации ε (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX

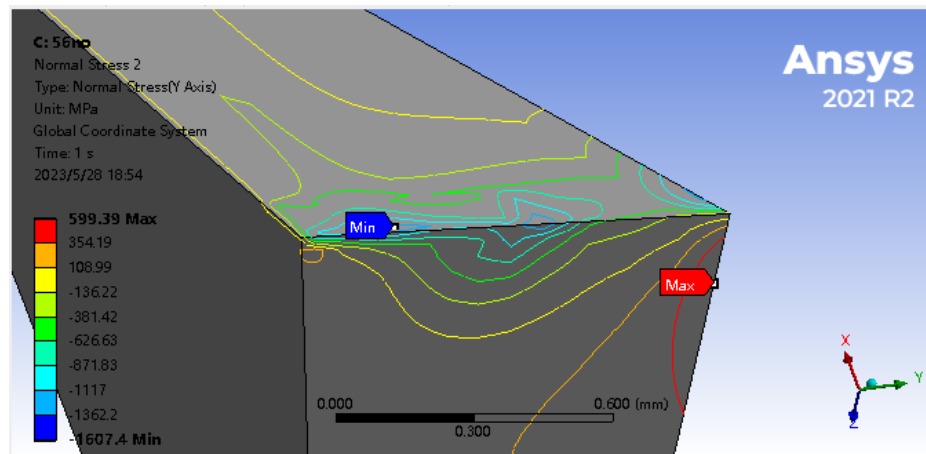
Встречное фрезерование 4-х зубной острой фрезой. $s_m = 56$ мм/мин, образец

№1-твердый сплав, $d = 8$ мм, $B = 2$ мм, $t = 4$ мм, $l_{\text{конт}} = 3,1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $\omega = 40^\circ$,

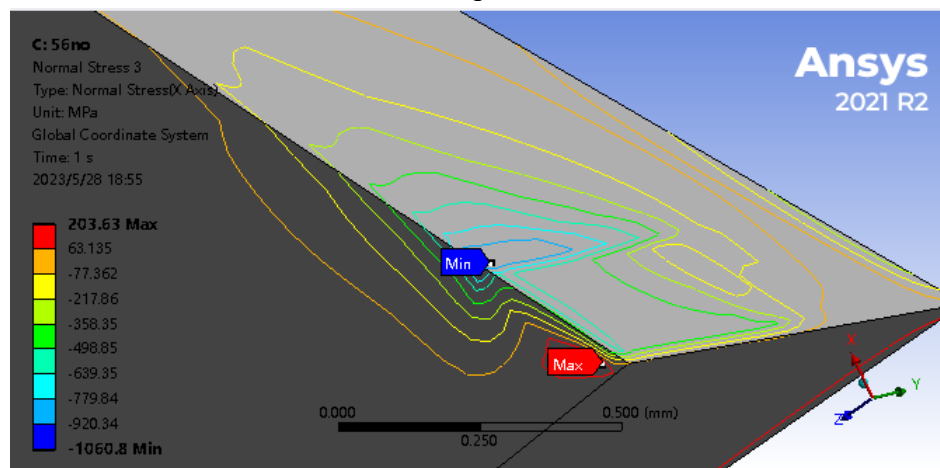
$n = 500$ об/мин, $c = 0,268$ мм.



Б



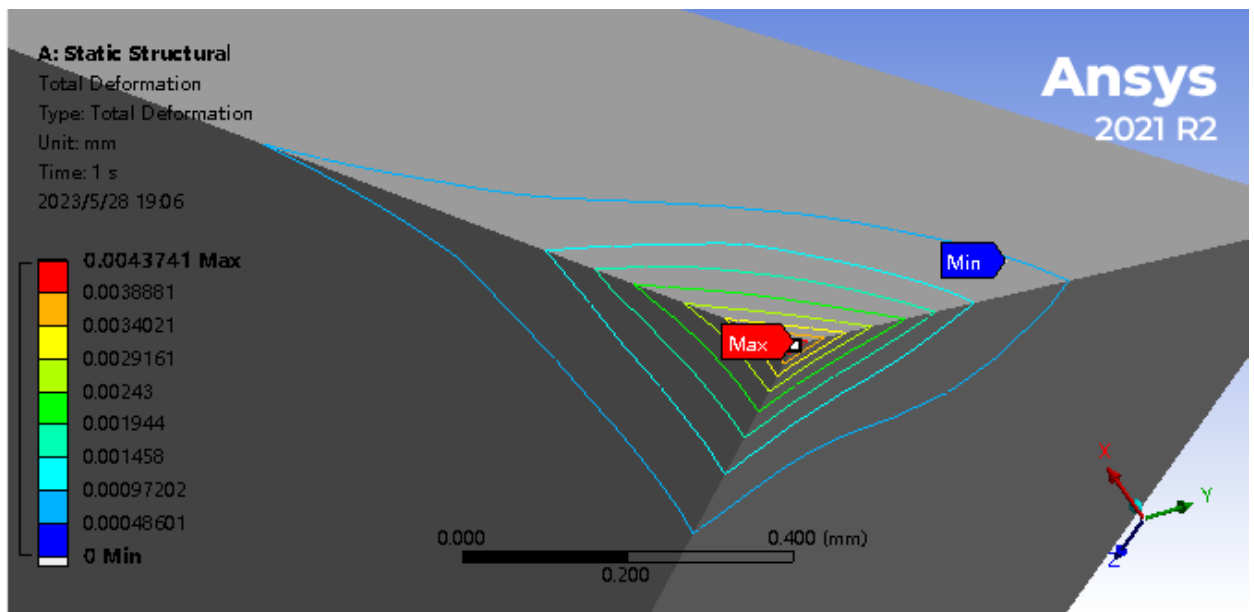
Г



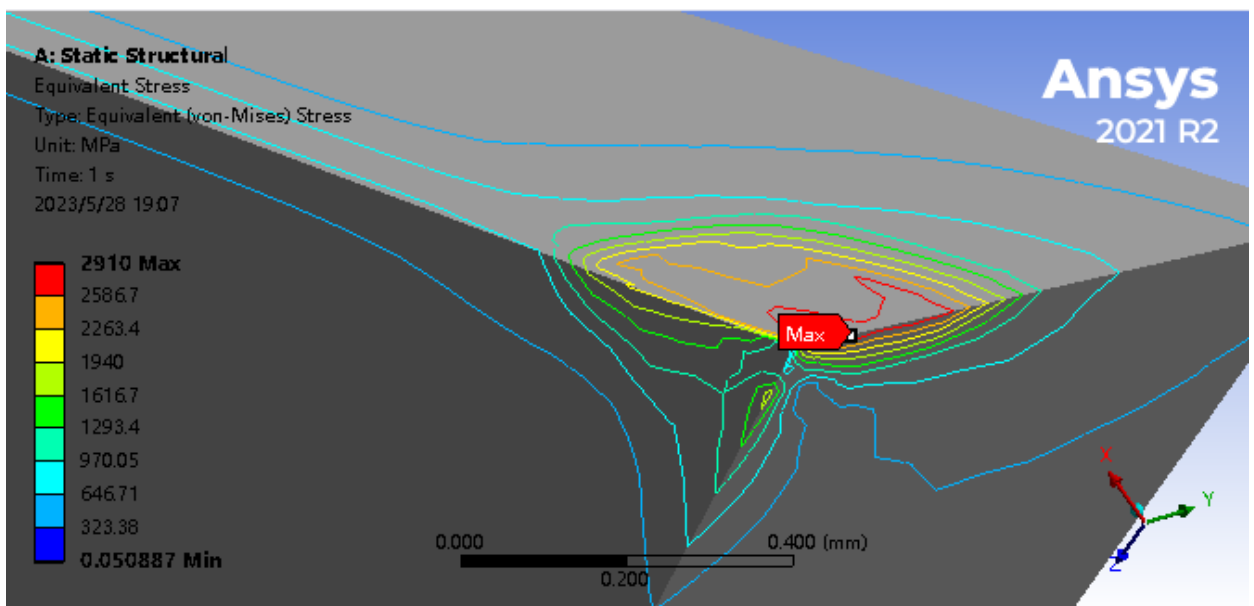
Д

Рис 4.5.7 (продолжение)– Распределение общей внутренней деформации ϵ (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX

Встречное фрезерование 4-х зубной острой фрезой. $s_m = 56$ мм/мин, образец №1-твердый сплав, $d = 8$ мм, $B = 2$ мм, $t = 4$ мм, $l_{\text{конт}} = 3,1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $\omega = 40^\circ$,
 $n = 500$ об/мин, $c = 0,268$ мм.



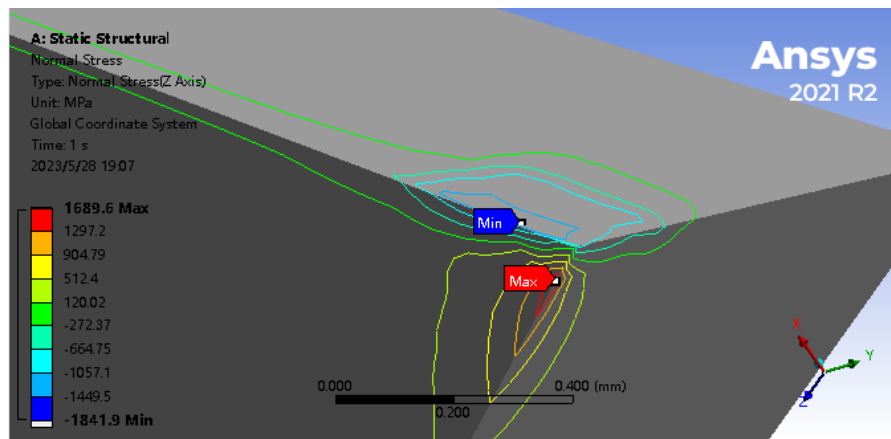
a



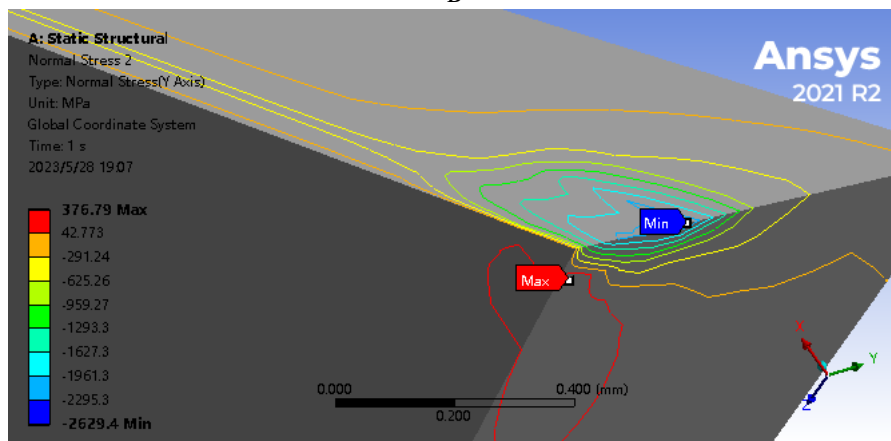
б

Рис 4.5.8–Распределение общей внутренней деформации ϵ (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX

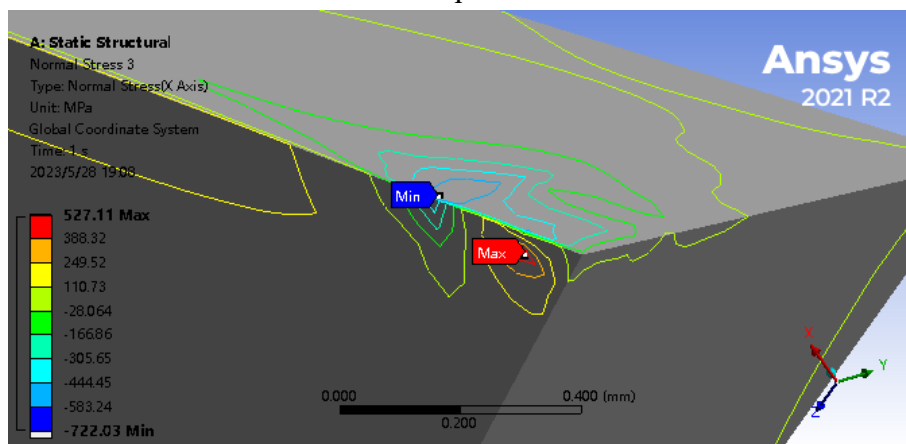
Встречное фрезерование 4-х зубной острой фрезой. $s_m = 56$ мм/мин, образец №1-твердый сплав, $d = 8$ мм, $B = 2$ мм, $t = 4$ мм, $l_{\text{конт}} = 3,1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $\omega = 40^\circ$, $n = 1000$ об/мин, $c = 0,15$ мм.



Б



Г



Д

Рис 4.5.8 (продолжение)–Распределение общей внутренней деформации ε (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX

Встречное фрезерование 4-х зубной острой фрезой. $s_m = 56$ мм/мин, образец №1-твердый сплав, $d = 8$ мм, $B = 2$ мм, $t = 4$ мм, $l_{\text{конт}} = 3,1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $\omega = 40^\circ$,

$n = 1000$ об/мин, $c = 0,15$ мм.

С увеличением частоты вращения n , т. е. при частоте вращения от 500 об/мин до 1000 об/мин, максимальное эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{эквmax}}$ увеличивается (рис. 4.5.9.). Это связано с тем, что увеличение частоты вращения n в данном случае также приводит к увеличению скорости резания, что увеличивает тепловую нагрузку на режущий инструмент и на обрабатываемый материал одновременно. Это в свою очередь

вызывает повышение температуры в зоне резания, изменение механических свойств материала и, как следствие, увеличение максимального эквивалентного напряжения. Другой фактор, вызывающий увеличение максимального эквивалентного напряжения, связан с повышением радиуса кривизны режущей кромки острой фрезы при увеличении скорости резания и частоты вращения. При этом эффекте угол направления силы резания при встречном фрезеровании увеличивается, что приводит к более высоким напряжениям в материале.

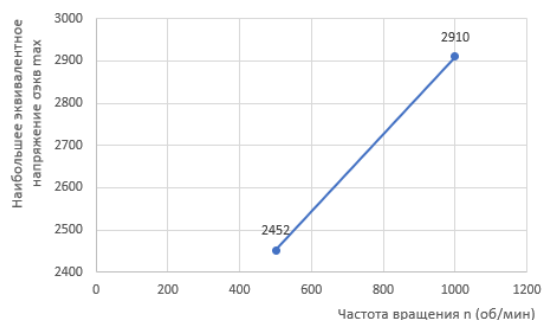


Рис 4.5.9. График влияния частоты вращения n (об/мин) на наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$, действующее в режущем клине при встречном фрезеровании 4-х зубной острой фрезой $d = 8 \text{ мм}$, $t = 4 \text{ мм}$, $B = 2 \text{ мм}$, $s_m = 56 \text{ мм/мин}$, образец №1-твердый сплав.

С увеличением частоты вращения n , т. е. при частоте вращения от 500 об/мин до 1000 об/мин, максимальная общая деформация $\epsilon_{\max}$ увеличивается (рис. 4.5.10.).

Из-за повышенной тепловой нагрузки на режущий инструмент и заготовку это приводит к изменению механических свойств материала, что приводит к увеличению общей деформации $\epsilon_{\max}$ и более высоким напряжениям, возникающим в материале, что также приводит к более высокому полной деформация $\epsilon_{\max}$.

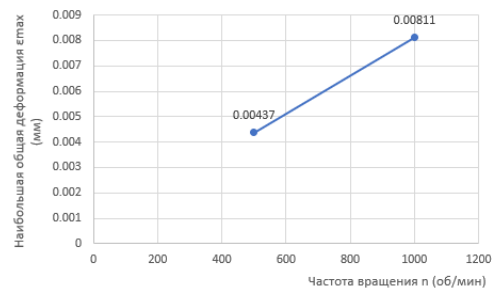


Рис 4.5.10 График влияния частоты вращения n (об/мин) на величину наибольшей деформации $\epsilon_{\max}$ в режущем клине при встречном фрезеровании 4-х зубной острой фрезой $d = 8$ мм, $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $s_m = 56$ мм/мин, образец №1-твердый сплав.

4.6 Исследование влияния подачи на НДС изношенной фрезы при наибольших нагрузках

При фрезеровании твердосплавными фрезами износ происходит в основном по уголкам ($h_{з\text{ уг}} = 1,3 \text{ мм}$), а износ по задней поверхности, примыкающей к главной режущей кромки, очень мал ($h_3 = 0,17 \text{ мм}$). Поэтому в основном исследовалось влияние на НДС износа по уголкам.

По направлению составляющей силы, показанной на рис.4.6.1, можно получить:

$$P_{v\text{ уг}} = P_{v\text{ max из}} - P_{v\text{ max}} \quad (4.6.1)$$

$$P_{h\text{ уг}} = P_{h\text{ max из}} - P_{h\text{ max}} \quad (4.6.2)$$

$$P_{x\text{ уг}} = P_{x\text{ max}} - P_{x\text{ max из}} \quad (4.6.3)$$

где $P_{h\text{ уг}}$ — максимальное значение составляющей силы, действующей на фаску износа по уголкам в направлении подачи, $P_{v\text{ уг}}$ — максимальное значение составляющей силы, действующей на фаску износа по уголкам, в направлении, перпендикулярном подаче; $P_{x\text{ уг}}$ — максимальное значение составляющей силы, действующей на фаску износа по уголкам вдоль оси фрезы; $P_{h\text{ max из}}$ — максимальное значение составляющей силы в направлении подачи при фрезеровании изношенной фрезой, $P_{v\text{ max}}$ — максимальное значение составляющей силы, перпендикулярной направлению подачи при фрезеровании изношенной фрезой; $P_{x\text{ max}}$ — максимальное значение составляющей силы вдоль оси фрезы при фрезеровании

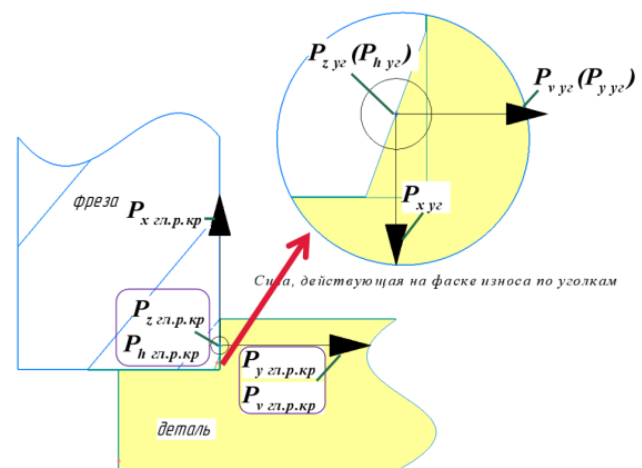


Рис 4.6.1– Направление сил $P_{v\text{ уг}}$, $P_{y\text{ уг}}$, $P_{h\text{ уг}}$, $P_{z\text{ уг}}$, действующих от фаски износа по уголкам на заготовку и направление сил $P_{x\text{ гл.р.кр.}}$, $P_{h\text{ гл.р.кр.}}$, $P_{v\text{ гл.р.кр.}}$, действующих от главной режущей кромки.

изношенной фрезой.

По эксперименту, при встречном фрезеровании 4-х зубой изношенной фрезой ($h_{з\text{ уГ}} = 1,3 \text{ мм}$, $h_з = 0,17 \text{ мм}$) $\varnothing d = 8 \text{ мм}$ с глубиной фрезерования $t = 4 \text{ мм}$, с шириной фрезерования $B = 2 \text{ мм}$, $n = 500 \text{ об/мин}$, $s_m = 28 \text{ мм/мин}$, образец №1-твердый сплав) $P_{h\text{ max}} = 580 \text{ Н}$, $P_{v\text{ max}} = 251 \text{ Н}$, $P_{x\text{ max}} = 82 \text{ Н}$. По сравнению с фрезерованием острой фрезой можно получить:

$$P_{v\text{ уГ}} = 251 - 120 = 131 \text{ Н};$$

$$P_{h\text{ уГ}} = 580 - 130 = 450 \text{ Н};$$

$$P_{x\text{ уГ}} = 160 - 82 = 78 \text{ Н}.$$

Т. к. измерить величину контактного напряжения, действующего на фаске износа по уголкам, невозможно по существующему состоянию измерительной техники и методам измерения, принимаем, что контактные напряжения равномерно распределяется на фаске износа по уголкам. К концу периода стойкости T наибольшая длина износа $h_{\text{уГ}} = 1,3 \text{ мм}$, наибольшая ширина износа $b_{\text{уГ}} = 0,4 \text{ мм}$. Рассчитываем

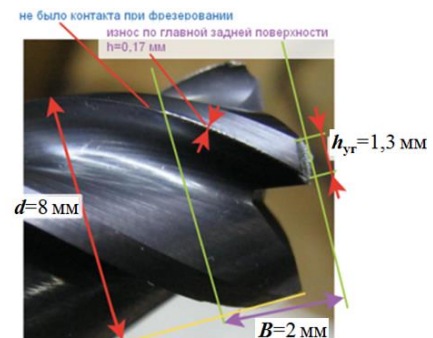


Рис 4.6.2 Зоны износа концевой твёрдосплавной фрезы при встречном фрезеровании 4-х зубой фрезой $d = 8 \text{ мм}$, $t = 4 \text{ мм}$, $B = 2 \text{ мм}$, $n = 500 \text{ об/мин}$, образец №1-твердый сплав.

нормальное $\sigma_{\text{уГ}}$ и касательное $\tau_{\text{уГ}}$ средние контактные напряжения, действующие на фаске износа по уголкам.

$$\sigma_{\text{уГ}} = q_{h\text{ уГ}} = P_{h\text{ уГ}} / (h_{\text{уГ}} \times b_{\text{уГ}}) = 450 / (1,3 \times 0,4) = 865 \text{ МПа};$$

$$\tau_{\text{уГ}} = q_{v\text{ уГ}} = P_{v\text{ уГ}} / (h_{\text{уГ}} \times b_{\text{уГ}}) = 131 / (1,3 \times 0,4) = 252 \text{ МПа};$$

$$q_{x\text{ уГ}} = P_{x\text{ уГ}} / (h_{\text{уГ}} \times b_{\text{уГ}}) = 78 / (1,3 \times 0,4) = 150 \text{ МПа}.$$

По эксперименту, при встречном фрезеровании 4-х зубой изношенной фрезой $\varnothing d = 8 \text{ мм}$ с глубиной фрезерования $t = 4 \text{ мм}$, с шириной фрезерования $B = 2 \text{ мм}$, $n = 500 \text{ об/мин}$, (образец №1-твердый сплав) $s_m = 14 \text{ мм/мин}$ $P_{h\text{ max}} = 400 \text{ Н}$, $P_{v\text{ max}} = 142 \text{ Н}$, $P_{x\text{ max}} = 50 \text{ Н}$.

$$P_{v \text{ уГ}} = 142 - 75 = 67 \text{ Н};$$

$$P_{h \text{ уГ}} = 400 - 88 = 312 \text{ Н};$$

$$P_{x \text{ уГ}} = 145 - 50 = 95 \text{ Н}.$$

$$\sigma_{\text{уГ}} = q_{h \text{ уГ}} = P_{h \text{ уГ}} / (h_{\text{уГ}} \times b_{\text{уГ}}) = 312 / (1,3 \times 0,4) = 600 \text{ МПа};$$

$$\tau_{\text{уГ}} = q_{v \text{ уГ}} = P_{v \text{ уГ}} / (h_{\text{уГ}} \times b_{\text{уГ}}) = 67 / (1,3 \times 0,4) = 128 \text{ МПа};$$

$$q_{x \text{ уГ}} = P_{x \text{ уГ}} / (h_{\text{уГ}} \times b_{\text{уГ}}) = 95 / (1,3 \times 0,4) = 183 \text{ МПа}.$$

По эксперименту, при встречном фрезеровании 4-х зубой изношенной фрезой $\varnothing d = 8 \text{ мм}$ с глубиной фрезерования $t = 4 \text{ мм}$, с шириной фрезерования $B = 2 \text{ мм}$, $n = 500 \text{ об/мин}$, (образец №1-твердый сплав) $s_m = 56 \text{ мм/мин}$, $P_{h \text{ max}} = 692 \text{ Н}$, $P_{v \text{ max}} = 320 \text{ Н}$, $P_{x \text{ max}} = 110 \text{ Н}$.

$$P_{v \text{ уГ}} = 320 - 216 = 104 \text{ Н};$$

$$P_{h \text{ уГ}} = 692 - 180 = 512 \text{ Н};$$

$$P_{x \text{ уГ}} = 180 - 110 = 70 \text{ Н}.$$

$$\sigma_{\text{уГ}} = q_{h \text{ уГ}} = P_{h \text{ уГ}} / (h_{\text{уГ}} \times b_{\text{уГ}}) = 512 / (1,3 \times 0,4) = 985 \text{ МПа};$$

$$\tau_{\text{уГ}} = q_{v \text{ уГ}} = P_{v \text{ уГ}} / (h_{\text{уГ}} \times b_{\text{уГ}}) = 104 / (1,3 \times 0,4) = 200 \text{ МПа};$$

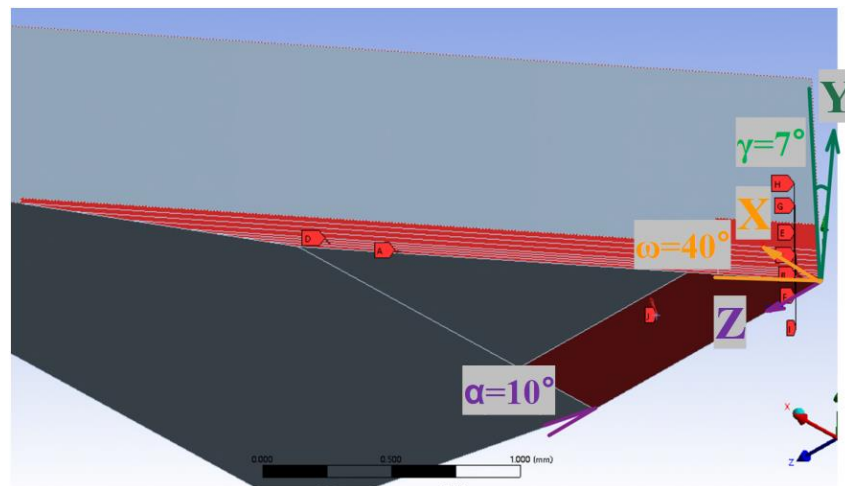


Рис. 4.6.3. Приложение внешних нагрузок на переднюю поверхность зуба концевой фрезы, фаску износа задней поверхности, примыкающую к главной режущей кромки, и фаску износа по уголкам

$$q_{x \text{ уГ}} = P_{x \text{ уГ}} / (h_{\text{уГ}} \times b_{\text{уГ}}) = 70 / (1,3 \times 0,4) = 135 \text{ МПа}.$$

В программе ANSYS напряжения, действующие на главную режущую

кромку, и силы, действующие на вспомогательную режущую кромку, прилагаются на в 3D модели на красную область режущей кромки (рис. 4.6.3), где передний угол $\gamma = 7^\circ$, задний угол $\alpha = 5^\circ$ и угол наклона главной режущей кромки $\omega = 40^\circ$, фаска износа по уголкам длиной $h_{yt} = 1,3$ мм, шириной $b_{yt} = 0,4$ мм, $h_3 = 0,17$ мм.

