



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

Отделение машиностроения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование аддитивно-субтрактивной обработки при фрезеровании образцов из стали 40X13

УДК 621.914.1-047.37:669.146

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4AM11	Чжан Цинжун		

Руководитель ВКР

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

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гасанов М. А.	д.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Антоневич О. А.	к.б.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Автоматизация технологических процессов и производств в машиностроении, доцент ОМШ	Сорокова С. Н.	к.ф.-м.н.		

Томск – 2023 г.

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

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	Чжан Цинжун

Тема работы:

Исследование аддитивно-субтрактивной обработки при фрезеровании образцов из стали 40X13	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№32–55/с от 01.02.2023

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 с разными режимами, и концевые фрезы из твёрдого сплава BK8 и 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 с разными режимами. 3. Разработка методики выполнения исследований. 4. Проведение экспериментов по измерению составляющих силы фрезерования при разных режимах фрезерования концевыми фрезами из P6M5 и BK8 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
Исследовательский	Козлов В.Н.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Гасанов М. А.
Социальная ответственность	Антоневич О.А.
Обязательное приложение на английском языке	Гутарева Н. Ю.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Изменения силы резания при врезании. Анализ процесса попутного и встречного фрезерования	Changes in cutting force during plunging. Climb and up milling analysis

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 ОМШ ИШНПТ ТПУ	Козлов В.Н.	к.т.н., доцент		12.09.2022

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4AM11	Чжан Цинжун		12.09.2022

РЕФЕРАТ

выпускной квалификационной работы студента гр. 4АМ11 Чжан Цинжун

«Исследование аддитивно-субтрактивной обработки

при фрезеровании образцов из стали 40Х13»

Выпускная квалификационная работа выполнена на 168 страницах, содержит: 78 рисунков, 29 таблицы, 22 источников, 1 приложение.

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

Объектами исследования являются процесс фрезерования и концевая фреза 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 изменения составляющих силы резания во времени при попутном и встречном фрезеровании острыми и изношенными концевыми фрезами и результаты экспериментального исследования влияния режимов фрезерования и характеристик фрезы на силы фрезерования. Рассмотрено влияние подачи на НДС режущей кромки.

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

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 резания при обработке 3D-печатных материалов на примере жаропрочной стали 40Х13 для повышения экономической эффективности обработки заготовок, выполненных по аддитивной технологии.

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 Zhang Qingrong
«Investigation of additive-subtractive processing during milling
of samples from steel 40X13»

The Final Qualifying Work (Diploma Thesis) is executed on 168 pages of the explanatory note, contains: 78 figures, 29 tables, 22 sources, 1 appendix.

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

The objects of the study are the milling process and the end mill made of cemented carbide.

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

In the course of the research, a review and analysis of scientific and technical literature on the topic of the master's thesis was carried out, the goals and objectives of the research were formulated. The paper presents the results of an experimental study of changes in the components of the cutting force over time during conventional (down-milling) and up-milling with sharp and worn end mills and the results of an experimental study of the influence of milling modes and milling characteristics on milling forces. The influence of the feed rate on the SSC of the cutting edge is considered.

During the experiments, a CNC milling machine, a three-component Kistler turning dynamometer, as well as the ANSYS program for calculating the SSC of cutting edge were used.

In the work, the necessary economic parameters were determined, such as machining performance, machining costs, and tool costs.

The results of the work will make it possible to use the rational diameter of the milling cutter and cutting modes when processing 3D-printed materials on the example of heat-resistant steel 40X13 to increase the economic efficiency of processing blanks made using additive technology.

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-subtractive processing of parts in machine-building production.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	12
1. Цель и задачи исследования	14
2. Литературный обзор	16
2.1 Образцы, полученные с использованием аддитивной технологии из стали 40X13	16
2.2 Определение конструкций и геометрических параметров концевых фрез	20
2.3 Определение конструкции и геометрических параметров СМП	23
2.4 Оценка прочности простого режущего клина при резании	26
3. Методика выполнения работы	41
3.1 Закрепление образца на фрезерном станке	41
3.2 Измерение сил при фрезеровании	42
4. Исследовательская часть	45
4.1 Исследование фрезерования острой концевой фрезой	45
4.1.1 Изменения силы резания при врезании	45
4.1.2 Анализ процесса попутного и встречного фрезерования	49
4.1.3 Влияние режимов резания на составляющие силы при фрезеровании	57
4.1.4 Влияние геометрических параметров фрезы на составляющие силы при фрезеровании	67
4.2 Исследование изменения сил фрезерования при износе фрезы	76
4.3 Исследование НДС фрезы при фрезеровании	82