Результаты расчетов напряжений в режущем клине методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программы ANSYS представлены на рис.4.6.4. ÷4.6.6.

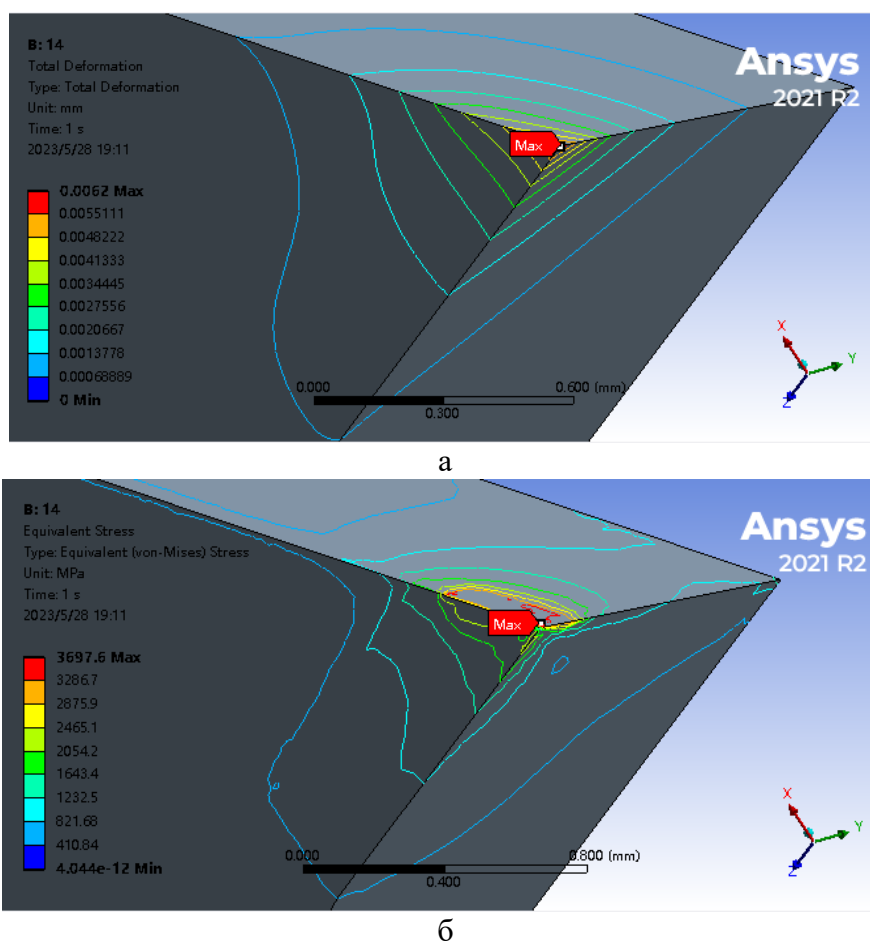
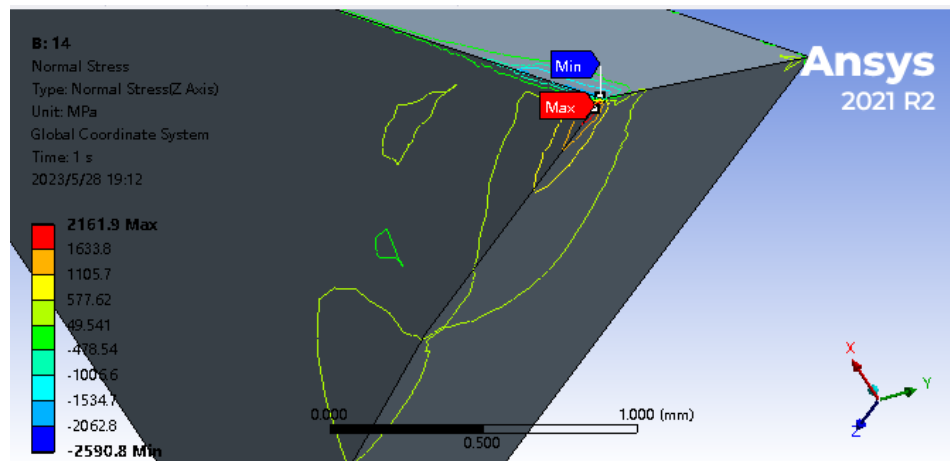
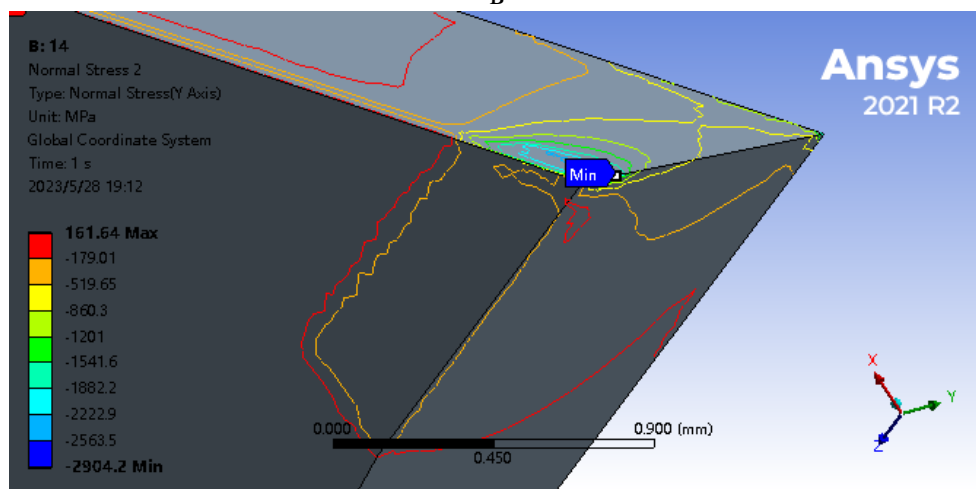


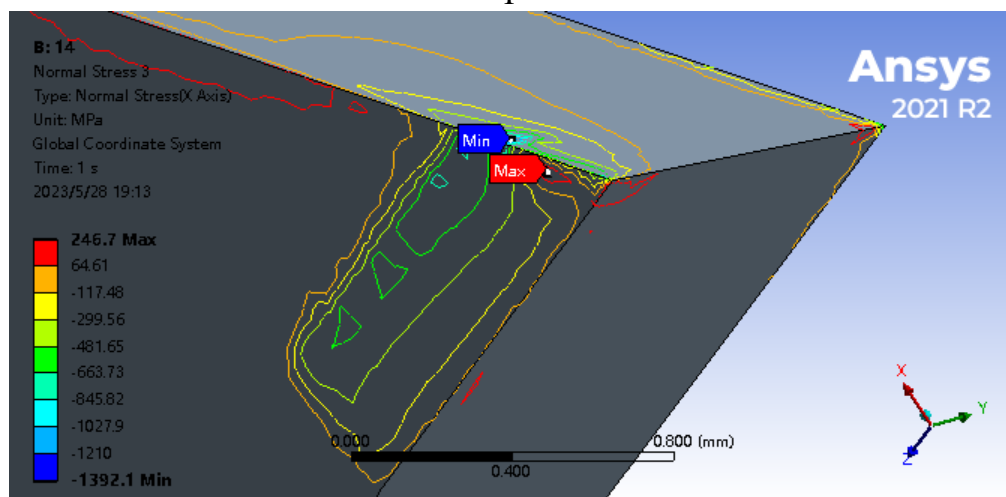
Рис 4.6.4. Распределение общей деформации ϵ (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX. Встречное фрезерование 4-х зубой изношенной фрезой $d = 8$ мм, $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, $s_m = 14$ мм/мин, $h_3 = 0,17$ мм, $h_{yt} = 1,3$ мм, образец №1-твердый сплав.



В

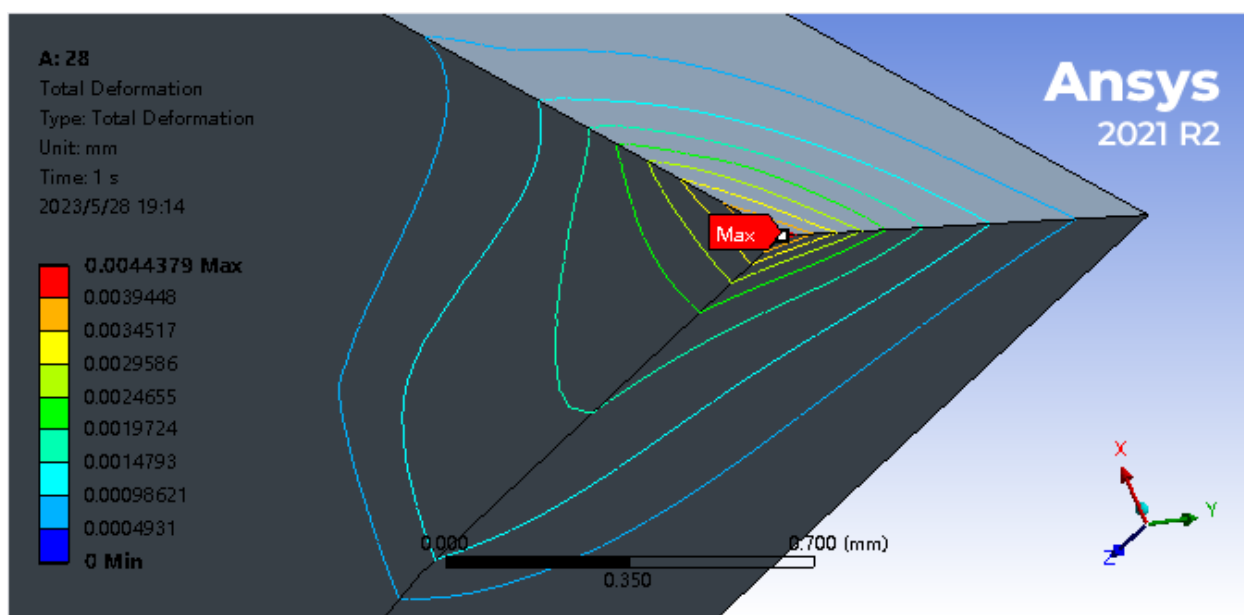


Г

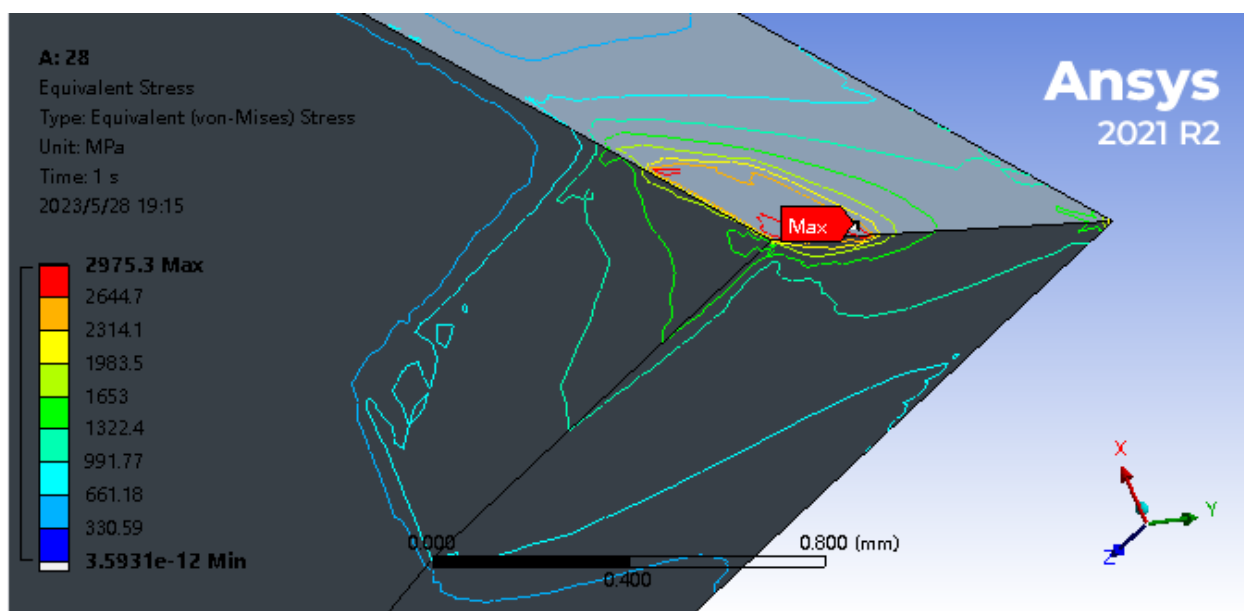


Д

Рис 4.6.4.(продолжение) Распределение общей деформации ε (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX. Встречное фрезерование 4-х зубой изношенной фрезой $d = 8$ мм, $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, $s_m = 14$ мм/мин, $h_3 = 0,17$ мм, $h_{\text{YT}} = 1,3$ мм, образец №1-твердый сплав.

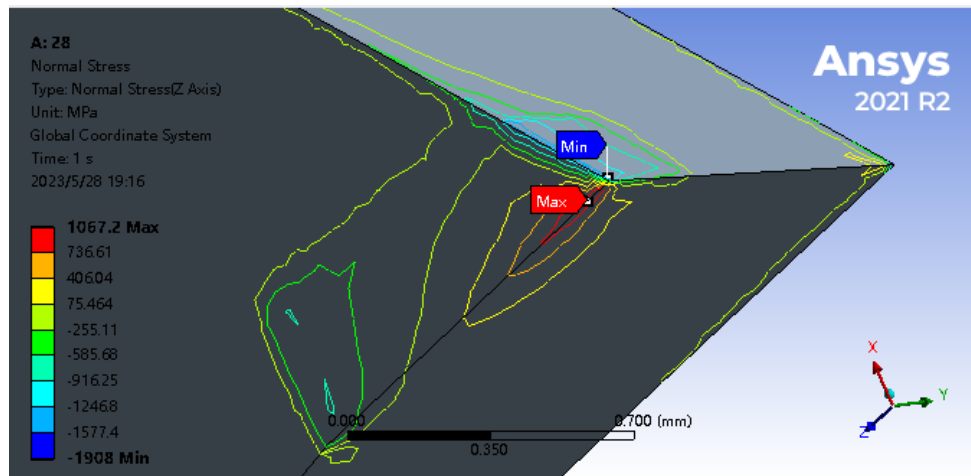


a

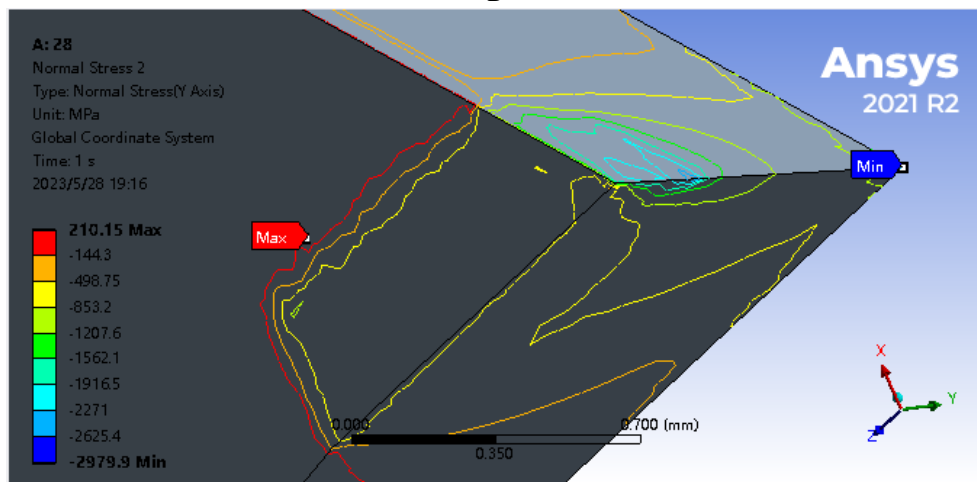


б

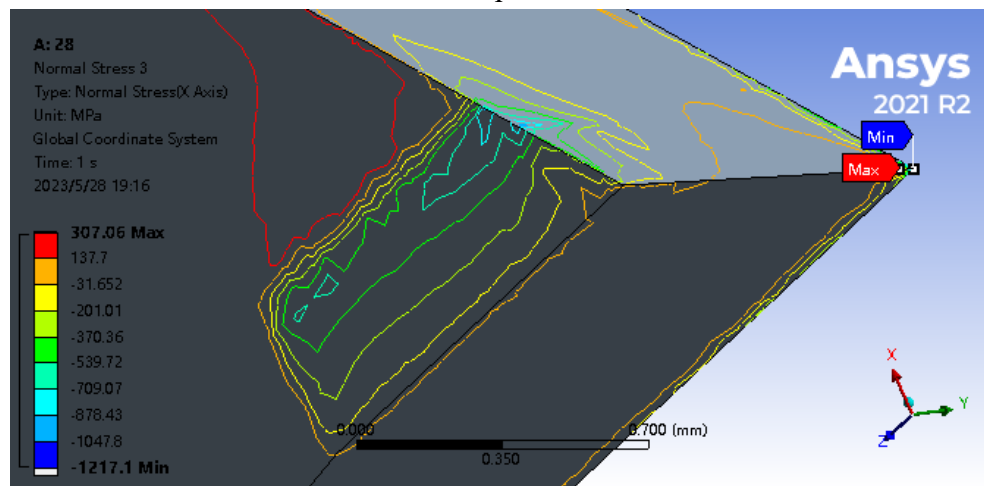
Рис 4.6.5. Распределение общей деформации ϵ (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX. Встречное фрезерование 4-х зубой изношенной фрезой $d = 8$ мм, $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, $s_m = 28$ мм/мин, $h_3 = 0,17$ мм, $h_{yT} = 1,3$ мм, образец №1-твердый сплав.



Б

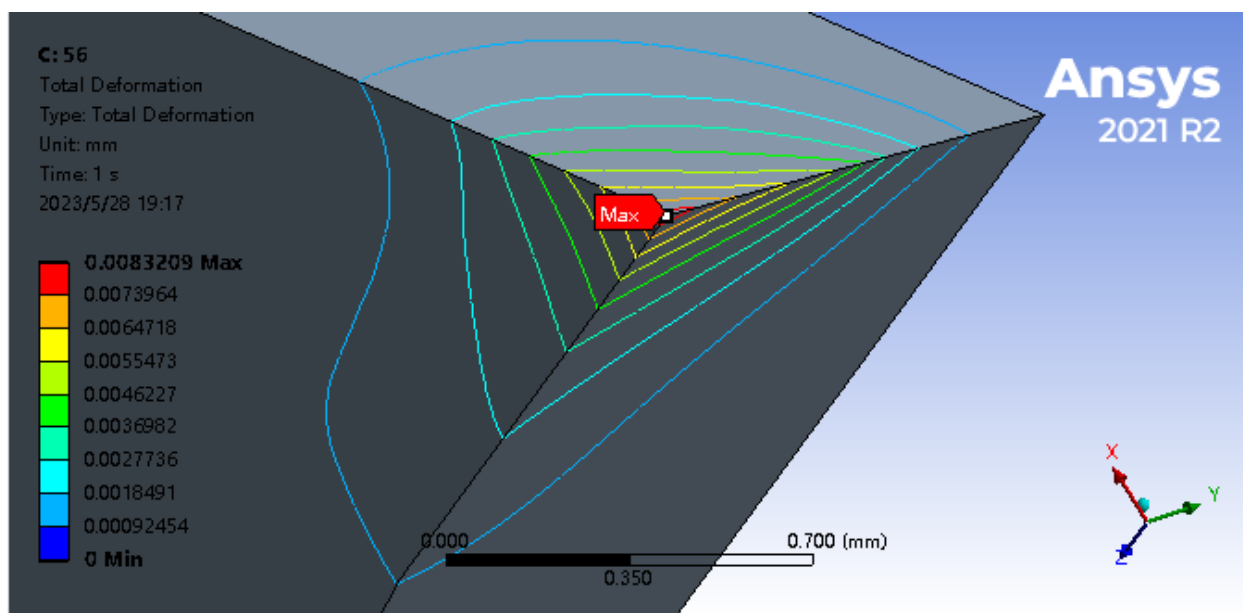


Г

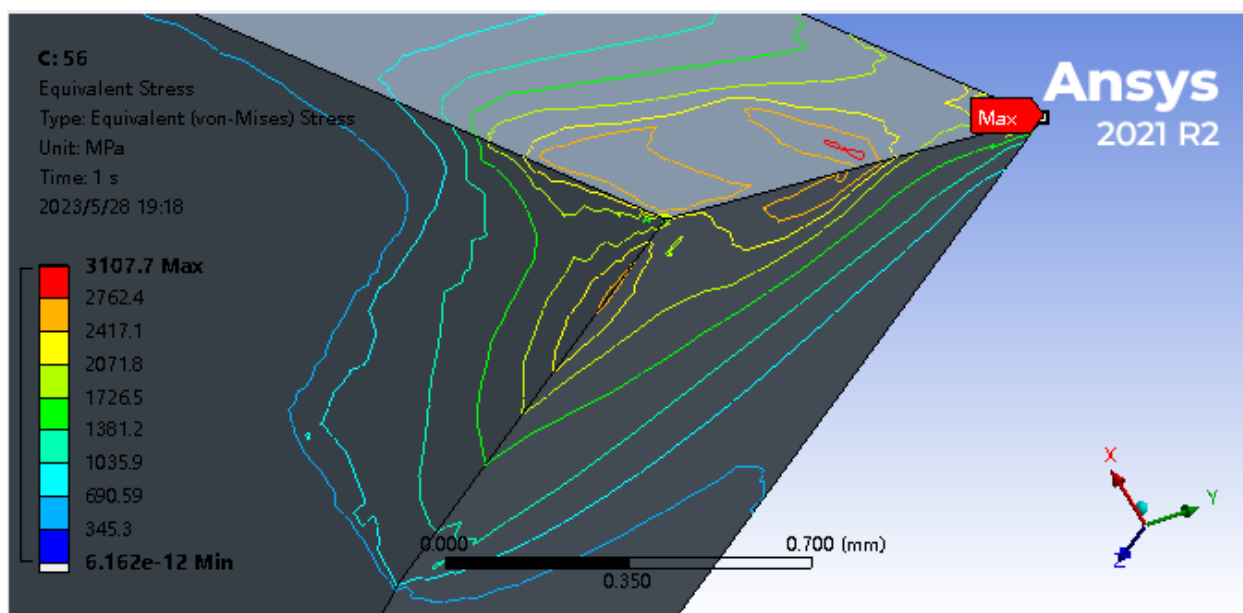


Д

Рис 4.6.5.(продолжение) Распределение общей деформации ε (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX. Встречное фрезерование 4-х зубой изношенной фрезой $d = 8$ мм, $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, $s_m = 28$ мм/мин, $h_3 = 0,17$ мм, $h_{\text{гТ}} = 1,3$ мм, образец №1-твердый сплав.