4.3.1 Исследование влияния подачи на НДС острой фрезы	82
Заключение	100
Список литературы	105
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	111
Введение	111
5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурс эффективности и ресурсосбережения ...	111
5.1.1 Анализ конкурентных технических решений	111
5.1.2 SWOT-анализ	113
5.2 Планирование научно-исследовательских работ	116
5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	116
5.2.2 Разработка графика проведения научного исследования	117
5.3 Бюджет научно-технического исследования	122
5.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования	122
5.3.2 Расчет амортизации специального оборудования	124
5.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы	125
5.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	126
5.3.5 Накладные расходы	127
5.3.6. Бюджетная стоимость НИР	127
5.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	128
Выводы по разделу	131
6. Социальная ответственность	135

Введение	135
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ..	135
6.2 Производственная безопасность	140
6.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов	141
6.2.2 Расчет уровня производственного фактора	146
6.3 Экологическая безопасность	150
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	152
6.4.1 Наиболее типичной ЧС в 1-ом этаже корпуса 16А, ТПУТПУ 16а	153
6.4.2 Рассматриваем две ситуации ЧС	153
6.4.3 Разработка превентивных мер по предупреждению ЧС	154
Выводы по разделу	155
Приложение – Раздел на иностранном языке	157

Введение

Аддитивная технология металлов является одним из самых актуальных направлений исследований в настоящее время, не только потому, что с использованием аддитивной технологией можно изготавливать детали сложной формы с существенным уменьшением трудоёмкости механической обработки и отходов в стружку, но и потому, что 3D-печатные материалы обладают высокой прочностью и хорошими механическими свойствами. Но увеличение твёрдости и прочности полученных заготовок приводит к ухудшению обрабатываемости 3D-печатных материалов, а наличие пор вызывает вибрацию при последующей обработке, особенно при малой жёсткости системы СПИД.

Наиболее часто для субтрактивной обработки используются концевые фрезы, имеющие малую жёсткость в радиальном направлении, поэтому необходимо исследовать обрабатываемость 3D-печатных материалов концевыми фрезами диаметром от 8 до 16 мм.

В представленном исследовании проанализированы процессы встречного и попутного фрезерования 3D-печатных материалов из стали 40X13, исследовано влияние режимов фрезерования (подачи, глубины и ширины фрезерования, частоты вращения фрезы) и характеристик фрезы (диаметра фрезы и инструментального материала, количества зубьев) на силы фрезерования, рассчитано напряженно-деформированное состояние (НДС) методом конечных элементов (МКЭ) режущего клина фрезы при фрезеровании стали 40X13 после проволоочной аддитивной технологии, даны

рекомендации по выбору фрезы и режима фрезерования при обработке 3D-печатных материалов.

В основном исследуется процесс фрезерования, а не точения, поскольку фрезерованием можно обработать детали более сложной формы и увеличить производительность аддитивно-субтрактивной обработки.

1. Цель и задачи исследования

● Цель работы

Исследовать аддитивно-субтрактивную обработку при фрезеровании образцов из стали 40X13.

● Задачи исследования

1. Экспериментально выполнить исследования изменения сил при попутном и встречном фрезеровании 3D-печатных материалов 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 3D-печатных материалов 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, созданных по аддитивной технологии.

● Научная новизна выполненных исследований

1. Выявлен характер изменения составляющих сил в процессе встречного и попутного фрезерования 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 на напряженно-деформированное состояние режущей кромки зуба фрезы при фрезеровании 3D печатных материалов на примере жаропрочной стали 40X13.

2. Литературный обзор

2.1 Образцы, полученные с использованием аддитивной технологии из стали 40X13

● Физико-механические свойства образцов

Сталь 40X13 состоит из 0,35-0,44% углерода (C), 12-14% хрома (Cr), до 0,6% кремния (Si), до 0,6% марганца (Mn), до 0,6% никеля (Ni), имеются вредные примеси серы (S) и фосфора (P) до 0,025-0,03 %, основной элемент – железо (Fe) около 84%. Сталь 40X13 относится к группе жаропрочных легированных сталей с высокой коррозионной стойкостью (нержавеющая сталь), обладает хорошей стойкостью к окислению при высоких температурах и высокой прочностью на растяжение, а также имеет хорошую ударную вязкость. Обладает высокой прочностью на растяжение $\sigma_B = 1840$ МПа даже при температурах до 350°C.

Импортные аналоги российской стали 40X13 имеют обозначение 420 (США), 1.4031 (Германия), 4C13 (Китай), SUS420J2 (Япония), X40Cr14 (Франция), 420S45 (Великобритания). Исходным материалом для получения образцов методом электронно-лучевого сплавления (ЭЛС) для последующего их фрезерования являлась стальная проволока марки 420SS диаметром 1,2 мм.

При разных режимах были получены три образца для изучения влияния аддитивной технологии на структуру, пористость, точность, шероховатость наружной поверхности и её отклонение от плоскостности (неровность), а также силы резания при фрезеровании как основного метода последующей

обработки (аддитивно-субтрактивная технология – АСТ) (см. Таблицу 2.1.1).

Таблица 2.1.1– Параметры осаждения при ЭЛС

Обозначение образцов	Ток (мА)	Напряжение (Кв)	Скорость сканирования (мм/мин)	Подача проволоки (мм/мин)
А	33	40	350	700
Б	30	40	350	700
В	21	40	350	1050

Как показано на рис.2.1.1, при использовании технологии лазерного спекания порошкового материала предел прочности при растяжении стали 40Х13 (мартенситная сталь) может достигать

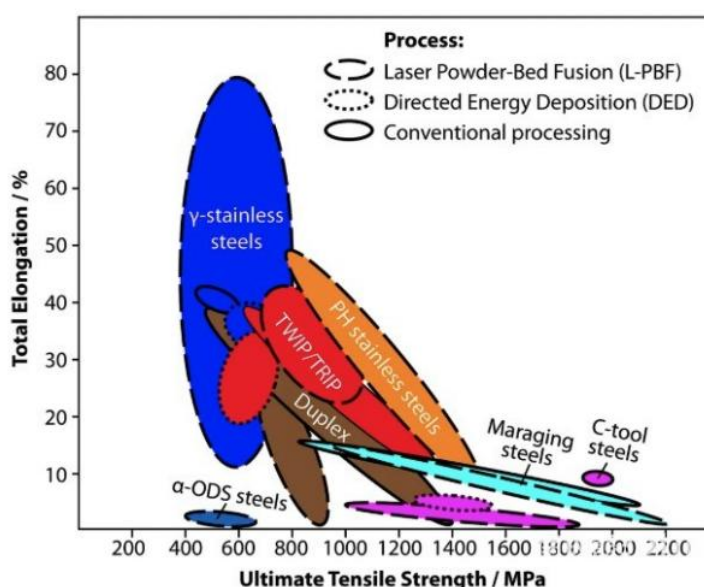


Рисунок.2.1.1– Механические свойства материалов, соответствующие различным производственным методам

2200 МПа при том же полном удлинении. При определенных условиях стальная деталь, изготовленная с помощью 3D-принтера, в три раза прочнее той же стальной детали, изготовленной традиционными методами.

Однако из-за быстрого падения температуры на поверхности детали будет образовываться корка с высокой твердостью, при этом возникнут большие внутренние напряжения, а внутри детали образуется множество пор, что приводит к увеличению интенсивности износа, выкрашиванию режущей

кромки, увеличению силы резания, появлению вибрации и т.п., т.е. увеличивается трудность обработки. Более высокая твердость также делает детали более хрупкими.

● Принцип работы металлического принтера

Моделирование методом
наплавления

(FusedDepositionModeling, FDM) –
объект формируется путём
послойной укладки расплавленной
нити из плавкого рабочего
материала (пластик, металл, воск).