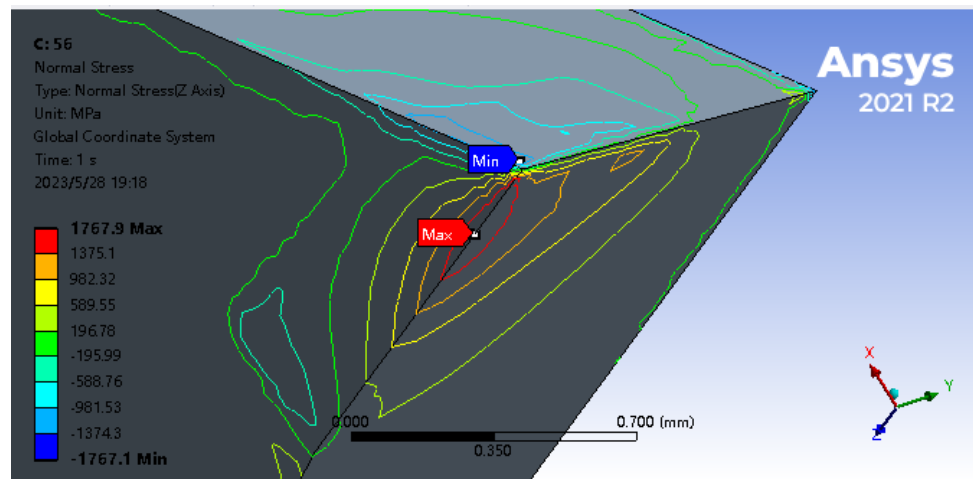


a

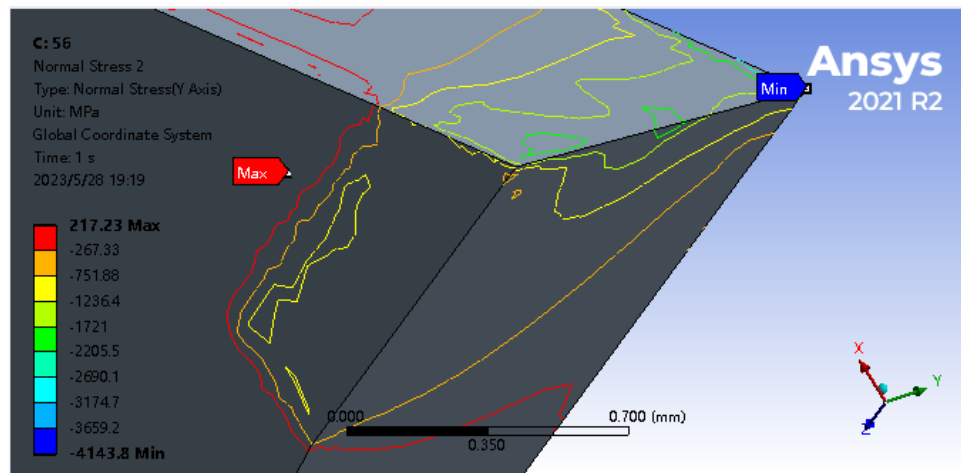


б

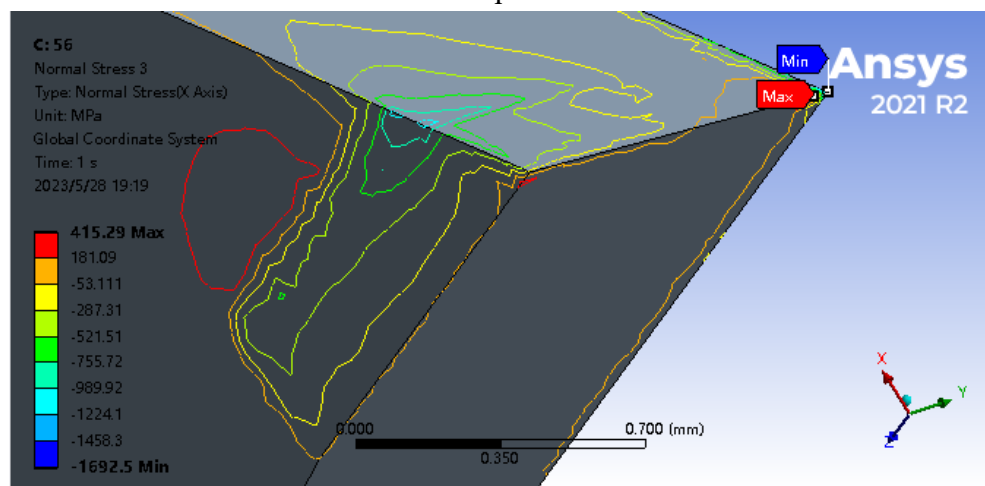
Рис 4.6.6. Распределение общей деформации ϵ (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX. Встречное фрезерование 4-х зубой изношенной фрезой $d = 8$ мм, $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, $s_m = 56$ мм/мин, $h_z = 0,17$ мм, $h_{\text{уг}} = 1,3$ мм, образец №1-твердый сплав.



Б



Г



Д

Рис 4.6.6.(продолжение) Распределение общей деформации ϵ (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX. Встречное фрезерование 4-х зубой изношенной фрезой $d = 8$ мм, $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, $s_m = 56$ мм/мин, $h_z = 0,17$ мм, $h_{\text{уг}} = 1,3$ мм, образец №1-твердый сплав.

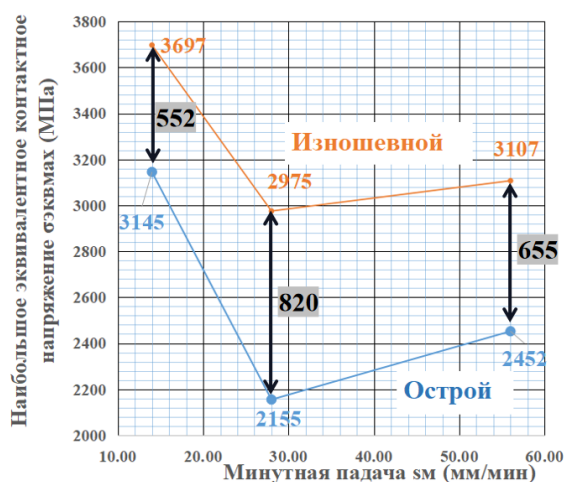


Рисунок 4.6.7. График влияния минутной подачи s_m (мм) на наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$, действующие в режущем клине при встречном фрезеровании 4-х зубной острой и изношенной фрезой $\varnothing d = 8$ мм.

Образец №1 (40X13) – твердый сплав $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, $h_z = 0,17$ мм, $h_{\text{уг}} = 1,3$ мм.

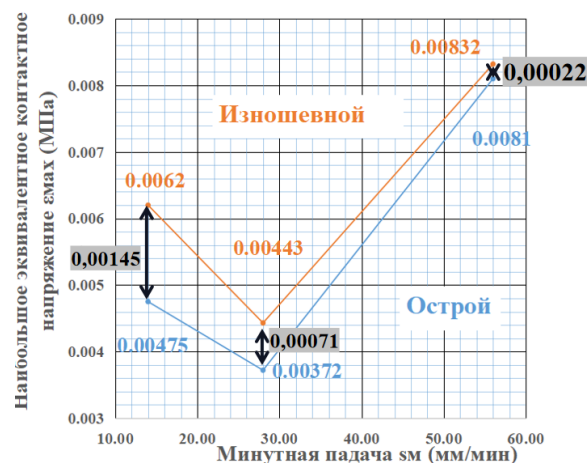


Рисунок 4.6.8. График влияния минутной подачи s_m (мм) на наибольшую общую деформацию ε_{max} (мм) в режущем клине при встречном фрезеровании 4-х зубной острой и изношенной фрезой $\varnothing d = 8$ мм. Образец №1 (40X13) – твердый сплав $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, $h_z = 0,17$ мм, $h_{\text{уг}} = 1,3$ мм.

При увеличении подачи s_m с 14 мм/мин до 28 мм/мин наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$ уменьшается (рис. 4.3.14), уменьшается и общая деформация ε в режущем клине, в том числе её наибольшая величина ε_{max} (рис. 4.6.8).

При фрезеровании изношенной фрезой уменьшение $\sigma_{\text{экв max}}$ в этом диапазоне подач происходит не так интенсивно по сравнению с фрезерованием острой фрезой (рис. 4.6.7). При этом сравнении разница между $\sigma_{\text{экв max}}$ при фрезеровании изношенной фрезой и острой фрезой немного уменьшается, это означает, что влияние увеличения контактной нагрузки на фаске износа по углам немного уменьшается.

При фрезеровании изношенной фрезой уменьшение ε_{max} в диапазоне подач с 14 до 28 мм/мин происходит более интенсивно по сравнению с

фрезерованием острой фрезой (рис. 4.6.8), что отличается от тенденции уменьшения $\sigma_{\text{экв max}}$ (рис. 4.6.7). Разница между ϵ_{max} при фрезеровании изношенной фрезой и острой фрезой немного уменьшается, что означает, что увеличения контактной нагрузки на фаске износа по уголкам на ϵ_{max} уменьшается.

При дальнейшем увеличении подачи с 28 мм/мин до 56 мм/мин наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$ при фрезеровании изношенной фрезой начинает увеличиваться (рис. 4.6.7), но немного менее интенсивно по сравнению с увеличением $\sigma_{\text{экв max}}$ при фрезеровании острой фрезой. Увеличение наибольшей величина общей деформации ϵ_{max} в режущем клине происходит не очень интенсивно (рис. 4.6.7), что объясняется нами увеличением площади поперечного сечения по уголкам при износе.

При увеличении подачи с 28 до 56 мм/мин разница между наибольшим эквивалентным напряжением $\sigma_{\text{экв max}}$ при фрезеровании изношенной фрезой и острой фрезой немного уменьшается, что означает уменьшение влияния контактной нагрузки на фаске износа по уголкам на наибольшее эквивалентное напряжение.

Чем больше подача, тем дальше от главной режущей кромки положение участка с наибольшим эквивалентным напряжением $\sigma_{\text{экв max}}$.

● **Сталь 40Х фрезой 16 мм из Р6М5:**

По результатам эксперимента были получены следующие данные:

при попутном фрезеровании 4-х зубной острой фрезой $\varnothing d=16$ мм, глубине $t=1$ мм, ширине $B=1$ мм, частоте вращения $n=630$ об/мин, подаче в минуту $s_{об}=0,09$ мм/мин, $P_x=220$ Н, $P_y=420$ Н, $P_z=300$ Н, максимальная толщина среза:

$$a_{max} = s_{об} = 0,09 \text{ мм}$$

По формуле можно получить:

$$P_{xy} = \sqrt{(P_x)^2 + (P_y)^2} = \sqrt{220^2 + 420^2} = 474 \text{ Н}$$

$$N = P_z \times \cos \gamma - P_{xy} \times \sin \gamma = 300 \times \cos 7^\circ + 474 \times \sin 7^\circ = 356 \text{ Н}$$

$$F = P_{xy} \times \cos \gamma + P_z \times \sin \gamma = 474 \times \cos 7^\circ - 300 \times \sin 7^\circ = 412 \text{ Н}$$

Поскольку максимальная толщина среза равна $a_{max} = 0,09$ мм, следующие основные параметры могут быть получены при использовании максимальной толщины среза согласно рис 4.4.1 и рис 4.4.2:

$$c=0,75 \text{ мм}, \sigma_{max}=790 \text{ МПа}, \sigma_{const}=220 \text{ МПа}, L_2=0,35 \text{ мм}.$$

Обычно при фрезеровании стали длина пластического участка контакта стружки с передней поверхностью зуба $c_1 \approx 0,5c = 0,375$ мм.

Эпюра нормальных напряжений немного корректируется, чтобы $\frac{N}{l_{\text{конт}}} =$

$\int_0^c \sigma(x) dx$ и получалась окончательная эпюра нормальных напряжений (Рис 4.6.9), где $l_{\text{конт}}$ — длина контакта по главной режущей кромке с заготовкой, $l_{\text{конт}} =$

$$\frac{B}{\sin \omega} = \frac{1}{\sin 90^\circ} = 1 \text{ мм (см. рис. 4.4.3.)}.$$

Максимальное касательное напряжение, действующее на переднюю поверхность зуба:

$$\tau_{max} = \tau_{const} = F / (c \times 0,75 \times l_{\text{конт}})$$

$$\tau_{max} = \tau_{const} = \frac{412}{(0,75 \times 0,75 \times 1)} = 732 \text{ МПа.}$$

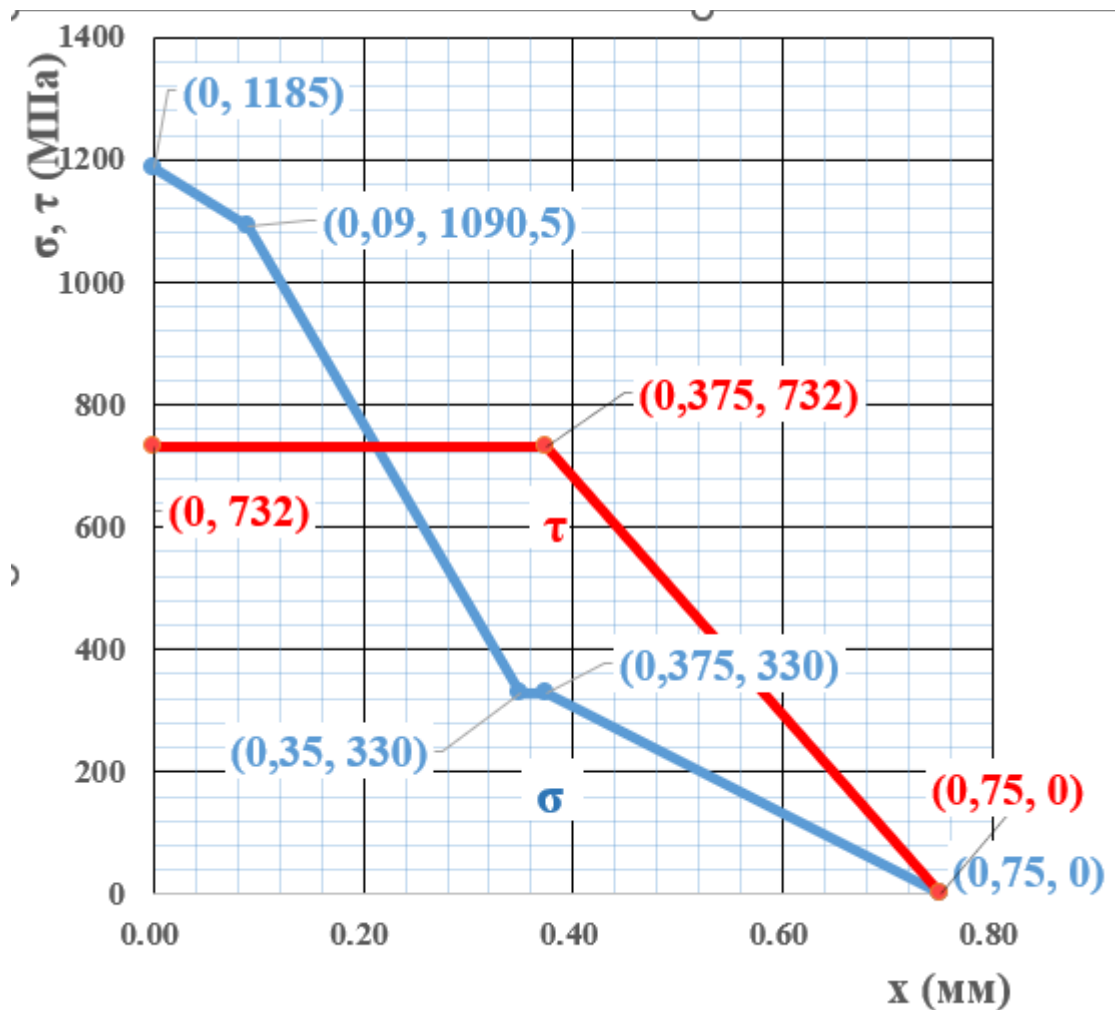


Рис. 4.6.9– Эпюры контактных напряжений на передней поверхности при попутном фрезеровании. $z = 4$ шт., $d = 16$ мм, $t = 1$ мм, $B = 1$ мм, $n = 630$ об/мин, $s_{об} = 0,09$ мм/мин, $c = 0,75$ мм, образец-Р6М5

Таблица 4.6.1– Удельные технологические силы q_{yi} и q_{zi} (МПа) на участках передней поверхности зуба фрезы при расчёте НДС зуба. $s_{об} = 0,09$ мм/мин, $z = 4$ шт., $d = 16$ мм, $t = 1$ мм, $B = 1$ мм, $n = 630$ об/мин, образец -Р6М5, ширина контакта (длина контакта с заготовкой вдоль главной режущей кромки) $l_{конт}=1$ мм, $\gamma=7^\circ$, $\omega=90^\circ$, $c = 0,75$ мм.

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	σ_i , МПа	τ_i , МПа	q_{yi} , МПа	q_{zi} , МПа
1	2	3	4	5	6
1	0-0,125	1089	732	594	1170
2	0,125-0,25	805	732	628	888
3	0,25-0,375	403	732	677	489
4	0,375-0,5	275	610	572	347
5	0,5-0,625	165	366	343	208
6	0,625-0,75	55	122	114	69

Примечание: q_{yi} — напряжение, действующее на область i в радиальном направлении относительно оси фрезы, $q_{yi} = \tau_i \times \cos\gamma - \sigma_i \times \sin\gamma$, q_{zi} — напряжение, действующее на область i в тангенциальном направлении, $q_{zi} = \tau_i \times \sin\gamma + \sigma_i \times \cos\gamma$, передний угол $\gamma=7^\circ$.

В программе ANSYS напряжения, действующие на передней поверхности, приложатся на красную область режущей кромки, где передний угол $\gamma = 7^\circ$, задний угол $\alpha = 10^\circ$ (Рис 4.6.10).

Результаты расчетов напряжений в режущем клине методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программы ANSYS представлены на рис.4.6.11.

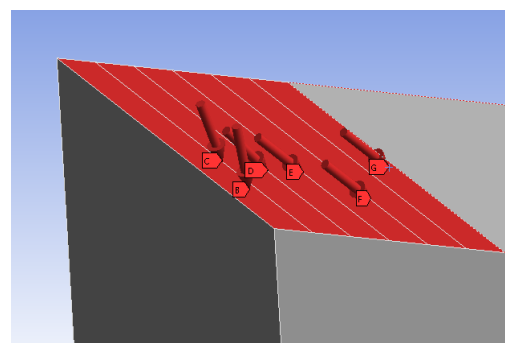
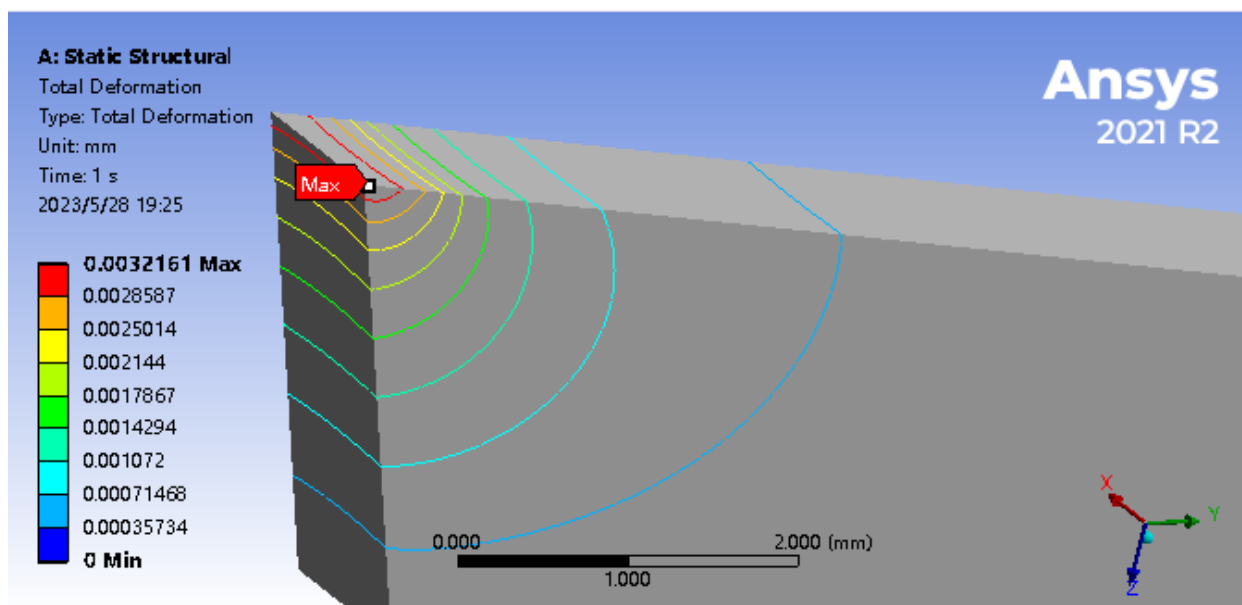
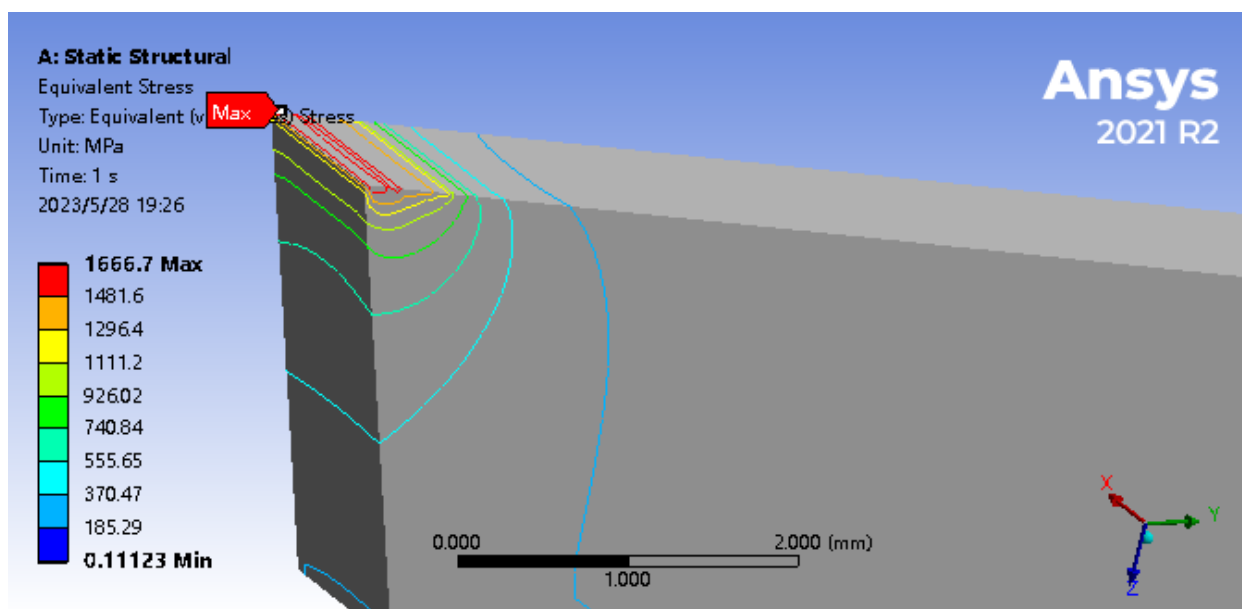


Рис 4.6.10. Приложение внешних нагрузок на режущую кромку



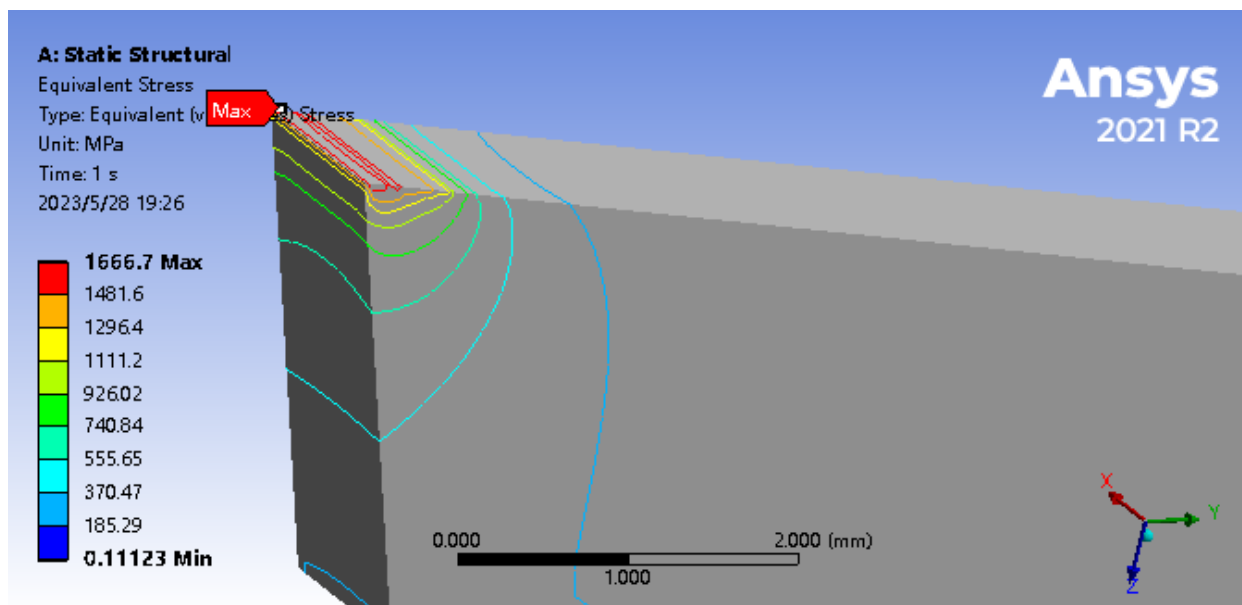
а



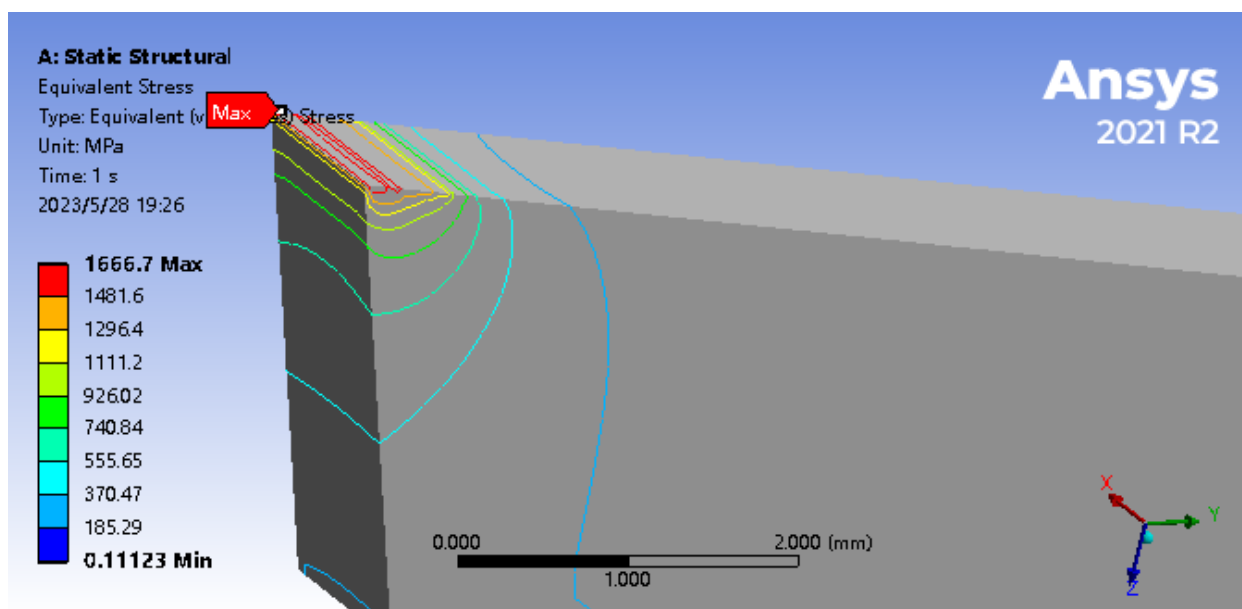
б

Рис 4.6.11–Распределение общей внутренней деформации ε (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX

Попутное фрезерование 4-х зубной острой фрезой. $s_{\text{об}} = 0,09$ мм/мин, образец P6M5, $d = 16$ мм, $B = 1$ мм, $t = 1$ мм, $l_{\text{конт}} = 1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $n = 630$ об/мин, $c = 0,75$ мм.