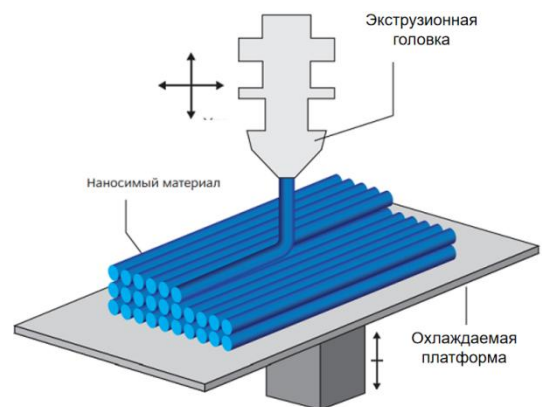


Рисунок.2.1.2– Принцип работы FDM
принтеров

Рабочий материал подаётся в экструзионную головку, которая выдавливает на охлаждаемую платформу тонкую нить расплавленного материала, формируя таким образом текущий слой разрабатываемого объекта.

Далее платформа опускается на толщину одного слоя, чтобы можно было нанести следующий слой.

Часто в данной технологии
участвуют две рабочие головки –
одна выдавливает на платформу
рабочий материал, другая –
материал поддержки, если
создаваемый объект имеет



Рисунок. 2.1.3– Принцип работы SLS
принтеров

нависающие элементы или ажурную конструкцию.

Селективное лазерное спекание (СЛС, SLS, также DirectMetalLaserSintering, DMLS) использует другую технологию. Порошок тонко распределяется на платформе внутри формовочной камеры. Принтер предварительно нагревает порошок до температуры чуть ниже точки плавления исходного материала, что облегчает лазеру повышение температуры в определенных областях порошкового слоя по мере того, как он отслеживает модель для расплавления порошка и последующего его затвердевания. Лазер сканирует поперечное сечение 3D-модели и нагревает порошок почти до точки плавления материала, образуя твердую деталь. Нерасплавленный порошок поддерживает деталь во время печати, устраняя необходимость в специальных поддерживающих конструкциях. Затем платформа опускается в камеру сборки слой за слоем, обычно высотой от 50 до 200 микрон, и процесс повторяется с каждым слоем, пока деталь не будет готова.

Помимо вышеперечисленных аддитивных технологий, аддитивное производство с использованием проволоочной дуги (WAAM), электронно-лучевое плавление (ЭЛП, или EBM – ElectronBeamMelting), селективное лазерное спекание (СЛС, или SLM) могут также использоваться для 3D-печати металлов.

2.2 Определение конструкций и геометрических параметров концевых фрез

● Параметры фрезерования

При исследовании на фрезерном станке устанавливаются частота вращения фрезы n (об/мин) и минутная подача заготовки s_m (мм/мин), которые рассчитываются по подаче на зуб s_z (мм/зуб) и скорости резания v (м/мин): $n = 1000 \cdot v / \pi \cdot d_{\text{фр}}$; $s_m = s_z \cdot z \cdot n$, где z - количество зубьев фрезы, $d_{\text{фр}}$ - диаметр фрезы. Глубина фрезерования (резания) t (мм), ширина фрезерования B (мм), подача на зуб s_z и скорость резания v определяются требуемой шероховатостью поверхностей детали, точностью обработки, трудностью обработки и т.д.

По направлению подачи заготовки s_m (стола фрезерного станка) и направлению вращения фрезы n (или скорости резания v) схемы фрезерования разделяются на встречное и попутное. При встречном фрезеровании направление вектора скорости резания противоположно

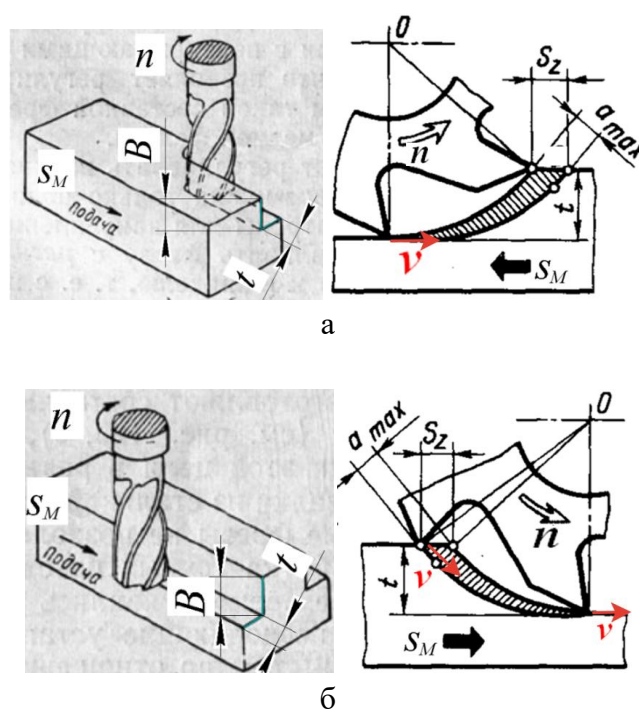


Рисунок 2.2.1 – Схема направления подачи s_m (мм/мин) заготовки, скорости вращения фрезы n (об/мин) и скорости резания v (м/мин) при встречном фрезеровании (а) и при попутном фрезеровании (б)