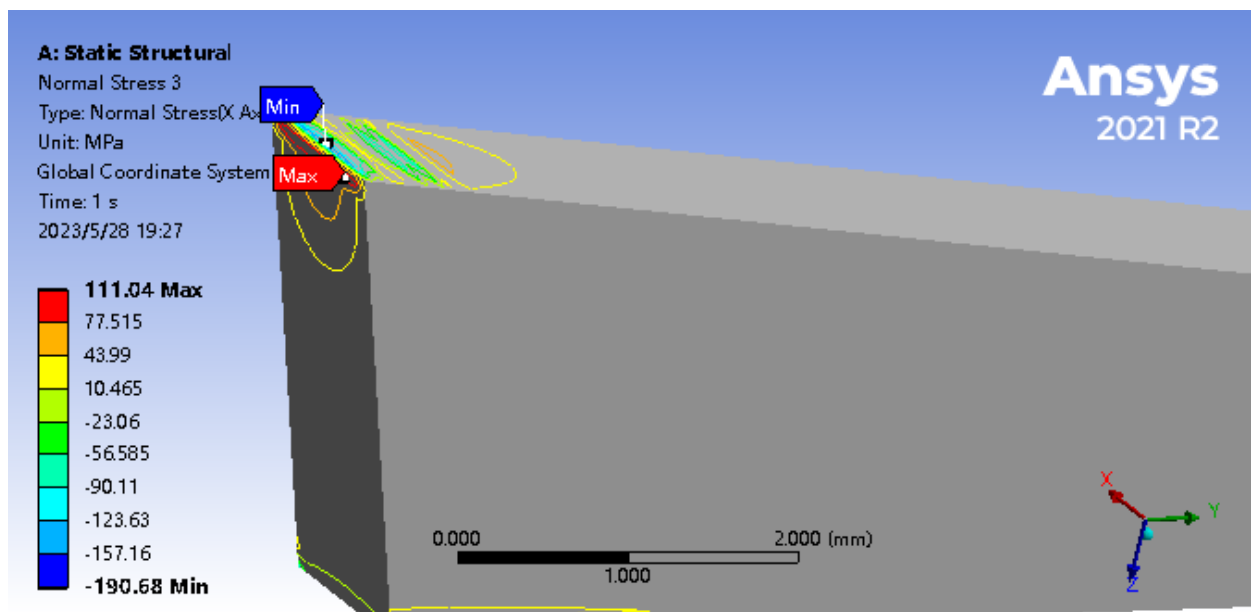
Б



Г

Рис 4.6.11 (продолжение)–Распределение общей внутренней деформации ϵ (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX

Попутное фрезерование 4-х зубной острой фрезой. $s_{\text{об}} = 0,09$ мм/мин, образец P6M5, $d = 16$ мм, $B = 1$ мм, $t = 1$ мм, $l_{\text{конт}} = 1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $n = 630$ об/мин, $c = 0,75$ мм.



д

Рис 4.6.11 (продолжение)–Распределение общей внутренней деформации ϵ (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX

Попутное фрезерование 4-х зубной острой фрезой. $s_{\text{об}} = 0,09$ мм/мин, образец P6M5, $d = 16$ мм, $B = 1$ мм, $t = 1$ мм, $l_{\text{конт}} = 1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $n = 630$ об/мин, $c = 0,75$ мм.

При фрезеровании образца из стали 40X, полученных после проката, использовались фрезы диаметром 16 мм из P6M5. Это приводило к повышенному износу режущей кромки фрез и появлению существенной величины всех составляющих сил резания (см. рис. 4.6.12).

При работе фрезы до $\tau = 12$ мин наблюдалось увеличение длины износа по задней поверхности h_z до 0,3 мм, однако увеличения сил не наблюдалось. И только через 15 минут после появления фаски на задней поверхности длиной более 0,3 мм силы начинали увеличиваться, особенно поперечная (боковая) составляющая P_v , которая при малой толщине фрезерования $t = 1$ мм и малом соотношении $t/d = 0,06$ принималась как радиальная сила P_y .

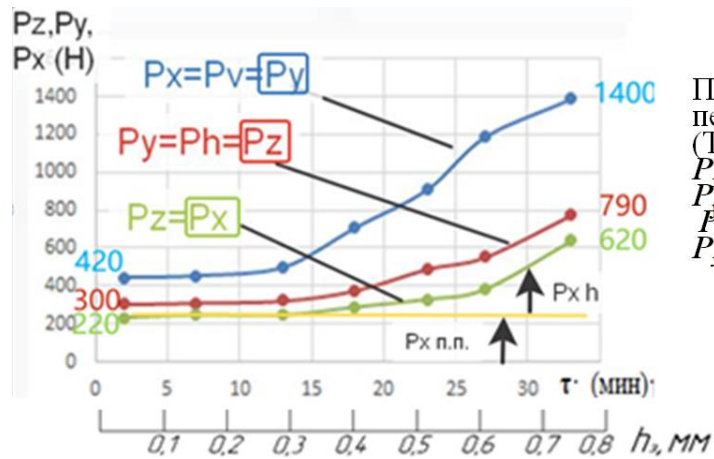


Рис. 4.6.12. Изменение величины оставляющих силы резания при износе при попутном концевом фрезеровании четырёхзубой концевой фрезой P6M5 ($d=16$ мм, $v=29$ м/мин, $s_{об}=0,09$ мм/об, $s_z=0,022$ мм/зуб, $t=1$ мм, $B=8$ мм $n=577 \approx 630$ об/мин).

При износе в конце периода стойкости (T=36 мин) $P_{xhyt} = 620 - 220 = 400 \text{ H};$
 $P_{yh} = 1400 - 420 = 980 \text{ H};$ $P_{zh} = 790 - 300 = 490 \text{ H};$ $P_{xyh} = 1059 \text{ H}.$

По исходным экспериментальным данным на рис. 4.6.12 фаску износа длиной $h_3 = 0,75$ мм можно разделить на 6 участков (табл. 4.6.2).

Поскольку $h_3 = 0,75$ мм, $t=1$ мм, $x=0,125$ мм (длина каждой части), поэтому:

$$N = \sqrt{(P_x)^2 + (P_y)^2}$$

$$F = P_z$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N}{B \cdot x}$$

$$\tau_{cp} = \frac{F}{B \cdot x}$$

Таблица 4.6.2 – Контактных напряжения на участках фаски износа зуба фрезы при расчёте НДС зуба. $s_{06} = 0,09$ мм/мин, $z = 4$ шт., $d = 16$ мм, $t = 1$ мм, $B = 1$ мм, $n = 630$ об/мин, образец -Р6М5, ширина контакта (длина контакта с заготовкой вдоль главной режущей кромки) $l_{\text{конт}} = 1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $\omega = 90^\circ$, $c = 0,75$ мм.

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	σ_i , МПа	τ_i , МПа
1	2	3	4
1	0-0,125	288	160
2	0,125-0,25	432	80
3	0,25-0,375	976	400
4	0,375-0,5	2248	400
5	0,5-0,625	2528	1200
6	0,625-0,75	2376	1680

Поэтому можно построить эпюры контактных напряжений для изношенной фаски (Рис 4.6.13).

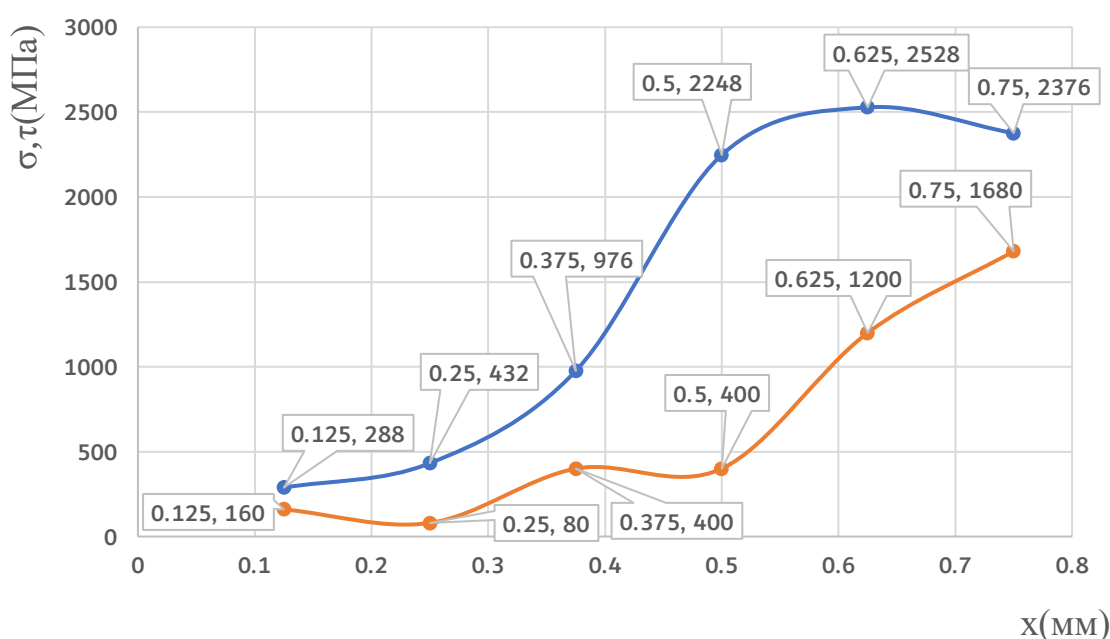


Рисунок 4.6.13– Эпюры контактных напряжений на фаске износа по задней поверхности фрезы при попутном фрезеровании. $z = 4$ шт., $d = 16$ мм, $t = 1$ мм, $B = 8$ мм, $n = 630$ об/мин, $s_{06} = 0,09$ мм/мин, $c = 0,75$ мм, образец-Р6М5

В программе ANSYS напряжения, действующие на фаске износа по задней поверхности, приложатся на красную область режущей кромки, где передний угол $\gamma = 7^\circ$, задний угол $\alpha = 10^\circ$ (Рис 4.6.14).

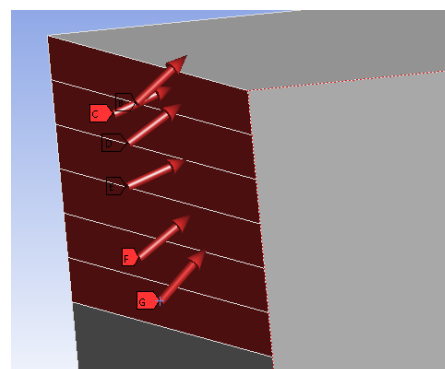
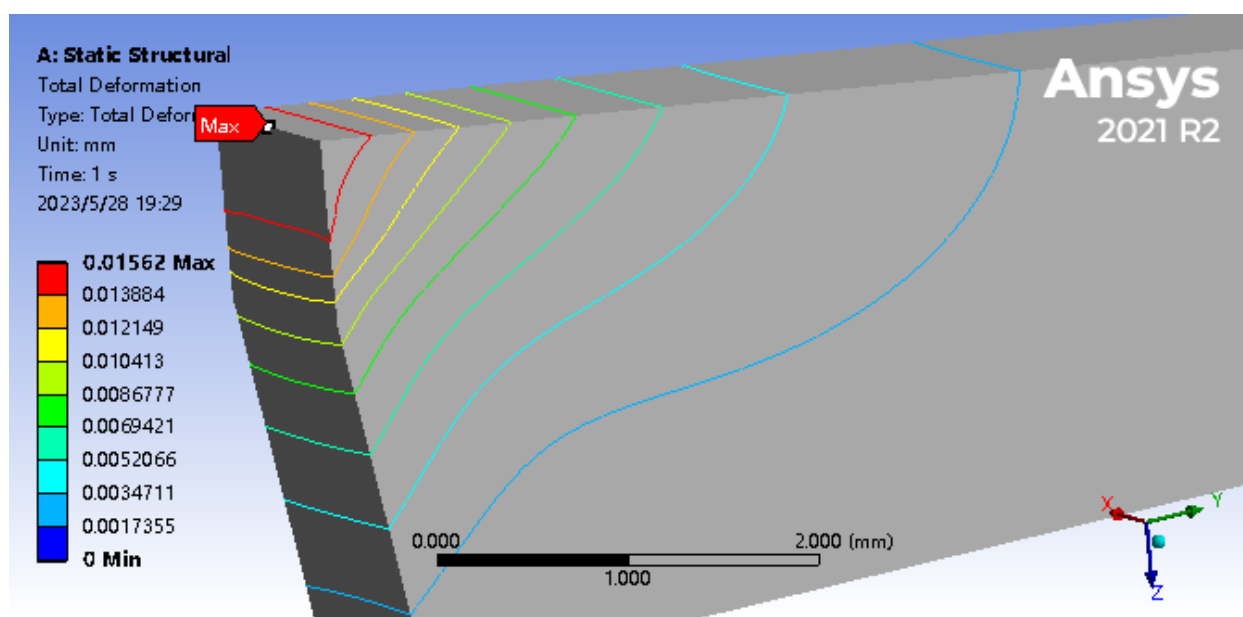


Рис 4.6.14. Приложение внешних нагрузок на режущую кромку

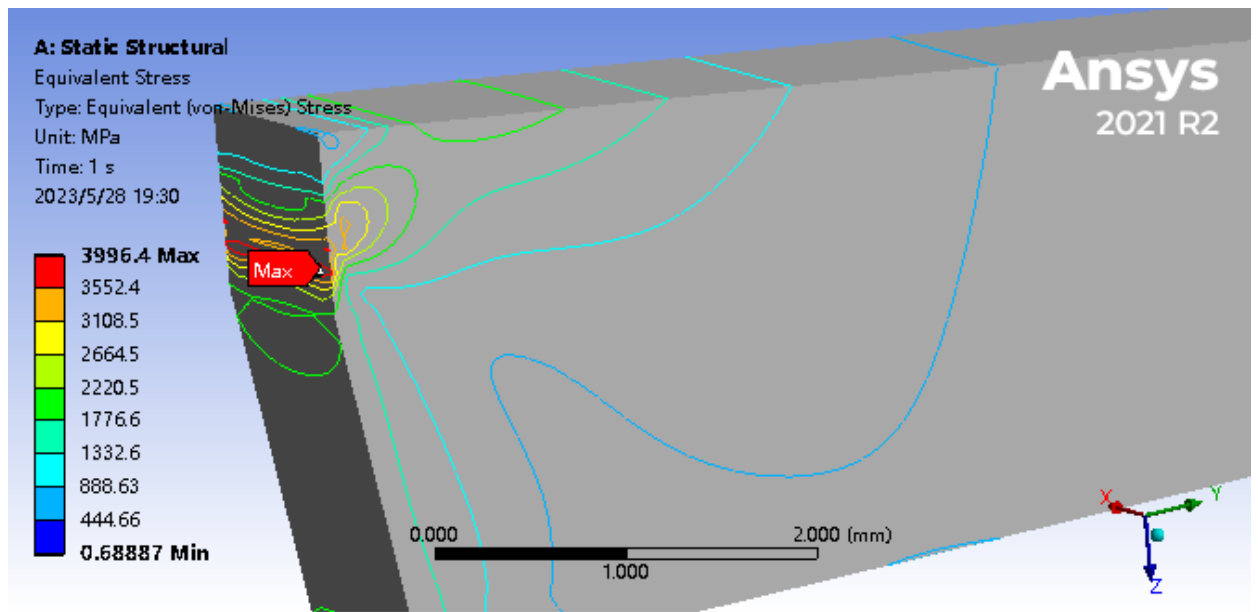
Результаты расчетов напряжений в режущем клине методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программы ANSYS представлены на рис.4.6.15.



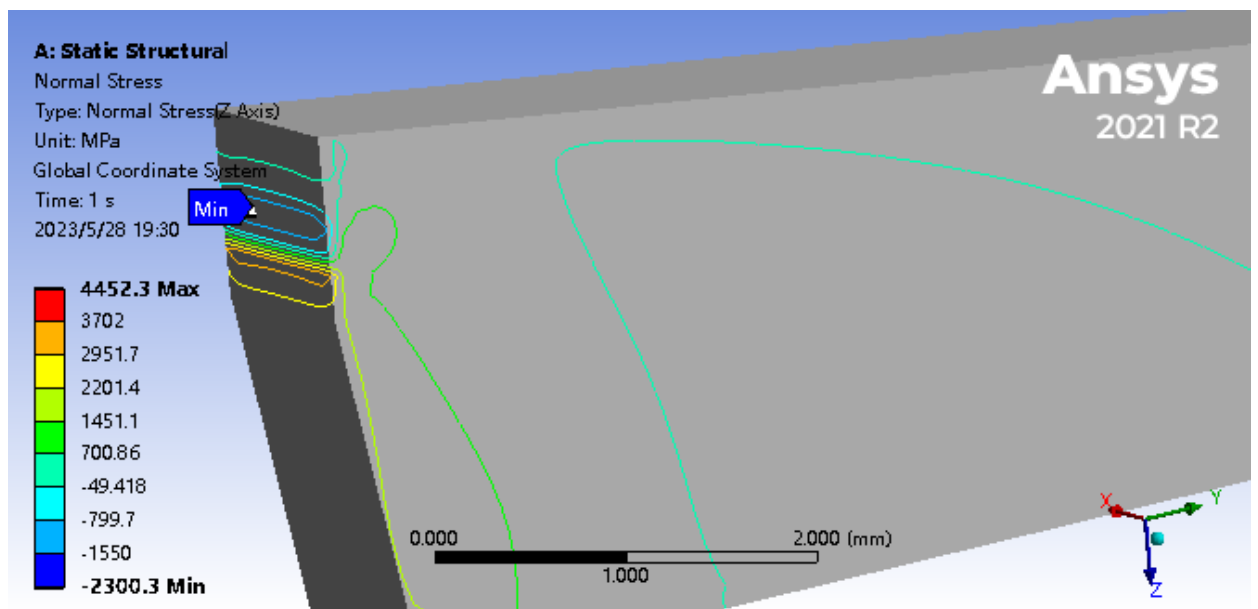
а

Рис 4.6.15 –Распределение общей внутренней деформации ε (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX

Попутное фрезерование 4-х зубной изношенной фрезой. $s_{\text{об}} = 0,09$ мм/мин, образец Р6М5, $d = 16$ мм, $B = 1$ мм, $t = 1$ мм, $l_{\text{конт}} = 1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $n = 630$ об/мин, $c = 0,75$ мм.



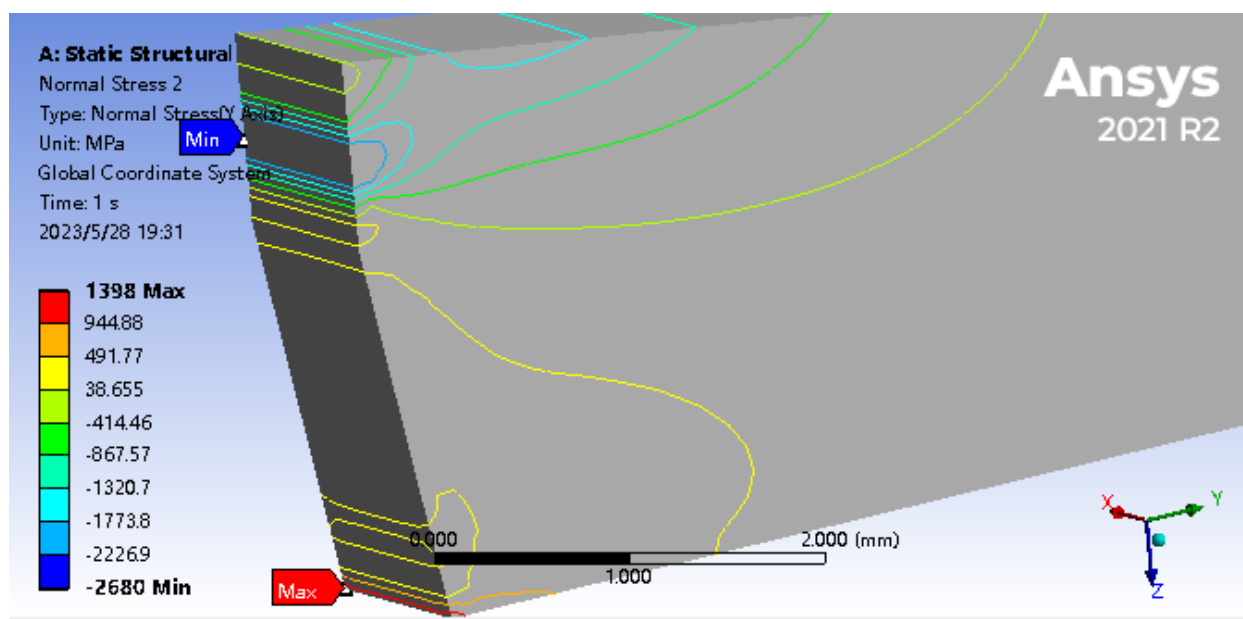
б



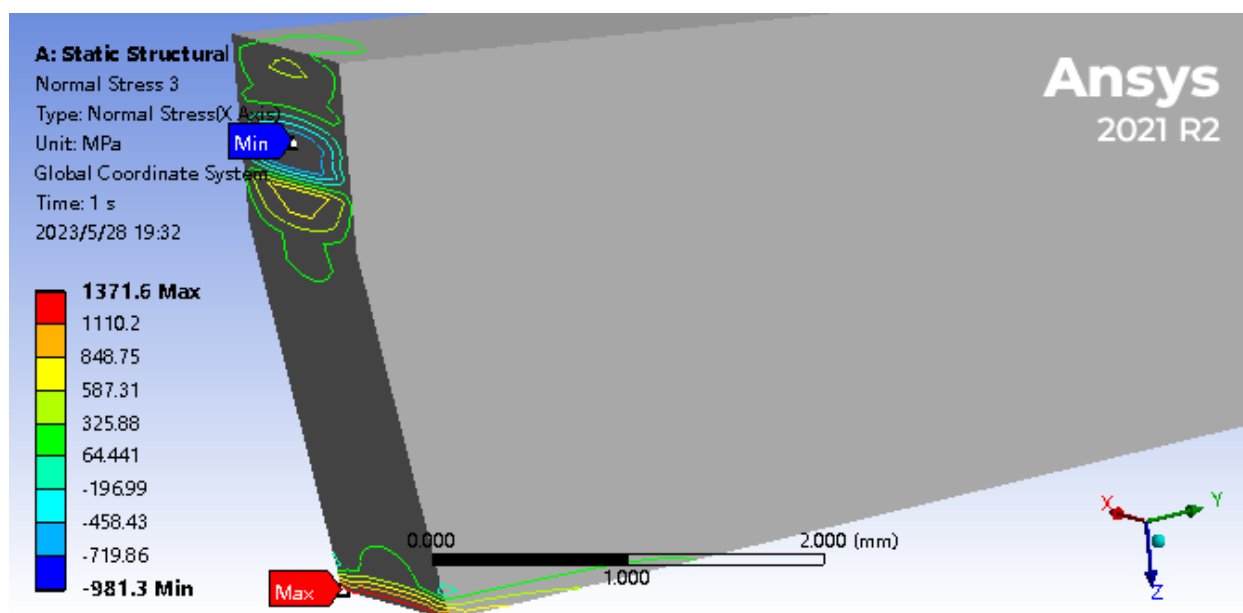
в

Рис 4.6.15 (продолжение)–Распределение общей внутренней деформации ϵ (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX

Попутное фрезерование 4-х зубной изношенной фрезой. $s_{\text{об}} = 0,09$ мм/мин, образец P6M5, $d = 16$ мм, $B = 1$ мм, $t = 1$ мм, $l_{\text{конт}} = 1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $n = 630$ об/мин, $c = 0,75$ мм.



Г



Д

Рис 4.6.15 (продолжение)–Распределение общей внутренней деформации ϵ (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY;

д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX

Попутное фрезерование 4-х зубной изношенной фрезой. $s_{\text{об}} = 0,09$ мм/мин, образец Р6М5, $d = 16$ мм, $B = 1$ мм, $t = 1$ мм, $l_{\text{конт}} = 1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $n = 630$ об/мин, $c = 0,75$ мм.

По рисункам 4.6.15 а, 4.6.4 а, 4.6.5 а, 4.6.6 а, можно построить график общей деформации изношенной фрезы при обработке образцов из стали 40Х и стали 40Х13 (Рис. 4.6.16).

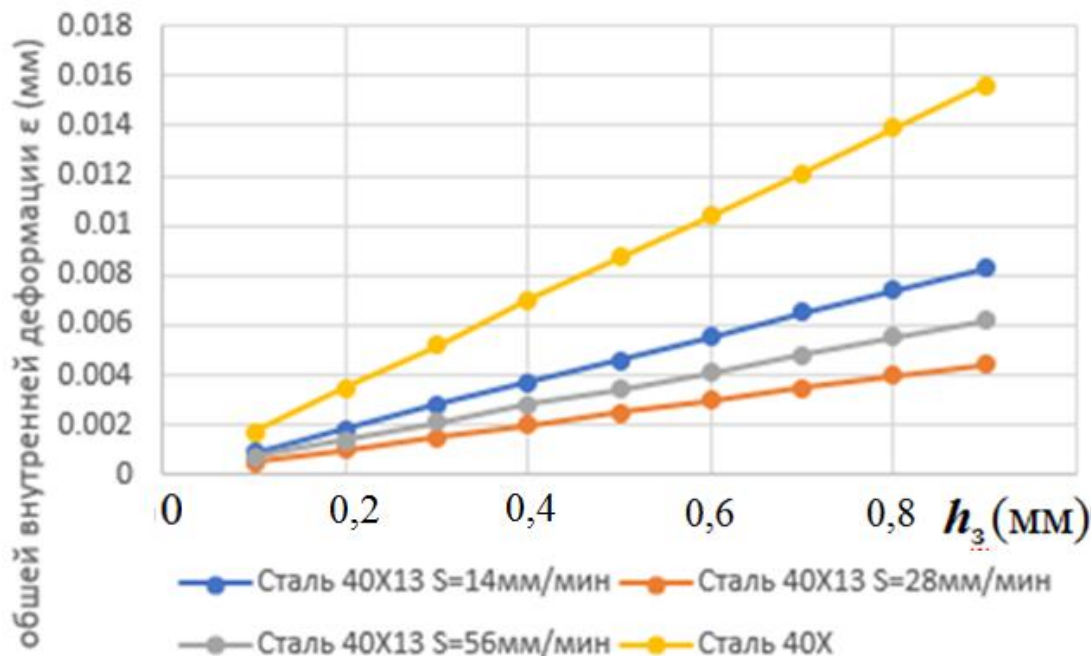


Рис 4.6.16 График изменения общей деформации ϵ (мм) при износе фрезы по задней поверхности при обработке образцов из стали 40Х и стали 40Х13

Из рисунка 4.6.16 видно, что общая деформация ϵ изношенной фрезы при обработке образцов из стали 40Х больше, чем при фрезеровании стали 40Х13, т.к. обработка стали 40Х13 велась твёрдосплавными фрезами, а 40Х – быстрорежущими фрезами без износостойкого покрытия, что приводило к их более быстрому износу. Появление округления режущей кромки при первом же контакте с заготовкой вызывало увеличение всех составляющих силы резания, особенно P_y , как это видно на рис. 4.6.12. Большая величина деформации объясняется нами как результат вдавливания (подмятия) металла под режущую кромку при меньшей толщине среза (чем меньше подача, тем меньше толщина среза).

Заключение

1. При одинаковых условиях резания контактные напряжения на искусственной фаске износа по задней поверхности резца при врезании больше, чем при установившемся резании, но характер эпюр одинаков.

2. При встречном фрезеровании острой фрезой при нахождении в контакте с заготовкой только одного зуба поперечная сила P_v меняет свой знак: при врезании зуб сначала отталкивает заготовку от оси фрезы, но после появления стружки зуб фрезы тянет заготовку к фрезе, что приводит к притяжению заготовки к оси фрезы. Изменение направления силы P_z , действующей на заготовку от зуба фрезы в тангенциальном направлении, приводит к ещё большему увеличению притяжению заготовки к оси фрезы. Изменение знака поперечной силы P_v даже при её небольшой величине приводит к появлению вибрации, особенно при наличии зазора (люфта) в винтовой паре **гайка стола - винт поперечной подачи**.

3. Продольная сила P_h , действующая в направлении, противоположном подаче стола, всегда действует в одном и том же направлении (в нашем случае положительна) и поэтому компенсирует зазор (люфт) в паре **гайка стола - винт продольной подачи**.

4. Как при попутном, так и при встречном фрезеровании из-за изменения контактного угла ψ и, соответственно, толщины среза, продольная сила P_h достигает наибольшего значения раньше, чем P_v .

5. При попутном фрезеровании увеличение сил P_h и P_v происходит более интенсивно (быстрее), чем при встречном; при попутном фрезеровании при выходе зубьев из контакта уменьшение сил P_h и P_v происходит менее интенсивно (медленнее), чем при встречном фрезеровании;

6. Как при попутном, так и при встречном фрезеровании острой фрезой

осевая составляющая сила P_x на главной режущей кромке фрезы (или кромки при нескольких зубьях в одновременном контакте) старается приподнять заготовку от стола. При увеличении толщины среза осевая сила P_x немного увеличивается.

7. Из-за радиального биения зубьев фрезы и упругой деформации системы СПИД изменение составляющих сил при фрезеровании в каждом цикле (на каждом зубе) неодинаково.

8. При фрезеровании твердосплавной фрезой влияние износа по уголкам на силы намного выше, чем влияние износа по задней поверхности на силы.

9. При фрезеровании изношенной фрезой, поскольку направление составляющих сил P_h и P_v на фаске износа по уголкам совпадает с направлением составляющих сил P_h и P_v на режущей кромке, то силы P_h и P_v при фрезеровании изношенной фрезой больше, чем при обработке острой фрезой;

10. Поскольку направление составляющей силы P_x на фаске износа по уголкам противоположно направлению составляющей силы P_x на режущей кромке, то осевая сила P_x при фрезеровании изношенной фрезой меньше, чем обработке острой фрезой и большую часть цикла направлена вниз, т.е. прижимает заготовку к столу станка.

11. Из-за наличия фаски износа по уголкам, при врезании при встречном фрезеровании составляющая сила P_h отталкивает заготовку от фрезы больше, чем при обработке острой фрезой.

12. Фрезерование заготовок после их аддитивного синтеза из стали 40Х13 и других труднообрабатываемых материалов фрезами из быстрорежущей стали невозможно из-за их интенсивного износа по уголкам.

13. Фрезерование заготовок из 40Х13 после их аддитивного синтеза лучше выполнять фрезами из твёрдого сплава, диаметр фрезы должен быть не менее 12 мм, а количество зубьев наибольшим из возможного. Подача более 0,02 мм/зуб

приводит к появлению вибрации и более интенсивному износу фрезы по уголкам, который является причиной необходимости замены фрезы.

14. При фрезеровании острой фрезой при увеличении минутной подачи S_m с 14 до 28 мм/мин уменьшается наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$, также уменьшается наибольшая величина общей деформации ϵ_{max} ; но при увеличении подачи с 28 до 56 мм/мин наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$ и наибольшая величина общей деформации ϵ_{max} увеличиваются.

15. При фрезеровании острой фрезой с увеличением частоты вращения n , от 500 об/мин до 1000 об/мин увеличивается наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$, также увеличивается наибольшая величина общей деформации ϵ_{max} ;

16. При фрезеровании изношенной фрезой с износом по уголкам длиной $h_{\text{з ут}} = 1,3$ мм **характер** изменения графиков $\sigma_{\text{экв max}}$ и ϵ_{max} остаётся таким же, что и при фрезеровании острой фрезой, но их величина становится больше на 38%.

Список литературы

1. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента/Полетика М. Ф. – Москва: Машиностроение, 1969. – 148 с.
2. Развитие науки о резании металлов /В.Ф. Бобров, Г. И. Грановский, Н.Н. Зорев и др. – Москва: Машиностроение, 1967. – 416 с.
3. Козлов, В. Н. Построение эпюр контактных напряжений на передней поверхности инструмента при обработке стали [Электронный ресурс] / В. Н. Козлов, Х. Чжан, Е. Н. Петровский // Современные проблемы машиностроения : сборник трудов XV Международной научно-технической конференции, г. Томск, 22-25 ноября 2022 г. — Томск : Томский политехнический университет, 2022. — [С. 94–97].
4. Чэнь Юэчжоу. Расчёт эпюр контактных напряжений при обработке стали / Чэнь Юэчжоу, Чжан Цзяюй, В. Н. Козлов; науч. рук. В. Н. Козлов // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов сборник докладов X Всероссийской научно-практической конференции, Томск, 22–24 апреля 2020 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2020. — [С. 243–250].
5. Чжан Ц., Козлов В. Н. Влияние вида нагружения на расчёт внутренних напряжений в режущем клине // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 8: в 2 ч. Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. С. 352-356.
6. Козлов В. Н., Таха М.Х.М., Сабават С.К. Влияние вида стружки на распределение контактных напряжений на фаске задней поверхности режущего инструмента // VI Всероссийский фестиваль науки. XX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и образование» (г. Томск, 18–22 апреля 2016 г.): В 5 т. Т. V. Ч. 1: Профессиональное образование в области технологии, дизайна, безопасности 103 жизнедеятельности, транспорта

и сервиса / ФГБОУ ВО «Томский государственный педагогический университет».
– Томск: Изд-во Том. гос. пед. ун-та, 2016. – с. 91–97.

7. Определение параметров эпюр контактных напряжений на передней поверхности режущего инструмента при обработке стали / Ц. Чжао, В. Н. Козлов, Ц. Ю, М. Ци // Современные проблемы машиностроения сборник трудов XIII Международной научно-технической конференции, г. Томск, 26-30 октября 2020 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; под ред. Е. Н. Пашкова . — Томск: Томский политехнический университет, 2020. — [С. 144–145].

8. Козлов В. Н., Цуй Ц., Чжан Ц., Хуан Ч. Методика измерения контактных напряжений на поверхностях режущего инструмента/ В. Н. Козлов, Ц. Цуй, Ц. Чжан, Ч. Хуан // Наука и образование: материалы VI Всероссийского фестиваля науки. XX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных / ФГБОУ ВО «Томский государственный педагогический университет». – Томск: Изд-во Том. гос. пед. ун-та, 2016, с. 97–105.

9. Методика измерения контактных напряжений на поверхностях резца [Электронный ресурс] / В. Н. Козлов [и др.]; науч. рук. В. Н. Козлов // Молодежь и современные информационные технологии : сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 7-11 ноября 2016 г. в 2 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Институт кибернетики (ИК) ; под ред. В. С. Аврамчук [и др.]. — Томск: Изд-во ТПУ, 2016. — Т. 2. — [С. 350–352]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети Интернет.

10. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А. М.: Справочник. - 2-е изд. доп. М.: Металлургия, 1983. - 352 с: ил.

11. Концевые фрезы // Металлорежущие системы (МРС), 01 февраля 2017. — Изд-во Машиностроение Металлорежущее оборудование (МРС) и САПР. — Свободный доступ из сети Интернет. Режим

доступа: <https://stanki-uchpu.ru/kontsevye-frezy/>

12. Концевые фрезы – конструкция и технические особенности // Твердый сплав, 2015. — Свободный доступ из сети Интернет. Режим доступа: <https://tverdysplav.ru/kontsevye-frezy-konstruktsiya-i-tehnicheskie-osobennosti/>

13. 3DSCIENCEVALLEY, Текущее состояние и международные стандарты металлической 3D-печати/аддитивного производства // 3DSCIENCEVALLEY, Китай, 15 марта 2017. — Свободный доступ из сети Интернет. Режим доступа: <http://www.3dsciencevalley.com/?p=8676>

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
4AM11	Шэ Лу

Школа	Инженерная школа новых производственных технологий	Отделение школы (НОЦ)	Отделение материаловедения
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	15.04.01 Машиностроение

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды 30 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ конкурентных технических решений (НИ)	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)	Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования
3. Составление бюджета инженерного проекта (НИ)	Расчет бюджетной стоимости НИ
4. Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)	Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Оценка конкурентоспособности ИП
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет ИП
5. Основные показатели эффективности ИП

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.02.2023
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ШБИП	Гасанов Магеррам Али оглы	Д.э.н., профессор		01.02.2023

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4AM11	Шэ Лу		01.02.2023

5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Введение

Цель данного раздела ВКР заключается в оценке перспективности разработки и планировании финансовой и коммерческой ценности конечного продукта, предлагаемого в рамках НИ. Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на следующие вопросы: будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, каков бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- оценка коммерческого потенциала разработки;
- планирование научно-исследовательской работы;
- расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Целью НИР является определение возможные альтернативы научным исследованиям, которые отвечают современным требованиям с точки зрения эффективности использования ресурсов и защиты ресурсов; планирование научно-исследовательские план; определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурс эффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных технических решений

В ходе исследования были рассмотрены две конкурирующие работы о процессе резания:

- 1) Построить эпюры контактных напряжений при обработке стали;
- 2) Рассчитать НДС режущего инструмента при разных передних углах и режимах резания.

Таблица 5.1 – Сравнение конкурентных технических решений исследовательских работ

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Актуальность исследования	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
2. Надёжность	0,14	5	5	3	0,7	0,7	0,42
3. Простота установки	0,05	4	5	3	0,2	0,25	0,15
4. Специальное оборудование (динамометр)	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
5. Стабильность закрепления державки	0,12	4	3	5	0,48	0,36	0,6
6. Эффективность работы	0,1	5	5	4	0,55	0,55	0,44
7. Безопасность	0,09	5	5	4	0,45	0,45	0,36
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Цена на расходы	0,12	4	5	3	0,48	0,6	0,36
2. Конкурентоспособность исследовательской работы	0,1	4	5	3	0,4	0,5	0,3
3. Финансирование научного исследования	0,08	5	4	4	0,4	0,32	0,32
Итого	1	46	43	36	4,66	33,4	3,65

Расчет конкурентоспособности, на примере стабильности срабатывания, определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i(5,1)$$

где K – конкурентоспособность проекта; B_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл показателя.

Проведенный анализ конкурентных технических решений показал, что исследование является наиболее актуальным и перспективным, имеет конкурентоспособность.

SWOT-анализ

Для исследования внешней и внутренней среды проекта проведен SWOT-анализ, где детально продуманы сильные и слабые стороны научно-технической разработки.

Первый этап, составляется матрица SWOT, в которую описаны слабые и сильные стороны проекта и выявленные возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 –Матрица SWOT

Сильные стороны	Слабые стороны
научно-исследовательского проекта: С1. Низкая цена исходного сырья. С2. Более точные экспериментальные результаты с используемым новым оборудованием. С3. Более свежая информация, которая была использована для разработки проекта. С4. Перспективный способ для обработки данных. С5. Квалифицированный персонал.	научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие разных фрез для испытаний. Сл2. Долгое время подготовки к моделированию при проведении научного исследования. Сл3. Высокие требования к экспериментальному оборудованию. Сл4. Эксперименты имеют большие погрешности и неопределенности. Сл5. Высокие требования к постановке внутренних настройки в программу ANSYS.

Возможности: В1. Использование оборудования ИНШПТ ТПУ В2. Появление потенциального спроса на новые продукт. В3. Повышение точности. В4. Уменьшение стоимости конкурентных разработок. В5. Привлечение других информационных технологий для решения вопросов машиностроения.	Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые результаты исследования в частных предприятиях. У2. Появление зарубежных аналогов и более ранний их выход на рынок. У3. Развитая конкуренция технологий производства. У4. Возникновение новых технологических производств. У5. Текущие компьютерные программы ANSYS возможно не допущены к применению в дальнейшей обстановке.
---	---

На втором этапе проведения SWOT-анализа составлены интерактивные матрицы проекта, в которых осуществлено выполнение анализа соответствия параметров SWOT каждого с каждым. Соотношения параметров представлены в таблицах 5.3 - 5.6.

Таблица 5.3 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и сильные стороны»

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	-	+	-	+	-
	B2	-	-	+	+	-
	B3	-	+	+	-	-
	B4	+	-	-	-	+
	B5	-	-	+	+	-

Таблица 5.4 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	В	-	+	+	-	-

	1					
	B	-	-	-	-	-
	2					
	B	-	-	-	-	-
	3					
	B	-	-	-	-	-
	4					
	B	-	-	-	-	-
	5					

Таблица 5.5 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и сильные стороны»

Сильные стороны проекта						
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	Y1	-	-	-	+	-
	Y2	-	-	+	-	-
	Y3	-	-	-	-	+
	Y4	+	-	-	-	-
	Y5	-	-	-	-	+

Таблица 5.6 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта						
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	Y1	+	-	-	-	-
	Y2	-	-	-	+	-
	Y3	-	+	-	-	-
	Y4	+	-	-	-	-
	Y5	-	-	-	-	+

Результаты выполнения SWOT-анализа представлены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Результаты SWOT-анализа

Сильные стороны научно-исследовательского проекта С1. Низкая цена исходного сырья. С2. Более точные	Слабые стороны научно-исследовательского проекта Сл1. Отсутствие разных фрез для испытаний. Сл2. Долгое время подготовки к моделированию при проведении научного исследования.
--	---

экспериментальные результаты с используемым новым оборудованием. С3. Более свежая информация, которая была использована для разработки проекта. С4. Перспективный способ для обработки данных. С5. Квалифицированный персонал.	Сл3. Высокие требования к экспериментальному оборудованию. Сл4. Эксперименты имеют большие погрешности и неопределенности. Сл5. Высокие требования к постановке внутренних настройки в программу ANSYS.	
Возможности В1. Использование оборудования ИНШПТ ТПУ В2. Появление потенциального спроса на новые продукт. В3. Повышение точности. В4. Уменьшение стоимости конкурентных разработок. В5. Привлечение других информационных технологий для решения вопросов машиностроения.	Направления развития В1С2. Более точные экспериментальные результаты с использующим новым оборудованием. В2В3С3С4. Свежая информация и перспективный способ изучения соответствуют потенциальному спросу в дальнейшие технологии машиностроения и внедрению технологии в аэрокосмической области. В5С3С4. Более свежая информация и перспективный способ изучения в данной сфере соответствуют привлечение других информационных технологий для решения вопросов машиностроения.	Сдерживающие факторы В1Сл3Сл4. Эксперименты имеют большие погрешности и неопределенности с использованием оборудования ИНШПТ ТПУ.
Угрозы У1. Отсутствие спроса на новые результаты исследования в частных предприятиях. У2. Появление зарубежных аналогов и более ранний их выход на рынок.	Угрозы развития У1С4. Несмотря на отсутствие спроса на новые результаты исследования в частных предприятиях, наши исследования обладают высокой перспективностью в данной сфере. У2С2С3. Более точные результаты исследования по сравнению с другими технологиями и более свежие результаты по сравнению с зарубежными аналогами. У5С5. Квалифицированный	Уязвимости: У2Сл4. Появление зарубежных аналогов и более ранний их выход на рынок угрожает полученным результатам исследования за счёт их погрешности и неопределенности в некоторых случаях. У4Сл1. Возникновение новых технологических производств, например технология 3D печати может заменить традиционную

У3. Развитая конкуренция технологий производства. У4. Возникновение новых технологических производств. У5. Текущие компьютерные программы ANSYS возможно не допущены к применению в дальнейшей обстановке.	персонал даёт возможность преодолеть проблемы с возможным отсутствием правила использования программы ANSYS.	технологию.
---	---	--------------------

В результате SWOT-анализа показано, что высокие точные напряженно-деформированное состояние (НДС) фрез получены методом конечных элементов с помощью программы ANSYS. Результаты анализа учтены в дальнейшей научно-исследовательской разработке.

5.2 Планирование научно-исследовательских работ

Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса научно-исследовательских работ осуществляется в порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение количества исполнителей для каждой из работ;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований;

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления.

Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Порядок этапов работ и распределение исполнителей для данной научно-исследовательской работы, приведен в таблице 5.8:

Таблица 5.8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка темы диссертации	1	Составление и утверждение тем диссертации, утверждение плана-графика.	научный руководитель
	2	Календарное планирование выполнения диссертации.	инженер, научный руководитель
Теоретические исследования	3	Изучение литературы по фрезерованной обработке.	инженер
	4	Метод разрезного резца.	инженер
Экспериментальные исследования	5	Создать 3D модели фрез, измерить длину контакта стружки, построить эпюры контактных напряжений и рассчитать их параметры.	инженер
	6	Исследование НДС фрез с помощью программы ANSYS.	инженер, научный руководитель
	7	Проведение компьютерного эксперимента.	инженер
Обобщение и оценка результатов	8	Обработка полученных данных.	инженер
	9	Оценка правильности	инженер, научный

		полученных результатов.	руководитель
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	10	Составление пояснительной записки.	инженер

Разработка графика проведения научного исследования

Определение трудоемкости выполнения научного исследования проведено экспертным путем в человеко-днях. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ использована следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5} \quad (5.2)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, человеко-дни; $t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни; $t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни.

Исходя из рассчитанной ожидаемой трудоемкости работ, была определена продолжительность каждого этапа работы (в рабочих днях T_p), учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями, а также возможность выполнения нескольких видов работ в один временной промежуток. Далее с помощью формулы 2 рассчитана продолжительность одной работы в рабочих днях:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i} \quad (5.3)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, рабочие дни; $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, человеко-дни; $Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для перевода длительности каждого этапа из рабочих в календарные дни

необходимо воспользоваться формулой (5.3):

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал} \quad (5.4)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{праз}} = \frac{365}{365 - 89 - 29} = 1,48 \quad (5.5)$$

где – общее количество календарных дней в году; – общее количество выходных дней в году; – общее количество праздничных дней в году (2023 год).

Расчеты временных показателей проведения научного исследования обобщены в таблице 5.9.

Таблица 5.9– Временные показатели проведения научного исследования

Названиеработы	Трудоёмкостьработ						Длительно сть работ в рабочих днях T_{pi}	Длитель-н ость работ в календар- T_{ki} ных днях
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$T_{ожi}$, чел-дни			
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 1	Исп. 2		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Составление и утверждение темя диссертации, утверждение плана-графика.	1	-	2	-	1,4	-	1,4	2
2. Календарное планирование выполнения диссертации.	1	2	2	3	1,4	2,4	2,4	3
3. Изучение литературы по фрезерованной обработке.	-	40	-	50	-	44	44	65
4. Метод разрезного резца.	-	50	-	60	-	54	54	80

5. Создать 3D модели фрез, измерить длину контакта стружки, построить эпюры контактных напряжений и рассчитать их параметры.	-	10	-	15	-	12	12	18
6. Исследование НДС фрез с помощью программы ANSYS.	30	50	40	60	34	54	54	63
7. Проведение компьютерного эксперимента.	-	5	-	8	-	6,2	6,2	9
8. Обработка полученных данных.	-	8	-	12	-	9,6	9,6	14
9. Оценка правильности полученных результатов.	5	8	6	10	5,4	8,8	8,8	10
10. Составление пояснительной записки.	-	20	-	40	-	28	28	41
Итого:	37	193	50	258	42,2	219	220,4	305

Примечание: Исп. 1 – научный руководитель, Исп. 2 -инженер

На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 5.10).