направлению подачи стола с заготовкой s_m (рис. 2.2.1 а); а при попутном фрезеровании направление вектора скорости резания совпадает с направлением подачи s_m (рис. 2.2.1 б).

Попутное фрезерование больше подходит для фрезерования внутреннего материала (материала внутри заготовки, т.е. после удаления поверхностного упрочнённого слоя образца или заготовки) металлических печатных деталей. Благодаря врезанию с максимальной толщиной среза нет подмятия слоя металла под режущую кромку; однако силы фрезерования резко увеличиваются при врезании, т.к. происходит удар зуба фрезы о поверхность заготовки, что повышает риск поломки режущей кромки. Поскольку направления подачи и вращения совпадают, то при врезании возникают удары боковых поверхностей резьбы ходового винта и гайки стола из-за наличия даже небольшого зазора между ними, необходимого для уменьшения трения по боковым поверхностям.

Встречное фрезерование больше подходит для фрезерования ещё не обработанной поверхности металлических печатных деталей. Благодаря врезанию с нулевой толщиной среза силы увеличиваются постепенно, предотвращается столкновение режущей кромки с покрытой окислами и подкалённым поверхностным слоем, но это также приводит к подмятию слоя металла под режущую кромку в момент врезания, особенно при наличии радиуса округления режущей кромки или фаски износа по задней поверхности, что ускоряет износ режущей кромки и снижает качество обработанной поверхностью. При этом фрезеровании нет удара боковых

поверхностей резьбы винта подачи и гайки стола благодаря одинаковому направлению подачи и вращения, т.к. люфт (зазор) между ними «выбирается» наличием тангенциальной составляющей P_z силы резания.

● Геометрия концевых фрез

Концевая фреза состоит из режущей части, шейки и хвостовика (рис. 2.2.2). По диаметру фрезы можно выбирать хвостовик с конической формой с конусом Морзе (метрическая конусность 1:20) или с цилиндрической

формой. Режущая кромка подразделяется на две части: главную на цилиндрической части и вспомогательную на торцевой части. Стружечные канавки между зубьями обеспечивают вывод стружки и используются для заточки инструмента. С помощью угла наклона винтовой канавки ω ($\omega = 30...45^\circ$) силы не изменяются резко при врезании и при выходе зуба.

По конструкции зубья фрезы делятся на остроконечные и затылованные (рис. 2.2.3). По форме затылованные зубья делятся на



Рисунок 2.2.2 – Конструкция концевой фрезы

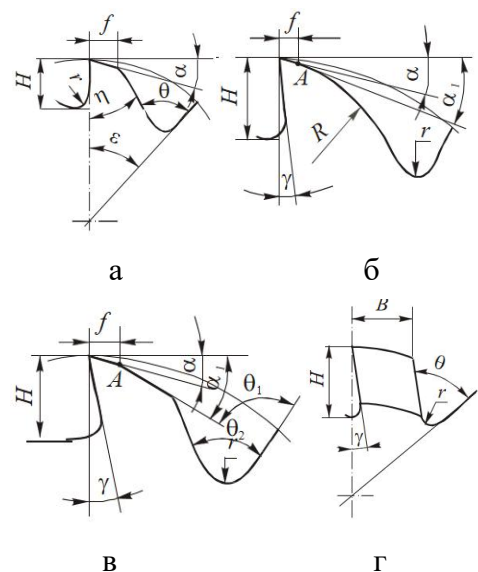


Рисунок 2.2.3 – Формы зубьев фрез: а – трапециевидная; б – параболическая; в – усиленная; г – затылованный зуб

трапецевидные, параболические и усиленные. Остроконечные зубья перетачиваются по задней поверхности; а затылованные зубья перетачиваются по передней поверхности. Прочностью обрабатываемого материала (металлические печатные образцы из стали 40Х13) определяется форма зуба.