Таблица 5.10 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп	$T_{\text{кп}}$, кал. дн.	Продолжительность работ											
				февр			март			апр			май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение темя диссертации, утверждение плана-графика.	Исп1	2												
2	Календарное планирование выполнения диссертации.	Исп1 Исп2	3												
3	Изучение литературы по фрезерованной обработке.	Исп2	65												
4	Метод разрезного резца.	Исп2	80												
5	Создать 3D модели фрез, измерить длину контакта стружки,	Исп2	18												

	построить эпюры контактных напряжений и рассчитать их параметры.														
6	Исследование НДС фрез с помощью программы ANSYS.	Исп1	63												
		Исп2													
7	Проведение компьютерного эксперимента.	Исп2	9												
8	Обработка полученных данных.	Исп2	14												
9	Оценка правильности полученных результатов.	Исп1	10												
		Исп2													
10	Составление пояснительной записки.	Исп2	41												



Исп 1 (научный руководитель)



Исп 2 (студент-инженер)

5.3 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научно-технического исследования учитывались все виды расходов, связанных с его выполнением. В этой работе использовать следующую группировку затрат по следующим статьям:

- материальные затраты научно-исследовательской работы (НИР);
- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы НИР.

Расчет материальных затрат научно-технического исследования

При выполнении работы большая часть времени проводилась в 16А корпусе ТПУ. В лаборатории № 101 проводилось исследование прочности фрез методом конечных элементов при обработке стали (Сталь 40X13).

В результате экспериментов было установлено влияние толщины среза a на силы резания и изменение составляющих силы резания с учётом выбранного переднего угла. Используемое оборудование и материалы имеют следующие виды: 1) Оборудование – ноутбук; 2) динамометр фирмы Kistler с интерфейсом для подключения к персональному компьютеру; 3) Микроскоп БМИ-1; 4) Прутки из стали марки 40X13; 5) Державка токарная с набором твёрдосплавных фрез с разными передними углами; 6) Резец с напайной режущей пластиной (материал ВК8); 7) Комплект канцелярских принадлежностей для записи данных; 8)

Картридж для лазерного принтера для печати на бумаге формата А4; 9) Офисная бумага А4 для записи данных.

Данная часть включает затрат всех материалов, используемых при исследовании. Результаты расчета затрат представлены в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Материальные затраты.

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во, ед.	Сумма, руб.
Комплекс канцелярских принадлежностей для записи данных	431	5	2155
Картридж для лазерного принтера для печати на бумаге формата А4	4008	1	4008
Офисные бумаги А4 для записи данных	584	1	584
Компьютерное программное обеспечение для анализа данных, программа Ansys, Компас, Origin и т. д. (университет обеспечивает для магистратуры бесплатно)	0	2	0
Микроскоп БМИ-1 для измерения износа инструмента (университет обеспечивает для магистратуры бесплатно)	0	1	0
Динамометр Kistler для определения силы резания	22000	1	22000
Инструмент с напайными режущими пластинами (материал ВК8)	1290	2	2580
Фрез с разными передними углами (материал ВК8)	837	5	4185

Державка токарная с механическим креплением твёрдосплавных фрез	1833	2	3666
Деталь: пруток из стали 40Х13 (круг, сталь 40Х13) длиной 1,2 м, разрезается на несколько мерных заготовок по 400 мм длиной, обрабатываемый материал	43000	1	43000
Итого:			82178

Расчет амортизации специального оборудования

Расчет сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения данной работы и эксплуатировалось ранее, поэтому при расчете затрат на оборудовании учитываем только рабочие дни по данной теме.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации: рассчитывается по формуле:

$$H_A = \frac{1}{n} \quad (5.6)$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m \quad (5.7)$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.; m – время использования, мес.

Таблица 5.12– Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, тыс.руб.	Общая стоимость оборудования, тыс.руб.
1	ПЭВМ	1	6	150	150
Итого		150 тыс.руб.			

Рассчитывается норма амортизации для ноутбука, с учётом того, что срок полезного использования составляет 6 года (по формуле 5.6):

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{6} = 0,17$$

Общая сумма амортизационных отчислений (по формуле 5,7):

$$A = \frac{H_A I}{12} \times 10 = \frac{0,17 \times 150000}{12} \times 10 = 21250 \text{ руб}$$

Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата $З_{осн}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p \quad (5.8)$$

где $З_{дн}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (Таблица 5.9).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$З_{дн} = \frac{З_m \times M}{F_d} \quad (5.9)$$

где $З_m$ – должностной оклад работника за месяц; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей, раб.дн.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

– при отпуске в 118 раб. дней – 8,1 месяца, 6-дневная рабочая неделя.

Должностной оклад работника за месяц:

– для руководителя:

$$З_m = З_{мс} \times (1 + K_{пр} + K_d) K_p = 28600 \times (1 + 0,3 + 0,2) \times 1,3 = 55770 \text{ руб.} \quad (5.10.1)$$

– для инженера:

$$З_m = З_{мс} \times (1 + K_{пр} + K_d) K_p = 11280 \times (1 + 0,3 + 0,2) \times 1,3 =$$

$$21996 \text{ руб.} \quad (5.10.2)$$

где $З_{мс}$ – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.; k_{np} – премиальный коэффициент, равен 0,3; k_{∂} – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2; k_p – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 5.13 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$З_{мс}, \text{руб}$	k_{np}	k_{∂}	k_p	$З_m, \text{руб}$	$З_{\partial n}, \text{руб}$	$T_p, \text{раб.дн.}$	$З_{осн}, \text{руб}$
Руководитель	28600	0,3	0,2	1,3	55770	1828,89	42,2	77179,2
Инженер	11280	0,3	0,2	1,3	21996	721,33	219	157971,3
Итого:								235150,5

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

– для руководителя:

$$З_{\text{дон}} = K_{\text{дон}} \times З_{\text{осн}} = 0,15 \times 77179,2 = 11576,8 \text{руб.} \quad (5.11)$$

– для инженера:

$$З_{\text{дон}} = K_{\text{дон}} \times З_{\text{осн}} = 0,15 \times 157971,3 = 23695,7 \text{ руб.} \quad (5.11)$$

где $k_{\text{дон}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,15).

Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Для руководителя:

$$З_{внеб} = K_{внеб}(З_{осн} + З_{бон}) = 0,3 \times (77179,2 + 11576,8) = 26626,8 \text{ руб. (5.12.1)}$$

Для инженера:

$$З_{внеб} = K_{внеб}(З_{осн} + З_{бон}) = 0,3 \times (157971,3 + 23695,7) = 54500,1 \text{ руб. (5.12.2)}$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2023 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и т. д.

Величина накладных расходов определяется по формуле 5.13:

$$З_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) K_{нр} \quad (5.13)$$

Где:

$K_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величина коэффициента принимается равной 0,16.

$$\begin{aligned} З_{накл} &= (82178 + 21250 + 235150,5 + 35272,6 + 81126,9) \times 0,16 \\ &= 454978 \times 0,16 = 72796,48 \text{ руб} \end{aligned}$$

Бюджетная стоимость НИР

Группировка затрат по статьям представляется в таблице 5.14:

Таблица 5.14 – Группировка затрат по статьям

Статья						
1	2	3	4	5	6	7
Материалы , руб.	Амортизация, руб.	Основная за работная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Отчисления на социальны е нужды, руб.	Накладные расходы, руб.	Стоимость бюджета, руб.
82178	21250	235150,5	35272,6	81126,9	72796,48	527774,48

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется бюджет НИ «Исследование прочности фрез методом конечных элементов при аддитивно-субстративной обработке образцов из стали 40Х13» по форме, приведенной в таблице 5.15. В таблице также представлено определение бюджета затрат двух конкурирующих научно-исследовательских проектов

Таблица 5.15 – Группировка затрат по статьям.

№	Наименование статьи	Сумма, руб.		
		Текущий Проект	Исп.2	Исп.3
1	Материальные затраты НИР	82178	84869,45	80231
2	Затраты на специальное оборудование	21250	3075	26712
3	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	235150,5	971582,82	296770,26
4	Затраты по дополнительной заработной плате	35272,6	145737,42	44515,54

	исполнителей темы			
5	Отчисления в внебюджетные фонды	81126,9	291474,84	92031,08
6	Накладные расходы	72796,48	85674,86	74052,62
Бюджет затрат НИР		527774,48	1582414,39	614312,5

Где: Исп.2 – Аналог 1, Исп.3- Аналог 2;

5.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности

исследования.

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегрального показателя ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получен в процессе оценки бюджета затрат трех вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принят за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве аналогов данной НИР рассмотрены:

- 1). Моделирование напряженно-деформированного состояния толстостенных втулок после обработки дорнованием;
- 2). Влияние размеров фасок на наплывы металла на торцах цилиндров, обрабатываемых дорнованием;

Интегральный финансовый показатель разработки рассчитывается как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{Ана.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (5.14)$$

Где

$I_{\text{финр}}^{\text{Ана.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

$\Phi_{\max}$ – максимальная стоимость исполнения.

$$I_{\text{финр}}^{\text{тек.пр.}} = \frac{\Phi_{\text{тек.пр.}}}{\Phi_{\max}} = \frac{527774,48}{1582414} = 0,33$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{Ана.1}} = \frac{\Phi_{\text{Ана.1}}}{\Phi_{\max}} = \frac{1582414}{1582414} = 1$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{Ана.2}} = \frac{\Phi_{\text{Ана.2}}}{\Phi_{\max}} = \frac{614312,5}{1582414} = 0,39$$

В результате расчетов интегральных финансовых показателей по трем вариантам разработки текущий проект с меньшим перевесом признан считается более приемлемым с точки зрения финансовой эффективности.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов определяются путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 5.16).

Таблица 5.16 – Сравнительная оценка характеристик всех вариантов.

Объекты исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Исп. 2	Исп. 3
1. Безопасность при использовании тановки	0,3	5	5	4
2. Стабильность работы	0,15	4	5	3
3. Технические характеристики	0,2	5	4	4
4. Механические свойства	0,2	5	4	5
5. Материалоёмкость	0,15	5	4	4
Итого:	1	4,85	4,45	4,05

В результате расчетов интегральных показателей ресурсоэффективности по трем вариантам разработки текущий проект с большим перевесом признан считается более приемлемым с точки зрения ресурсной эффективности.

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{\text{Тек.пр.}} = 4,85;$$

$$I_{\text{аналог1}} = 4,45;$$

$$I_{\text{аналог2}} = 4,05.$$

На основании полученных интегрального финансового показателя и интегрального показателя ресурсоэффективности был рассчитан интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{\text{вари}}$) по формуле:

$$I_{\text{Ана.}i} = \frac{I_{\text{р}i}}{I_{\text{Ана.}i}^{\text{финр}}} (5.15)$$

$$I_{\text{Тек.пр.}} = \frac{4,85}{0,33} = 14,7$$

$$I_{\text{Ана.1}} = \frac{4,45}{1} = 4,45$$

$$I_{\text{Ана.2}} = \frac{4,05}{0,39} = 10,38$$

Далее среднее значение интегрального показателя эффективности каждого варианта НИР сравнивалось со средним значением интегрального показателя эффективности текущего проекта с целью определения сравнительной эффективности проектов (таблица 5.17).

Таблица 5.17 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,33	1	0,39
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,85	4,45	4,05
3	Интегральный показатель эффективности	14,7	4,45	10,38
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,3	0,7

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее финансовым и

ресурсным эффективным вариантом является текущий проект. Наш проект является более эффективным по сравнению с конкурентами.

5.5 Выводы подразделу

Вывод №1: результат анализа конкурентных технических решений заключается в том, что текущий проект является самым конкурентоспособным вариантом по сравнению с аналогами.

Вывод №2: в процессе планирования для руководителя и инженера построен график реализации данного этапа работ, который способствует оценке и планированию рабочих времени исполнителей. Общие количества дней для выполнения работ составляет 261 дней. Общие количества дней, в течение которых работал инженер, составляет 219 дней. Общие количества дней, в течение которых работал руководитель, составляет 42 дней.

Вывод №3: для оценки затрат на реализацию проекта разработан проектный бюджет, значение которого составляет 527774,48 рублей. (требуемый затраты текущего проекта значительно меньше других конкурентных вариантов).

Вывод №4: Результаты оценки эффективности текущего проекта представляются ниже:

1) Значение интегрального финансового показателя текущего проекта составляет 0,33, которое показано, что текущий проект является более выгодным по сравнению с другими вариантами;

2) Значение интегрального показателя ресурсной эффективности текущего проекта составляет 4,85 по сравнению с 4,45 (первого конкурента) и

4,05 (второго конкурента);

3) Значение интегрального показателя эффективности текущего проекта составляет 14,7 по сравнению с 4,45 (первого конкурента) и 10,38 (второго конкурента), которое является наиболее высоким из всех вариантов. Это показано, что текущий проект является наиболее эффективным вариантом исполнения.

6 ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа		ФИО	
4AM11		ШэЛу	
Школа	Инженерная школа новых производства технологии	Отделение (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	магистратура	Направление/ специальность	15.04.01 Машиностроение

Тема ВКР:

Исследование прочности фрез методом конечных элементов при аддитивно-субстративной обработке образцов из стали 40X13		Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
		Введение – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации	Объект исследования: исследование прочности фрез методом конечных элементов при аддитивно-субстративной обработке образцов из стали 40X13 Область применения: машиностроение, заводская обработка. Рабочая зона: лаборатория. Размеры помещения: 56 м². Количество и наименование оборудования рабочей зоны: компьютер, станок универсальный токарно-винторезный модели 1K62, динамометр. Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне: установите динамометр, проведение экспериментов по обработке и сбор данных, отстройте компьютерное программное обеспечение для анализа данных.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:			
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения – специальные (характерные		1. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018) 2. ГОСТ 12.2.032–78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя.	

при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	Общиеэргономическиетребования. 3.ГОСТ 22269–76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общиеэргономическиетребования. 4. Федеральный закон от 28 декабря 2013 г. N 426-ФЗ "О специальной оценке условий труда.
2. Производственная безопасность при разработке проектного решения: – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов	Опасныефакторы: 1. Повышеннаятемператураповерхностей и оборудования 2. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека; 3. Движущиеся машины и механизмы, передвигающиеся заготовки и материалы; Вредныефакторы: 1. Отклонениепоказателеймикроклимата; 2. Превышениеуровняшума; 3. Недостаточнаяосвещенностьрабочейзоны; Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов: использование защитных костюмов, виброизолирующие рукавицы, перчатки, виброизолирующая обувь, беруши, наушники, защитные ограждения. Расчет: расчет системы искусственного освещения.
3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения	Защита селитебной зоны (при обработке инструмента будет некоторый шум и металлический порошок). Анализ воздействия объекта на атмосферу (при работе станков воздух загрязняется испарениями от смазочно-охлаждающих жидкостей). Анализ воздействия объекта на гидросферу (сточные воды предприятий содержат нефтепродукты). Анализ воздействия объекта на литосферу (при эксперименте точения стали образуют много

	железной стружки)
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации.	Возможные ЧС: Природные катастрофы (сильные морозы зимой.); Техногенные воздействия (шпионаж, диверсия); Наиболее типичная ЧС: Пожар.
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ11	ШэЛу		

Введение

При выполнении работы большая часть времени проводилась в 16А корпусе ТПУ. В лаборатории № 101 проводилось исследование прочности сменных многогранных пластин методом конечных элементов при обработке стали (Сталь 40Х13).

В результате экспериментов было установлено влияние толщины среза а на силы на передней поверхности режущего клина и изменение составляющих сил резания с учётом выбранного переднего угол. Используемое оборудование и материалы имеют следующие виды: 1) Станок универсальный токарно-винторезный модели 1К62. 2) динамометр фирмы Kistler (Швеция) с интерфейсом для подключения к персональному компьютеру. 3) Микроскоп БМИ-1. 4) Прутки из стали марки 40Х13. 5) Державка, фрезерованная с набором твёрдосплавных сменных многогранных пластин с разными передними углами.

Полученные результаты позволяют инженерам знать стойкости и надежности инструмента, и оптимальные параметры обработки.

В этом разделе рассматриваются вопросы, связанные с организацией рабочего места в соответствии со стандартами промышленной санитарии, промышленной безопасности и охраны окружающей среды.

6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

На рисунке 6.1.1 показано спроектированное рабочее место.

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.

Эксперименты проводятся под полным руководством инструктора. В моей работе самая опасная зона является рабочим местом станочника, поэтому во время станочных операций только один специальный оператор работает в рабочей зоне, который носит защитные очки и нельзя носить перчатки, потому что перчатки легко захватываются движущимися частями станка в процессе обработки. При очистке железных стружки необходимо использовать железную

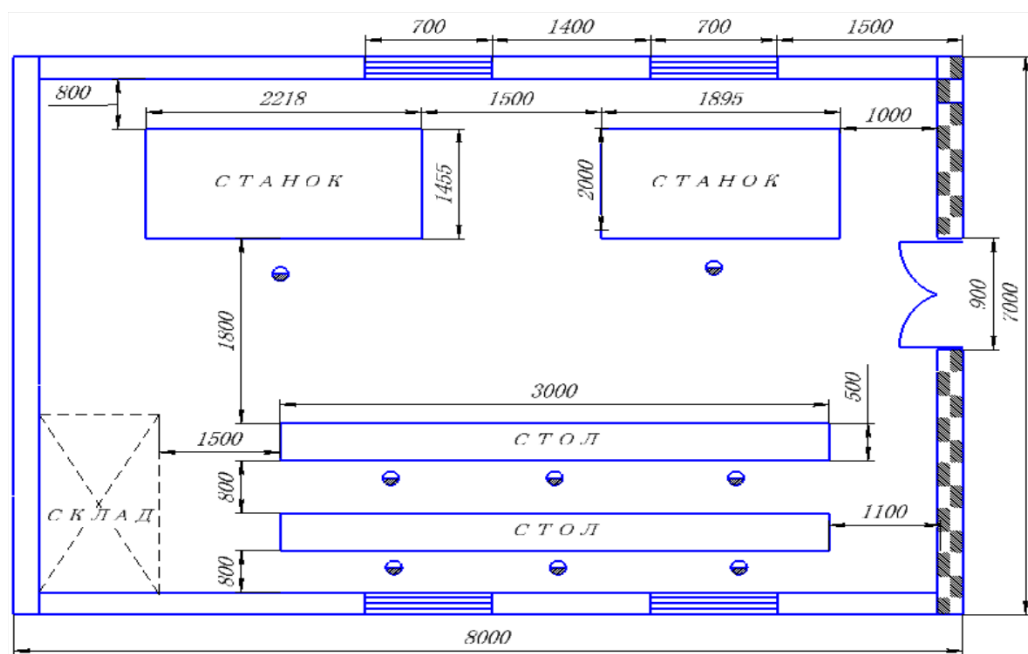


Рис. 6.1.1 – Рабочее место (Аудитория101А в 16А корпусе)

щетку.

Правовые нормы трудового законодательства

Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018), Целями трудового законодательства являются установление государственных гарантий трудовых прав и свобод граждан, создание благоприятных условий труда, защита прав и интересов работников и работодателей. Вся информация из трудового кодекса Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018)

Режим рабочего времени - По ТК РФ Статья 91 «Понятие рабочего времени. Нормальная продолжительность рабочего времени» Нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю.

Защита персональных данных работника – в ТК РФ глава 14 статьи 85-90 описано, что в целях обеспечения прав и свобод человека и гражданина работодатель и его представители при обработке персональных данных работника обязаны соблюдать следующие общие требования: содействия работникам в трудоустройстве, получении образования и продвижении по службе, обеспечения личной безопасности работников и т.д.

Оплата и нормирование труда – основные понятия и определения:

1) Заработная плата (оплата труда работника) - вознаграждение за труд в зависимости от квалификации работника, сложности, количества, качества и условий выполняемой работы, а также компенсационные выплаты.

2) Тарифная ставка - фиксированный размер оплаты труда работника за выполнение нормы труда определенной сложности (квалификации) за единицу времени без учета компенсационных, стимулирующих и социальных выплат.

Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны

Одним из факторов комфортности рабочей среды является организация рабочего места. Рабочее место должно соответствовать ГОСТ 12.2.032–78 ССБТ. Рабочее место при выполнении. Общие эргономические требования.

Общие положения состоят из следующих элементов:

1) Рабочее место организуют при физической работе средней тяжести и тяжелой, а также при технологически обусловленной величине рабочей зоны, превышающей ее параметры при работе сидя. Категория работ - по ГОСТ 12.1.005–88, моя категория работа это средней тяжести.

2) Конструкция, взаимное расположение элементов рабочего места (органы управления, средства отображения информации и т. д.) должны соответствовать антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям, а также характеру работы.

3) Рабочее место должно быть организовано в соответствии с требованиями стандартов, технических условий и (или) методических указаний по безопасности труда.

Еще одним фактором комфортности рабочей среды является взаимное расположение элементов рабочего места. Взаимное расположение элементов рабочего места должно соответствовать ГОСТ 22269–76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования устанавливает требования к организации рабочего места оператора, чтобы исключить или снизить риск возникновения напряжения, усталости, снижения работоспособности и

несчастных случаев при работе с машинами, оборудованием и другими объектами производственного назначения.

В документе приводятся эргономические требования к устройствам и элементам рабочего места оператора, таким как:

- Рабочая поверхность – должна быть прочной, устойчивой и покрытой материалом, обеспечивающим устойчивость и поглощение вибраций;
- Сиденье – должно обеспечивать удобное и безопасное положение тела оператора, регулируемое по высоте и наклону;
- Стол – должен быть установлен на определенной высоте и иметь размеры и форму, обеспечивающие удобство и комфорт при работе;
- Ручки управления и клавиши – должны быть легкодоступными, соответствовать эргономическим требованиям по форме, размеру и расположению, и предоставлять всю необходимую информацию для правильного управления машинами и оборудованием.

Документ также устанавливает требования к пространственному расположению элементов рабочего места оператора, различным зонам, габаритам помещения, воздухообмену и освещению.

Окончательно, ГОСТ 22269–76 определяет эргономические требования к рабочему месту оператора, что в результате должно обеспечить максимальный комфорт работы оператора и снижение риска травм

Специальной оценке условий труда

Федеральный закон от 28 декабря 2013 года № 426-ФЗ "О специальной оценке условий труда" устанавливает правовую основу для проведения специальной оценки условий труда (СОУТ) на рабочих местах для оценки и

предотвращения вредных и опасных производственных факторов, которые могут негативно сказаться на здоровье работников.

Основные положения закона:

- СОУТ является обязательным для всех предприятий и организаций, оказывающих трудовые услуги;
- Организации обязаны проводить оценку вредных и опасных производственных факторов и разрабатывать планы мероприятий по устранению их воздействия;
- Оценка должна проводиться регулярно, с учетом изменений оборудования, технологии и других факторов, которые могут повлиять на условия труда;
- Проведение СОУТ может осуществляться с помощью экспертов-консультантов или силами самой организации;
- Отчет по результатам оценки должен быть представлен в органы государственного контроля и надзора в области труда.

Цель закона - установление требований защиты работника от вредных и опасных производственных факторов, а также проверка соответствия условий труда требованиям законодательства в сфере охраны труда.

6.2 Производственная безопасность

Для идентификации потенциальных факторов необходимо использовать ГОСТ 12.0.003–2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация». Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды необходимо представить в виде таблицы 6.2.1.

Таблица 6.2.1 – Возможные опасные и вредные производственные факторы на рабочем месте название рабочего места.

Факторы (ГОСТ 12.0.003–2015)	Нормативные документы
1.Отклонение показателей микроклимата	ГОСТ 12.1.005–88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
2.Превышение уровня шума	ГОСТ 12.1.003–2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности, ГОСТ 30691 (ИСО 4871:1996) Шум машин. Заявление и контроль значений шумовых характеристик)
3.Недостаточная освещенность рабочей зоны	Искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*;
4.повышенная температура поверхностей и оборудования	ГОСТ Р 51074–2003 "Тепловая защита зданий. Требования".
5.Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, для машины и механизмы.
6.Движущиеся машины и механизмы, передвигающиеся заготовки и материалы;	ГОСТ 12.3.009–76 ССБТ. Работы погрузочно-разгрузочные. Общие требования безопасности.

Анализ опасных и вредных производственных факторов

Отклонение показателей микроклимата.

Микроклимат в производственных условиях определяется следующими параметрами:

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

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. ГОСТ 12.1.005–88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. Допустимые значения микроклимата для этого случая даны в таблице 6.2.2.

Таблица 6.2.2 – Допустимые значения микроклимата.

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

Одной из основных мер по оптимизации микроклимата и состава воздуха промышленных площадок является обеспечение надлежащего воздухообмена и обогрева, а также изоляция нагреваемых поверхностей оборудования,

воздуховодов и труб.

Превышение уровня шума.

Внезапные шумы высокой интенсивности, даже кратковременные (взрывы, удары и т. п.), могут вызвать как острые нейросенсорные эффекты (головокружение, звон в ушах, снижение слуха), так и физические повреждения (разрыв барабанной перепонки с кровотечением, поражения среднего уха и улитки).

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 превышает 80 дБА. Максимальный уровень звука постоянного шума на нашем рабочем месте до 75 дБА, основной шум исходит от производства и обработки токарного станка. ГОСТ 12.1.003–2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности, (ГОСТ 30691 (ИСО 4871:1996) Шум машин. Заявление и контроль значений шумовых характеристик)

Шум от источников аэродинамического шума можно уменьшить применением виброизолирующих прокладок, установленных между основанием машины, прибора и опорной поверхностью. В качестве прокладок используют резину, войлок, пробку, амортизаторы.

Недостаточная освещенность рабочей зоны:

Помещения имеют как естественное, так и искусственное освещение. Вследствие того, что работа оператора по обслуживанию пульта управления радиостанцией соответствует разряду зрительной работы III б, следует соблюдать следующие требования, предъявляемые рабочему месту, моё рабочее место: $E=300$ лк, искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП

23-05-95*; Естественное освещение осуществляется через 142 светопроемы, обеспечивающие необходимый коэффициент естественной освещенности (КЕО) не ниже 1,2 %.

В качестве источников света при искусственном освещении применяются преимущественно люминесцентные лампы типа ЛБ.

Повышенная температура поверхностей и оборудования

Когда эксперимент по обработке станка проводится в лаборатории 101а корпус 16а, при запуске станка он нагревается, особенно обрабатывающая часть, поэтому очень важно устройство отвода тепла для машины и человека.

Возможна опасность ожогов при контакте с нагретой поверхностью. Чтобы избежать этого, необходимо соблюдать определенные меры предосторожности.

1. Использование защитной экипировки. Работник, который работает рядом с машиной, должен надевать защитные перчатки, рукавицы, одежду и другую специальную экипировку из материалов, которые обладают высокой теплостойкостью.

2. Установка специальных систем охлаждения и вентиляции. Для снижения температуры в лаборатории можно использовать системы охлаждения и вентиляции. Они помогут снизить температуру воздуха в рабочей зоне и уменьшить риск ожогов.

3. Расположение обрабатывающей части далеко от рабочей зоны. Обрабатывающую часть станка можно расположить на достаточном расстоянии от рабочей зоны. Тем самым можно снизить риск контакта с нагретой поверхностью.

4. Усиленный контроль и мониторинг. Обязательным условием работы на

станке является усиленный контроль и мониторинг его работы. Это позволит немедленно выявить любые неполадки в работе станка и принять меры для их устранения.

Таким образом, для избежания ожогов при работе со станком необходимо соблюдать меры предосторожности, использовать защитную экипировку, устанавливать системы охлаждения и вентиляции, контролировать работу станка и располагать обрабатываемую часть на достаточном расстоянии от рабочей зоны. Это позволит снизить риск возникновения опасных

Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека:

Оборудование, находящееся в пределах рабочей площадки (динамометр фирмы Kistler, Микроскоп БМИ-1), работает от электрического тока. Как следствие, существует вероятность поражения электрическим током рабочего. Проходя через человека электрический ток воздействует на организм следующим образом:

- 1) Биологическое воздействие.
- 2) Электролитическое воздействие.
- 3) Термическое воздействие.

В соответствии с электрическими опасностями помещения классифицируются как неопасные, т. к. электрические цепи, образующие искры, дуги или нагревательные части под напряжением не используются (см. ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, для машины и механизмы).

Движущиеся машины и механизмы, передвигающиеся заготовки и материалы

В нашей лаборатории мы должны обеспечить требования к установке во время процесса загрузки и разгрузки. При перемещении машин и механизмов или после перемещения заготовок и материалов разумная установка и разборка очень важны и должны соответствовать национальным стандартам, см. ГОСТ 12.3.009–76 ССБТ. Работы погрузочно-разгрузочные. Общие требования безопасности.

Безопасность производства погрузочно-разгрузочных работ должна быть обеспечена: выбором способов производства работ, подъемно-транспортного оборудования и технологической оснастки; подготовкой и организацией мест производства работ; применением средств защиты, работающих; проведением медицинского осмотра лиц, допущенных к работе, и их обучением.

Выбор способов производства работ должен предусматривать предотвращение или снижение до уровня допустимых норм воздействия на работающих опасных и вредных производственных факторов путем: механизации и автоматизации погрузочно-разгрузочных работ; применения устройств и приспособлений, отвечающих требованиям безопасности; эксплуатации производственного оборудования в соответствии с действующей нормативно-технической документацией и эксплуатационными документами.

Расчет уровня производственного фактора

Нормы освещенности по СП 52.13330.2016 для «Механических, инструментальных цехов, отделений, участков, цеха оснастки, ОТК. (Г-0.8)» составляют 300 люкс.

Световой поток лампы Φ определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N_L \cdot \eta}$$

Где:

E_H – нормативная освещённость по СП 52.13330.2016, лк;

S – площадь освещаемого помещения, м²;

K_3 – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, светотехнической арматуры, стен и пр., т. е. отражающих поверхностей), наличие в атмосфере цеха дыма;

Z – коэффициент неравномерности освещения (для люминесцентных ламп 1.1),

N_L – число ламп в помещении (необходимо учесть число ламп в светильнике);

η – коэффициент использования светового потока, который зависит от индекса помещения i , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью h и коэффициентов отражения стен R_c и потолка R_n .

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = S / h(A + B)$$

Рассчитав световой поток Φ , зная тип лампы, по табл. выбираем ближайшую стандартную лампу и определяем электрическую мощность

осветительной системы.

Основное станочное помещение с размерами: длина **A**=8 м, ширина **B**=7 м, высота **H**=4 м.

Высота рабочей поверхности **h_{pn}** =0,8 м.

Требуемая освещенность **E**=300 лк.

Коэффициент отражения стен **Rc**=50%, потолка **Rn**=70%.

Коэффициент запаса **k**=1,5, коэффициент неравномерности **Z**=1,1.

Выбираем стандартную ближайшую лампу – ЛТБ 40 Вт с потоком 2850 Лм.

Делаем проверку выполнения условия:

Выбираем светильники с люминесцентными лампами типа ОДОР-2-40.

Одним из критериев оптимальности расположения светильников является величина $\lambda=1,4$ (для ОД).

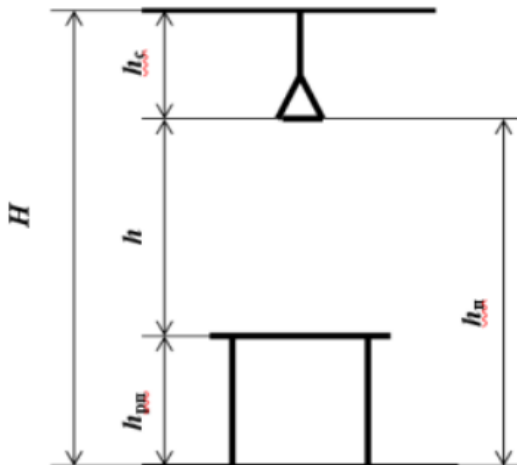


Рис. 6.2.1 – Основные расчетные параметры

Принимаем $\lambda=1,4$, расстояние светильников от перекрытия (свес) **hc** = 0,5 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 147 светильников ОДОР: $h_n = 3,5$ м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_p - h_c = 4 - 0,8 - 0,5 = 2,7 \text{ м};$$

$$L = \lambda \cdot h = 2,7 \times 1,4 = 3,78 \text{ м}$$

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

$$l = \frac{L}{3} = \frac{3,78}{3} = 1,26 \text{ м}$$

Размещаем светильники в два ряда. В одном ряду можно установить 4 светильника типа ОД мощностью 40 Вт (с длиной 1,26 м), при этом разрывы между светильниками в ряду составит 52 см. Изображаем в масштабе план помещения и размещения в нем светильников (рис.6.2.2). Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении $n = 8 \times 1 \times 12 = 16$ ламп.

Индекс помещения:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{8 \cdot 7}{2,7 \cdot (8 + 7)} = 1,38$$

Коэффициент использования светового потока для светильников типа ОДОР с люминесцентными лампами при:

$$\rho_{\Pi} = 70\%; \rho_{\text{с}} = 50\%$$

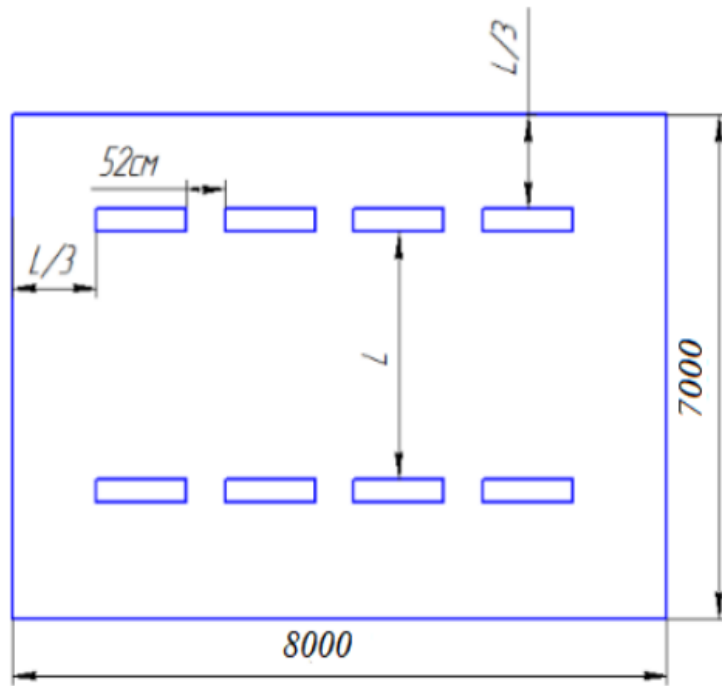


Рисунок 6.2.2 – Схема расположения светильников производственном помещении

Индекс помещения $i = 1,4$, равен $\eta = 0,56$.

Потребный световой поток люминесцентной лампы светильника определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N_L \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 56 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{16 \cdot 0,56} \text{ лм}$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \cdot 100\% \leq +20\%$$

$$\frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \cdot 100\% = \frac{2850 - 3094}{2850} \cdot 100\% = -8,5\%$$

Таким образом: $-10\% \leq -8,5\% \leq +20\%$, необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

6.3 Экологическая безопасность

Охрана окружающей среды является сложной проблемой, и наиболее активной формой её решения является снижение вредных выбросов промышленных предприятий путем полного перехода на безотходную или малоотходную технологию производства.

Защита селитебной зоны

В моем эксперименте поскольку во время обработки инструмента будет некоторый шум и металлический порошок, поэтому мой эксперимент далеко от жилых районов. СанПиН 1.2.3685–21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания".

Анализ воздействия объекта на атмосферу

В моем эксперименте основные загрязнители — масла и металлическая пыль, которые попадают в атмосферу, воду и почву, также при работе станков воздух загрязняется испарениями от смазочно-охлаждающих жидкостей, решение состоит в том, чтобы носить пылезащитную маску и хорошую вентиляцию, они являются III класс - умеренно опасные отходы.

Анализ воздействия объекта на гидросферу

В моем эксперименте являются основными источниками загрязнения окружающей среды. Сточные воды предприятий содержат нефтепродукты, образующиеся из смазочно-охлаждающих жидкостей и растворов обезжиривания, ионы тяжелых металлов, они являются II класс — высоко опасные отходы. из гальванических производств множество химических соединений. ГОСТ 17.1.3.13-86. Охрана природы. Гидросфера. Общие

требования к охране поверхностных вод от загрязнений.

Анализ воздействия объекта на литосферу

Токсичные вещества, тяжёлые металлы, свинец, оксид азота, ртуть и т. д. сначала попадают в почву, затем — в растения и дальше — в организм человека (или сначала — в животных, а уже потом — человека), вследствие чего увеличивается количество заболеваний и развиваются аллергические реакции, они являются I класс - чрезвычайно опасные отходы.

При эксперименте точения стали образуют много железной стружки, мы собираем эти железные стружки и перенесем их на склад после эксперимента, а затем перевезут стружки в специализированный завод на переработку для повторного использования.

Экспериментальные инструменты и заготовки можно продолжать использовать на школьных фабриках. Большой изношенный режущий инструмента в эксперименте может быть использован в качестве типичного примера в обучении. «Методика проведения работ по комплексной утилизации вторичных драгоценных металлов из отработанных средств вычислительной техники».

6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация — это ситуация опасных событий или явлений, которые приводят к нарушениям безопасности жизни. К ним относятся: высокие и низкие температуры, физические упражнения, вредные дозы эффективных токсических веществ, высокие дозы радиации, производственный шум и вибрация и другие опасности, которые могут нанести вред человеческой жизни. ГОСТ Р 22.0.01–2016. Безопасность в ЧС. Основные положения.

Наиболее типичной ЧС в 1-ом этаже корпуса 16А, ТПУ

- возгорание устройств искусственного освещения.
- возникновение короткого замыкания в электропроводке вследствие неисправности самой проводки или электросоединений и электрораспределительных щитов;
- возгорание устройств вычислительной аппаратуры вследствие нарушения изоляции или неисправности самой аппаратуры;
- возгорание мебели или пола по причине нарушения правил пожарной безопасности, а также неправильного использования дополнительных бытовых электроприборов и электроустановок;

Рассматриваем две ситуации ЧС

1) Природная– сильные морозы зимой;

Производственный цех находится в городе Томск с континентально-циклоническим климатом. Природные явления (землетрясения, наводнения, засухи, ураганы и т. д.) в Томске отсутствуют. Возможными ЧС

могут быть: природного характера – сильные морозы.

Разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;

- Водоканале: следует обеспечить подвоз питьевой и технической воды рабочим, если нет возможности прервать технологический цикл изготовления деталей. Также в цеху рекомендуется иметь запас питьевой воды из расчёта 2 л/чел. в смену.

- Теплотрассе: предусмотреть обогреватели помещения, работающие от электрической сети, а также СИЗ (тёплая одежда, перчатки, шапки).

- Электросетях: следует обеспечить генератором (бензиновым или дизельным), который сможет производить ток требуемой мощности.

2) Техногенная– шпионаж, диверсия;

Чрезвычайные ситуации, возникающие в результате диверсий, возникают все чаще. В большинстве случаев такие угрозы оказываются ложными, однако, работы в данном случае все равно не прекращаются. На основании Федерального закона от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 30.04.2021) "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности"

<https://docs.cntd.ru/document/902111644>

Разработка превентивных мер по предупреждению ЧС

Для предупреждения вероятности осуществления диверсии предприятие необходимо оборудовать системой видеонаблюдения, круглосуточной охраной, пропускной системой, надежной системой связи, а также исключить распространение информации о системе охраны объекта, расположении помещений и оборудования в помещениях, сигнализаторах, их местах установки и количестве. Должностные лица проводят обучение каждые шесть месяцев, чтобы сформулировать действия в чрезвычайных ситуациях. Так же необходимо предусмотреть наличие эвакуационных выходов для персонала. Количество эвакуационного выхода из здания на каждом этаже составляет не менее двух. Ширина эвакуационного выхода (ворот) зависит от общего количества людей, эвакуированных через выход, но ширина не менее 0,8м. Высота прохода на эвакуационных путях не менее 2 м. План эвакуации приведен на рис.6.4.3.1.



Рис. 6.4.1 – План эвакуации при пожаре и других ЧС из 1-го этажа корпуса 16а.

6.5 Выводы по разделу

Категория помещения по электробезопасности, согласно ПУЭ, является помещением без повышенной опасности, все электроустановки используются по требованию к ПУЭ.

По электробезопасности согласно правилам по охране труда при эксплуатации электроустановок, Работники обязаны проходить обучение безопасным методам и приемам выполнения работ в электроустановках, и имеют защитные инструменты.

По СанПиН 1.2.3685–21 определили окружающую среду рабочего места, которая обеспечивает безвредности для работников.

По СП 12.13130.2009 определили категории помещений по взрывопожарной и пожарной опасности, является Г умеренная пожароопасность из-за опасности газов и стружки в обрабатываемых деталях.

Определили производство сталь является умеренным негативным воздействием на окружающую среду, к объектам II категории.

7 Приложение А – Раздел на иностранном языке

(справочное)

Investigation of the strength of cutters by the finite element method during additive-subtractive processing of samples from steel 40X13

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4AM11	Шэ Лу		14.03.2023

Консультант отделения материаловедения ИШНПТ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Козлов В. Н.	к.т.н., доцент		14.03.2023

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Гутарева Н. Ю.	к.пед.н., доцент		14.03.2023

Introduction

Abstract: This paper presents the analysis of cutting forces, contact stress, stress-strain state during conventional (climb milling) and up milling with sharp and worn end mills.

Key words: additive-subtractive processing, milling, 40X13 steel, end mill, cutting mode, contact stresses.

7.1 Literary Review

Designs and geometrical parameters of end mills and SMP (replaceable polyhedral inserts)

● **A end mill is a** tool that is used for machining the ends of workpieces in a production process. End mills exist in many different designs and with different geometries that determine their functionality and characteristics.

The design of the end mill (Fig.2.1.1) includes:

5. The working part is the part of the cutter that has working teeth and is used to cut the material.

6. The shank is the part of the cutter that slides into the machine tool spindle and secures the cutter.

7. A tapered crown is a design element that raises the working teeth above the planting axis of the shank.

8. The transition angle is the angle that is formed between the working surface of the teeth and the plane perpendicular to the cutter axis.

9. The tip radius is the radius that is formed at the tip of the working teeth.

10. Inclined angles are angles formed between the working surface of the teeth and the plane passing through the fitting axis of the shank.

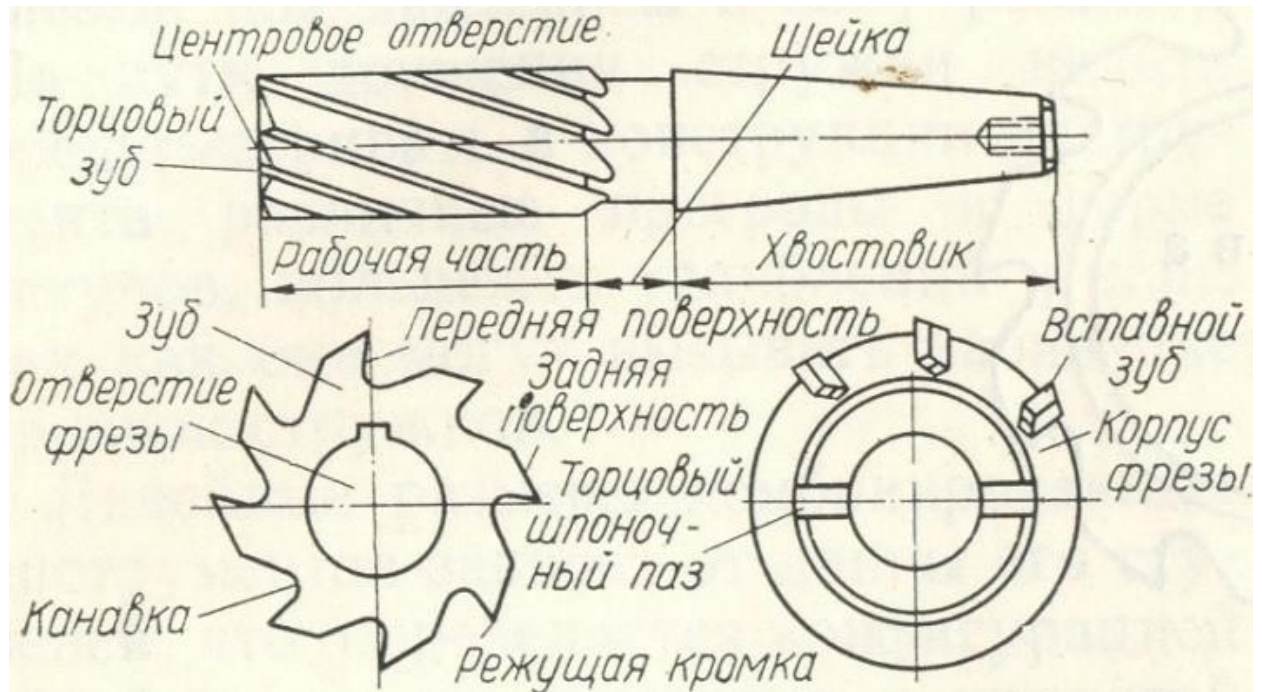


Fig.2.1.1 End mill design

One of the most important parameters of end mills is the shape of their teeth. For example, end mills can have straight teeth, spiral teeth or combination teeth. Depending on the tooth shape, end mills can be used for various types of surface finishing such as cutting, contouring, drilling, boring, etc.

In addition, there are other **geometric parameters** that can be used when describing end mills. These parameters include diameter, pitch, number of teeth, cut entry width, cut angle and cut length.

The diameter of the cutter is the distance between two opposite points on its diameter. Pitch is the distance between two teeth on the cutter. Number of teeth is the number of cutting teeth on the cutter. Width of entry to cut is the width by which the

cutter penetrates the material during machining. Angle of cut is the angle between the cutter's cutting edge and the material it is machining. Cut length is the length of the path of the material that has been removed during machining.

One of the important geometric parameters of end mills is the angle of the teeth, which can vary depending on the material being milled and the type of surface finish desired. Also important parameters are cutter diameter, number of teeth, tooth pitch and cutter tip radius.

To select the right end mill for your needs, there are many factors to consider, such as the type of material to be machined, the desired production volume and the accuracy to be achieved. Careful consideration of cutter geometry and design can help users make a more informed decision when choosing the cutter that best suits their needs.

● **SMP (replaceable multi-sided inserts)** are tools that are used for milling materials. They can have different designs and geometrical parameters, which depend on the specific type of application.

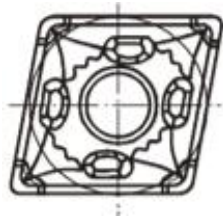


Figure 2.1.2 SMP with wells, grooves and ledges on the front surface

The SMP design basically consists of a main body on which replaceable polyhedral cutting-edge inserts are mounted. They can be made of different materials such as carbide alloys, ceramics or superhard materials. The SMP design may also include a plate clamping system (wrenching, clamping, etc.) that ensures that the plates are securely fixed to the main

body.

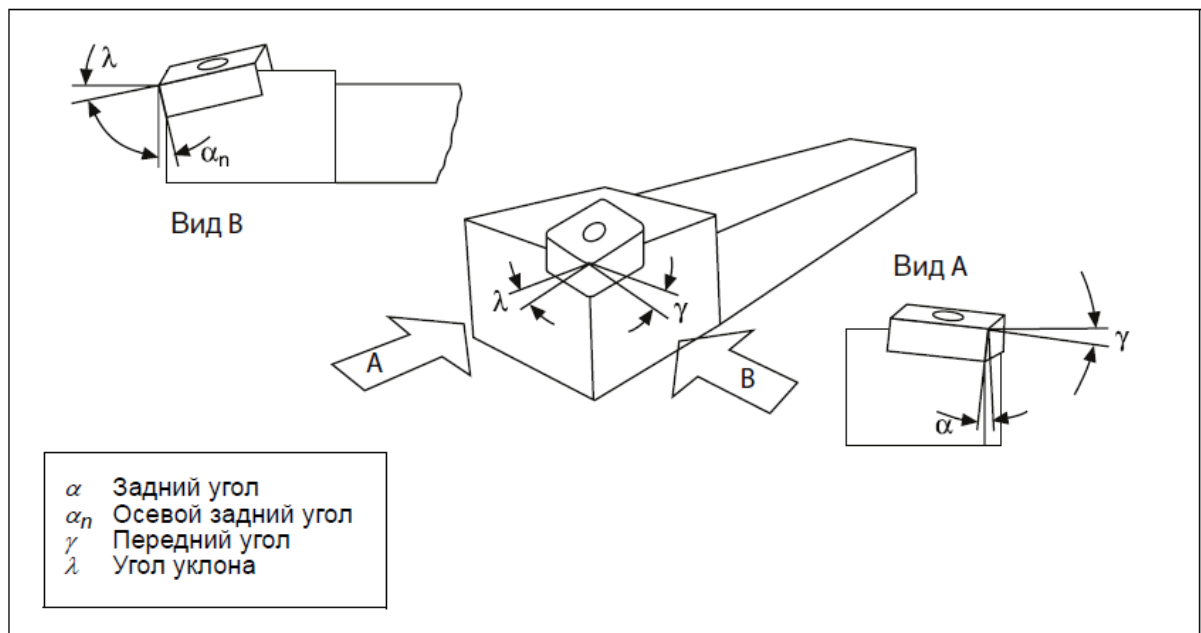


Fig.2.1.3 Obtaining the negative rake angle γ and the negative slope angle λ of the main cutting edge

The geometric parameters of the SMP include the following characteristics:

7. The width and length of the plate are the dimensions of the main plate that is attached to the machine.

8. Plate thickness is the size of the plate, which affects its stiffness and strength.

9. The shape of the clamping slots is the shape and size of the slots into which the interchangeable plates are inserted.

10. The cutting edge angle is the angle between the cutting edge and the surface of the workpiece.

11. The cutting direction angle is the angle between the tool edge and the cutting direction.

12. The number of cutting edges is the number of edges on the replaceable plate.

When choosing an SMP, there are several factors to consider, such as material, type, surface finish, price, special purpose and durability.