Параболические и усиленные зубья прочнее трапецевидных, но трапецевидные зубья проще всего изготовить, а поскольку глубина стружечной канавки ***H*** трапецевидных зубьев мала (рис. 2.2.3), фреза может иметь больше зубьев и использоваться для чистовой обработки. Параболические зубья труднее всего изготовить, но они самые прочные. Параболические и усиленные зубья имеют больший запас на переточку, чем трапецевидные зубья.

Затылованные зубья обычно используются для фасонных дисковых фрез, предназначенных для обработки фасонных поверхностей.

На рис.2.2.3 символом γ обозначен передний угол на главной режущей кромке, α – задний угол на главной режущей кромке.

2.3 Определение конструкции и геометрических параметров СМП

В связи с более высокой прочностью, надежностью и долговечностью инструментов, оснащенных сменными многогранными пластинами (СМП) (рис. 2.3.1), они широко применяется

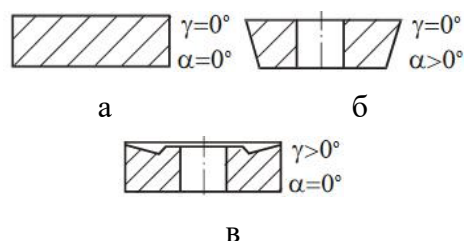


Рисунок 2.3.1– Геометрические параметры твердосплавных СМП. а – негативных; б – позитивных; в – негативно-позитивных

для обработки деталей. Кроме того, применение СМП сокращает время смены инструмента, что особенно важно при эксплуатации станков с ЧПУ и автоматических производственных линий. Покрытие на СМП также увеличивает стойкость фрезы, но увеличивает радиус округления режущей кромки, что увеличивает подмятие металла под режущую кромку и может привести даже к уменьшению стойкости.

● Геометрия СМП и ориентация его на корпусе фрезы

По геометрическим параметрам СМП

делятся на негативные ($\gamma=0^\circ$, $\alpha=0^\circ$), позитивные ($\gamma=0^\circ$, $\alpha > 0^\circ$) и негативно-позитивные ($\gamma>0^\circ$, $\alpha=0^\circ$) (см. рис. 2.3.1). При установке у негативных пластин $|\gamma|=|\alpha|$; у негативно-позитивных $|\gamma|>|\alpha|$; а у позитивных передний угол γ будет равен углу поворота пластины, а задний угол α больше этого угла.

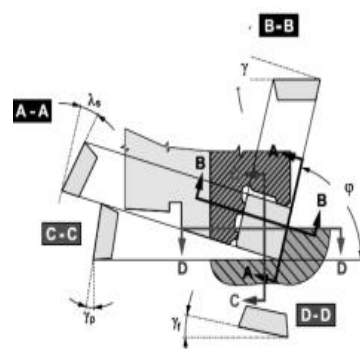
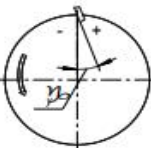
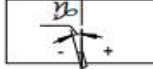
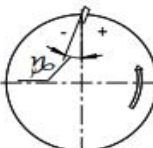
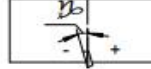
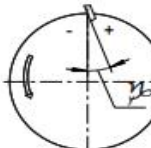


Рисунок 2.3.2–
Геометрические параметры
концевой фрезы с
однорядными СМП

Таблица 2.3.1 – Геометрические схемы концевой фрезы с однорядными пластинами

Позитивная геометрия ($\gamma_x > 0, \gamma_y > 0$)	Негативная геометрия ($\gamma_x < 0, \gamma_y < 0$)	Позитивно-негативная геометрия ($\gamma_x > 0, \gamma_y < 0$)	Негативно - позитивная геометрия ($\gamma_x < 0, \gamma_y > 0$)
 	 	 	 

Угол наклона главной режущей кромки λ (или ω у концевых фрез), передний угол γ , задний угол α , главный угол в плане ϕ (от 10 до 90° в зависимости от назначения фрезы) являются функциональными углами. А для определения ориентации СМП на корпусе фрезы введены конструктивные углы: осевой передний угол γ_p и радиальный передний угол γ_f . По γ_f и γ_p положение пластины на корпусе фрезы можно разделить на четыре вида (см. табл. 2.3.1).