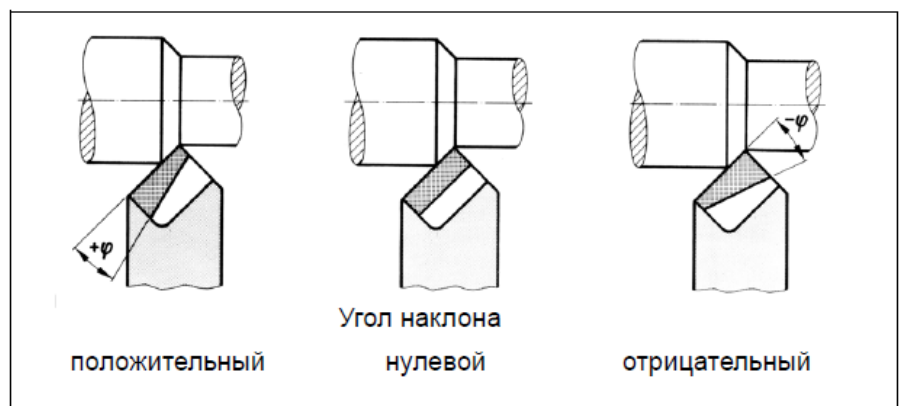


Fig.2.1.4 Variants of the inclination angles of the chip treads

Measurement of cutting force components during end milling, peculiarities of their changes in direction and magnitude

End milling is one of the machining processes that uses a cutter to remove material from the surface of a workpiece. The main components of cutting force in end milling are tangential cutting force, radial cutting force and feed force.

A tangential cutting force is a force that points toward the surface of the material and corresponds to the force that moves the cutter along the face of the workpiece. This force varies in direction and magnitude depending on how the shape of the material surface changes.

The radial cutting force is the force that is radially directed and corresponds to the force of the cutter moving along the face of the workpiece. The radial cutting force is small compared to the tangential cutting force, but it is still important for machining accuracy.

The feed force is the force in the transverse direction corresponding to the force with which the material is pressed against the cutter. This force varies in direction and magnitude depending on the width of the cutter and the feed angle.

Using a Kistler dynamometer, the components

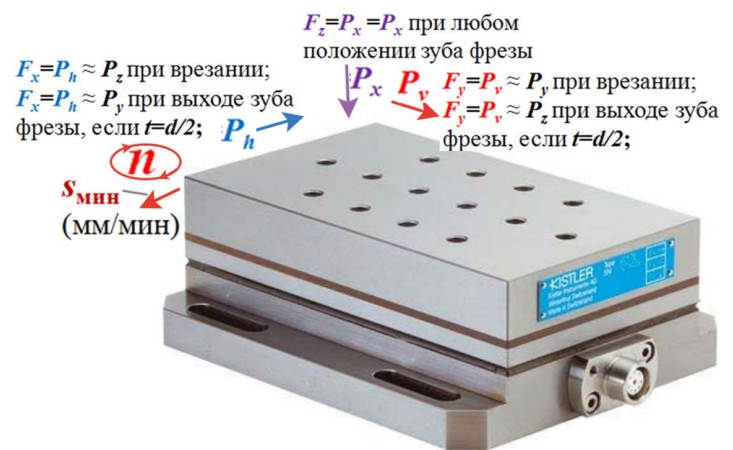


Fig. 2.2.1 The **directions** of the measured forces F_x, F_y and P_z displayed on the Kistler dynamometer **monitor**, their correspondence to the forces P_h, P_v and P_x during **milling** and the approximate correspondence of the tangential P_z and radial P_y forces during **plunging** and when the **tooth is out**

P_h , P_v and P_x of the cutting force were continuously measured.

The software of the Kistler dynamometer is designed so that the vertically directed force on the monitor is designated as F_z , the force in the horizontal plane towards the operator as F_y , the force in the horizontal plane from right to left as F_x .

Taking into account the counter milling of the side of the workpiece with the longest length (the workpiece is set across the dynamometer, the direction of the minute feed s_{min} (mm/min) from left to right is shown in Fig. 2) the force F_x on the monitor is the force P_h , the force F_y on the monitor is the force P_v , and the force F_z on the monitor is the axial force P_x (Fig. 2.2.1).

The results of measuring the direction and magnitude of each component of the cutting force at the end mill are shown in Fig. 2.2.2.

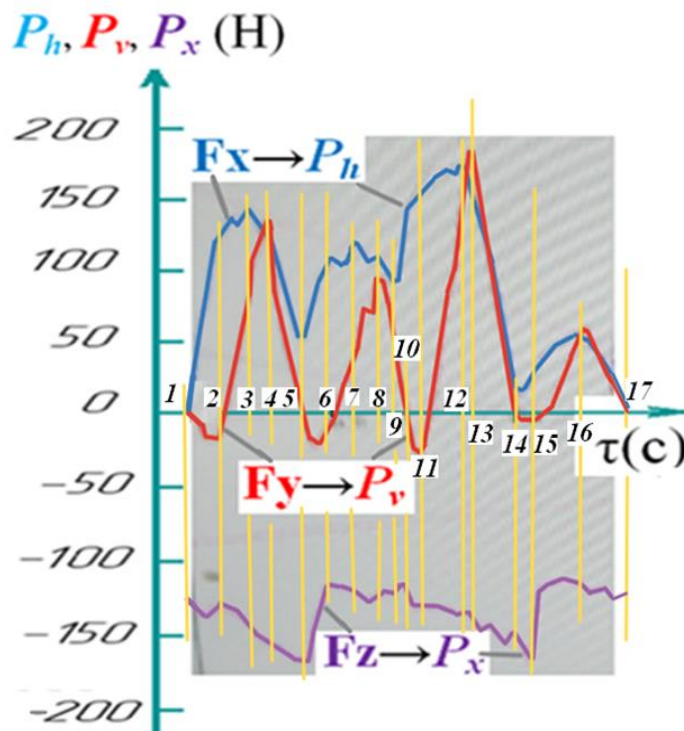


Fig. 2.2.2 Force curves for turning a sharp cutter one turn.

When the cutter tooth plunges into the workpiece with its back surface and rounded cutting edge, it pushes it away from the cutter's axis of rotation. This creates a negative force P_v , as shown in Figure 2.2.2 between numbers 1 and 2. As the cutter tooth continues to rotate (Figure 2.2.2 between numbers 2 and 3), the force P_v acts in the direction of the OY axis, attracting the workpiece to the cutter rotation axis because of the

positive main front angle γ . The component of the force P_h increases continuously as the cutter tooth rotates, which does not contradict the interaction of the cutter tooth with the workpiece.

Turning the cutter tooth by the angle ψ causes not only an increase in the cutting thickness a , but also a change in the direction of the components P_z and P_y of the cutting force. As the cutting thickness increases, the force P_z increases more intensively than P_y , which is responsible for chip shearing. As the cutter tooth rotates, the component P_v increases and the component P_h begins to decrease between numbers 3 and 4 in Figure 5.

Further rotation of the cutter leads to a decrease in the shear thickness and a decrease in the components P_z , P_y , P_h and P_v between numbers 4 and 5 in figure 2.2.2. Also the negative value of the axial force P_x , which indicates the tendency of the cutter

to lift the workpiece because of the positive angle of the cutter teeth $\omega=45^\circ$, does not change significantly during the cycle.

Changes in the components P_h and P_v of the cutting force occur not only due to changes in the shear thickness a when the cutter rotates, but also due to changes in the direction of the tangential P_z and radial P_y components of the cutting force. The large amplitude of changes in the lateral component P_v in the direction of the lowest rigidity of the end mill leads to the appearance of vibration, and the negative value of this component exacerbates the negative effect.

When the next cutter tooth is turned, the cycle of changing component forces is repeated. It is important to consider the changes in these forces when selecting parameters and tools to achieve the best quality when machining workpieces.

Peculiarities of their change in direction and magnitude:

The change in the components P_h and P_v of the cutting force (milling force) occurs not only because of the change in the thickness of cut a when the cutter rotates, but because of the change in direction of the tangential P_z and radial P_y components of the cutting force;

The large amplitude of change in the lateral component P_v in the direction of the lowest rigidity of the end mill leads to the appearance of vibration, and its, albeit small in magnitude, negative value (negative sign) aggravates this negative effect.

Study of the force on the front surface and on the chamfer of the wear on the rear surface, construction of their contact stress epigures during steel machining

To determine the physical components of cutting force on the front surface when machining steel, it is necessary to analyze the mechanical conditions of cutting. These conditions depend on the cutting mode, cutting tool geometry, material properties of the machined steel and other factors.

In general, the cutting force can be decomposed into several components, such as:

- The frictional force between the cutter and the material to be machined
- deformation force of the material in the cutting zone
- force of chip exit from the cutting zone

The physical components of the cutting force refer to the surfaces on which they are formed: the front and rear surfaces of the tool. [1]

The forces on the front surface of the tool balance the forces that occur in the shear plane as a result of deformation of the metal going into the chip.

The forces on the rear surface of the tool are the result of the interaction of the rear surface with the workpiece.

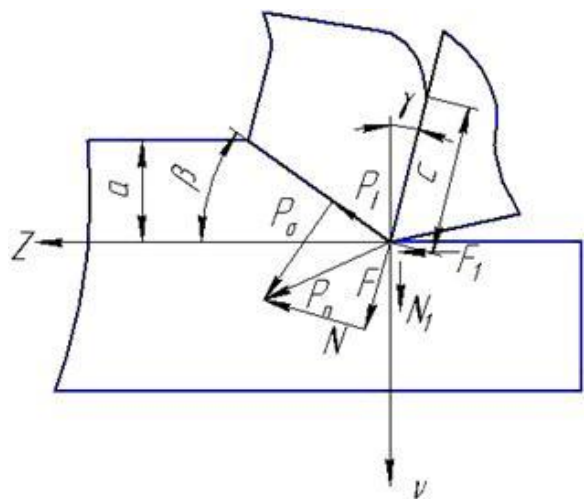


Fig. 2.3.1 Schematic of forces on the front and rear surfaces of the tool

The scheme of forces in the section of the main secant plane is shown in Fig. 2.3.1.

Here F , N are the frictional force and the force of normal motion on the front surface of the tool;

F_1 , N_1 - frictional force and normal pressure force on the rear surface of the tool;

P_τ , P_σ - tangential and normal forces in the shear plane

To isolate the forces acting on the chamfer of wear on the back surface, it is necessary to analyze the steel machining process and determine all the forces acting on the tool. In case the cutting takes place on a milling machine, the forces acting on the chamfer can be calculated by the following formula:

$$F = K_c * K_d * K_f * K_s * K_r * K_t * K_p * A_p$$

Where:

K_c - shape factor of the cutter;

K_d - depth of cut coefficient;

K_f - cutting force coefficient;

K_s - coefficient of friction forces;

K_r - cutting factor;

K_t - temperature coefficient;

K_p - performance factor;

A_p is the area of the cutter.

After determining the force acting on the wear chamfer on the rear surface, it is possible to plot the contact stresses on the wear chamfer (Fig. 2.3.2).

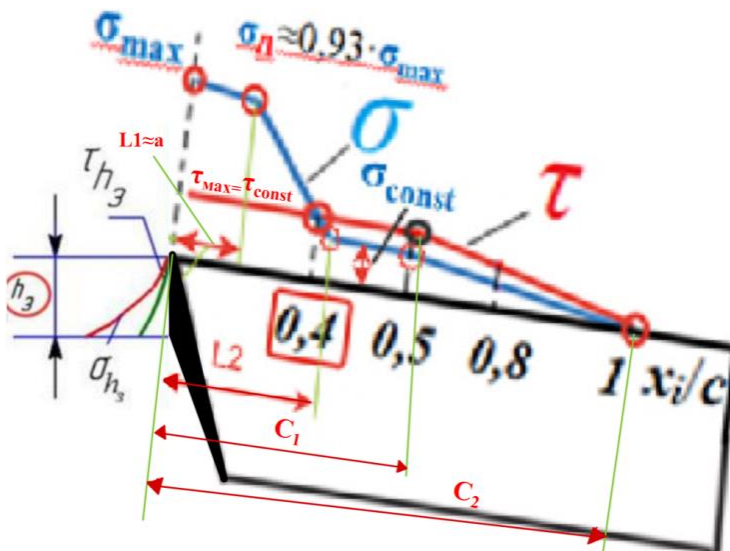


Fig. 2.3.2 Distribution of contact stresses on the cutter surfaces

along the back surface. [1]

For example, for a cutting tool with a straight chamfer, you can use the following formula to find the maximum contact stresses:

$$\sigma_{\max} = K_c * K_d * K_f * K_s * K_r * K_t * K_p * (F / A_p) * (\tan \alpha / \cos \beta)$$

Where:

α - angle of approach;

β - care angle.

This requires knowing the geometric parameters of the tool, such as the chamfer radius, approach angle, and departure angle. After that, you can use formulas for finding contact stresses and plot the dependence of contact stresses on the distance from the chamfer tip to its base

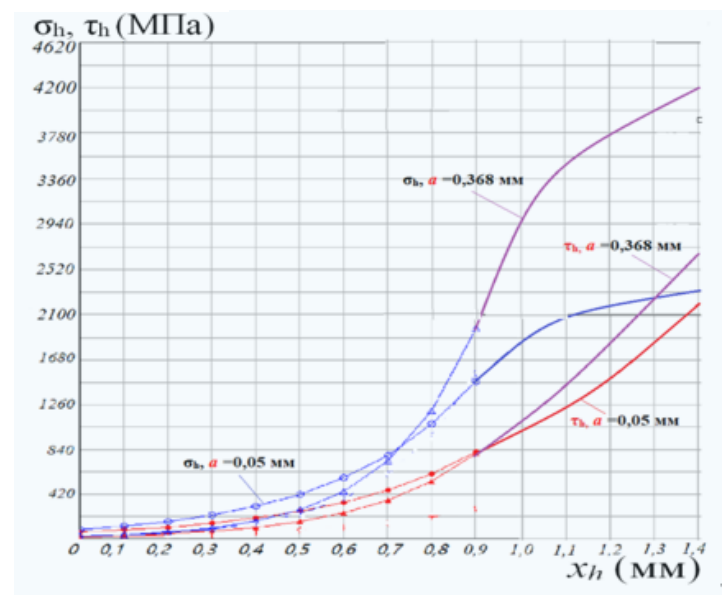


Fig. 2.3.3 Distribution of normal σ_h and tangential τ_h (MPa) contact stresses on the artificial wear chamfer on the rear surface of the cutter during steady cutting.

Drawing of the contact stresses epiphures on the wear chamfer on the rear surface during steel machining (Fig. 2.3.3) is an important stage of the cutting process analysis, which allows to determine the optimal cutting parameters and exclude the possibility of tool damage.

To calculate the strength of cutting tools it is necessary to know the distribution of contact stresses on the front surface and on the chamfer of the back surface. [2] The most reliable method for investigating the contact phenomena is the split (compound)

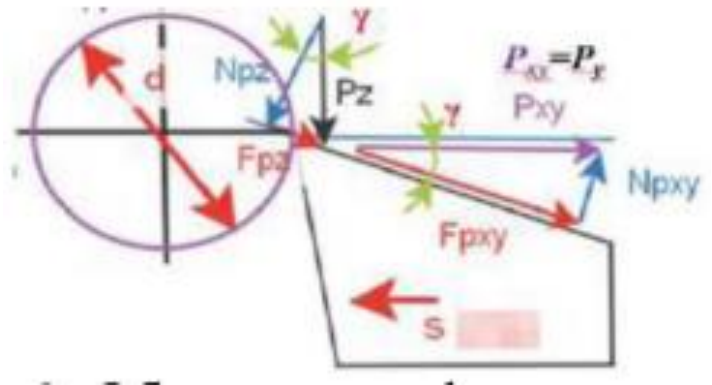


Fig. 2.3.5 Turning the disc periphery width **b** with radial feed rate **s** (mm/rev).

cutter method (Fig. 2.3.4). It is the easiest to perform experiments when turning the disk periphery of width **b** with radial feed **s** (mm/rev) (Fig. 2.3.5) by a dynamometer with a cut cutter (Fig. 2.3.6).

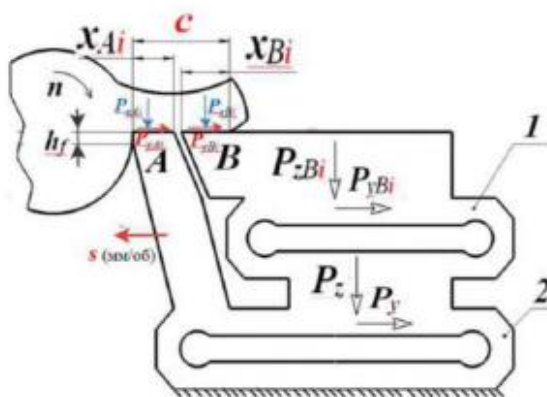


Fig. 2.3.4 Position of the plates A and B of the cutter fixed on the elastic measuring elements 1 and 2 of the special lathe dynamometer of V.A.

Krasnikov design. A. Krasilnikov

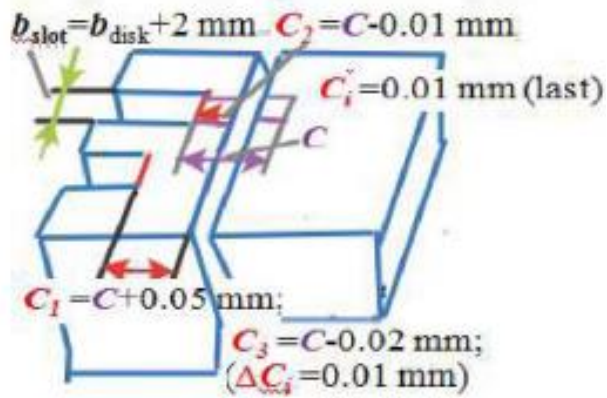


Fig. 2.3.6 Cutting tool sections.

Histograms of specific contact loads on the front surface of the cutter were obtained experimentally and the contact stresses were plotted (Fig. 2.3.7).

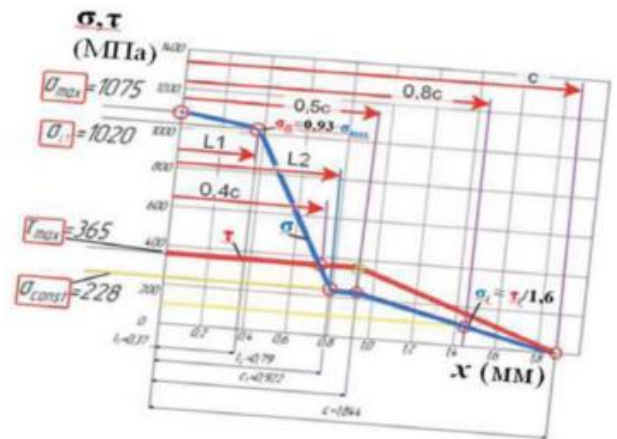


Fig. 2.3.7 Normal σ and tangential τ contact stresses (MPa) on the cutter front surface.

Results of the study of the SSC of a simple cutting wedge and IPP

The results of the stress-strain condition (SSC) of a simple cutting wedge (Fig. 2.4.1) and interchangeable polyhedral plates (IPP) (Fig. 2.4.2) when machining steel with sharp and worn tools showed that when using worn tools, an increase in cutting force may occur, which may lead to deterioration of the machined product surface quality. In addition, a comparison of the results (Figure 2.4.3) under the same load revealed that using a worn tool may require an increase in chamfer thickness to improve machining quality.

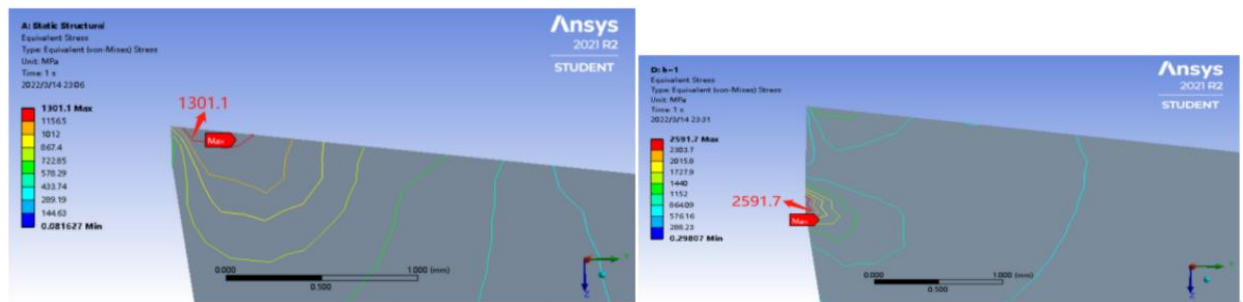


Fig. 2.4.1 Distribution of equivalent stresses $\sigma_{e \max}$ in the cutting wedge ($\gamma = + 7^\circ$) at uncut chip thickness $a=0,368$ mm at different lengths of wear chamfer h_z : $a - h_z=0,2$ mm; $b - h_z=1$ mm

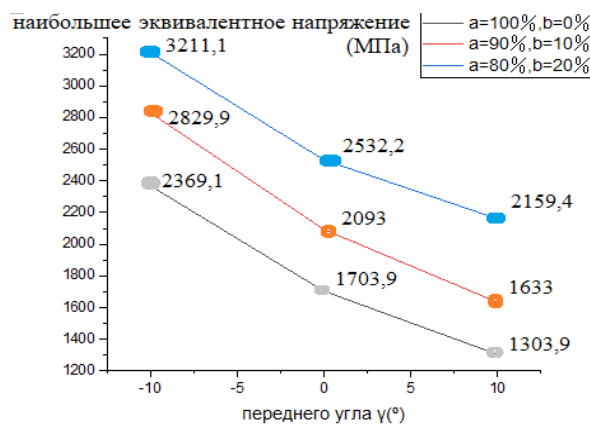


Fig. 2.4.3. Influence of the main (a) and auxiliary (b) cutting edge load share (%) and the front angle γ (°) on the value of the highest equivalent stress $\sigma_{эКВ \max}$ (MPa) in 3-sided SMF

However, the use of SMFs can increase the accuracy and efficiency of the machining process while reducing tool loads. The use of SMF also provides increased

flexibility in the machining process, allowing optimal machining quality to be achieved and extending the life of the cutting tool.

When an external load is applied, the number of sections with a certain chamfer length can have an effect on the machining process. The greater the number of sections, the more evenly the load is distributed on the tool, which can improve the surface quality

of the product. However, increasing the number of sections can also reduce the efficiency of the machining process, as the potential for tool damage can increase.

Thus, when machining steel, it is useful to use SMP to improve accuracy and process efficiency, optimize the number of sections with a certain chamfer length, and control the tool load to achieve the best machining results and increase the life of the cutting tool.

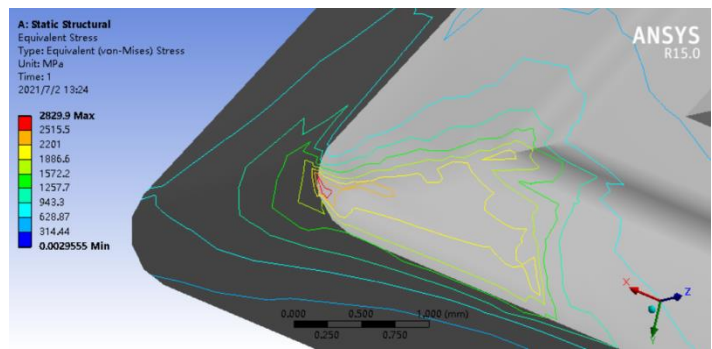


Fig. 2.4.2 Distribution of equivalent stresses $\sigma_{\text{эKB}}$ in a 3-sided SMF at a load on the main cutting edge of 90%, on the auxiliary cutting edge of 10%. Steel 40Kh - T15K6. $\gamma = -10^\circ$. $s = 0,368$ mm/turn, $c = 2,02$ mm, cutting width $b = 2$ mm. $F = 1196$ N, $N = 2020$ N. $\sigma_{\text{Eqvmax}} = 2830$

Effect of additive technology on a sample of 40X13 steel

Effects of additive technology on the physical and mechanical properties of 40X13 steel samples:

- Material hardness. Additive technology can increase the hardness of a material by creating a milled crystal structure. In doing so, the material can become more heterogeneous, which can affect its toughness and strength.

- Material strength. Additive technology can increase material strength through local compaction of material in critical areas and other changes in material microstructure.

- Wear resistance. Additive technology can increase material wear resistance by increasing stiffness and increasing fracture resistance.

Effects of additive technology on tool life in end milling:

- Machining Surface Accuracy. Additive technology can improve machining surface accuracy, resulting in less tool wear during use.

- Reduced tooling costs. Additive technology can reduce the cost of toolmaking, which reduces similar costs in the production of the final products.

Thus, additive technology can have a positive effect on the physical and mechanical properties of 40X13 steel samples and tool life during end milling. However, when designing and manufacturing tools, it is necessary to take into account the material properties and peculiarities of the manufacturing process to achieve maximum results.

Conclusion

1. Under the same cutting conditions, the contact stresses on the artificial wear chamfer along the rear surface of the cutter during plunging are greater than during steady cutting, but the nature of the diagrams is the same.

2. Increasing the number of teeth in contact (by increasing the number of cutter teeth or increasing the depth or width of milling) causes the change in the direction of the shear force to disappear, which reduces vibration during machining.

3. In both down and up milling, due to changes in the contact angle ψ and, accordingly, the cut thickness, the longitudinal force P_h reaches its maximum value earlier than P_v .

References

1. Kozhevnikov D.V., Grechishnikov V.L., Kirsanov S.V., Kokarev V.I., Schirtladze A.G. Cutting Tools: University Textbook/Edited by S.V. Kirsanov. Supplementary information, 2-s pro. add. M.: Machinery Manufacturing, 2005. -528 p: illus.

2. Influence of loading kind on internal stresses calculation in cutting wedge/Kozlov V. N., Zhang Jiayu//Bulletin of the Tula State University. Technical science. — 2017 . - No. 8, part 2. - [P. 88-94].