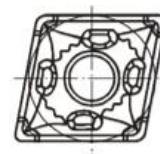


Рисунок 2.3.3 – СМП с лунками, канавками и уступом на передней (лицевой) поверхности

При фрезеровании стали обычно образуется сливная стружка в виде непрерывной ленты, которая может наматываться на заготовку и инструмент, портить обработанную поверхность и представлять опасность для рабочего. Чтобы этого не произошло, на пластине прессуются лунки, канавки и уступы переменной глубины, высоты и ширины для дробления стружка (см. рис. 2.3.3).

● Установка СМП на корпусе фрезы

Схема концевой фрезы с однорядными пластинами представлена на рис. 2.3.4. СМП закрепляется прихватом 3 в глухом гнезде корпуса 1, прихват 3 фиксируется крепежным винтом 5 и штифтом 4. Оси винта 5 и штифта 4 расположены под углом для обеспечения поджима пластины к опорным поверхностям корпуса фрезы.

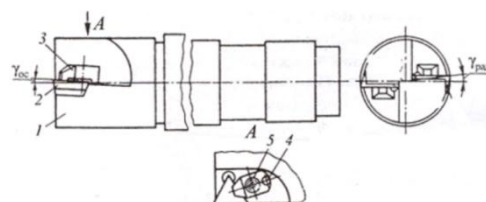


Рисунок 2.3.4— Концевая фреза с однорядными пластинами

На рис. 2.3.5. показана торцово-цилиндрическая фреза с многорядными пластинами. В корпусе фрезы 1 выполнены продольные пазы под определенным углом по образующей цилиндра. Режущая пластина 2 опирается на опорную втулку 4 и клин 3 и крепится обоймой 5 и винтом 6.

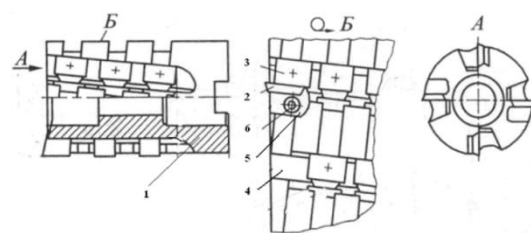


Рисунок 2.3.5–

Торцово-цилиндрическая фреза с многорядными пластинами: 1 – корпус; 2 – режущие пластины; 3 – клинья; 4 – опорные вкладыши; 5 – державка; 6 – винты

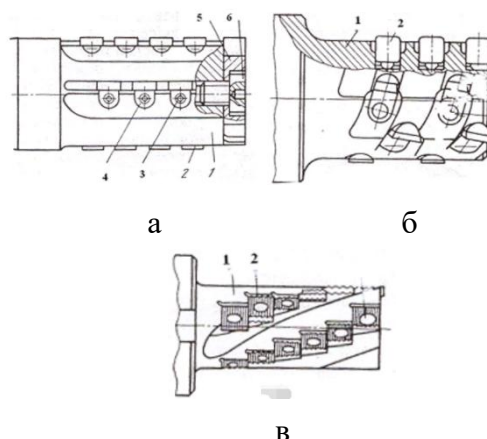


Рисунок 2.3.6– Схемы концевых фрез с перекрытием по образующей цилиндра (а), по винтовой линии (б) и с тангенциальным расположением режущих пластин (в): 1 – корпус; 2 – режущие пластины; 3 – винт; 4 – клин; 5 – диск; 6 – стопорный винт

Для обработки высоких уступов разработана другая схема установки, показанная на рис 2.3.6 а, б. Пластины в разных пазах расположены в перекрывающемся порядке. Нет пластины на торце фрезы. Кроме

того, режущие пластины могут быть расположены тангенциально (рис. 2.3.6 в).

2.4 Оценка прочности простого режущего клина при резании

Перед определением прочности зубьев фрезы необходимо прежде всего узнать прочность режущей кромки и режущего клина при резании.

Обычно их прочность оценивается по напряженно-деформированному состоянию (НДС), определяющемуся распределением эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа), нормальных σ_z , σ_y , σ_x и касательных напряжений, τ_{xoy} , τ_{xoz} , τ_{yoz} , а также общей деформации в режущем клине СМП или резца $\varepsilon_{\text{общ}}$.

● Силы, действующие на режущую кромку

Как показано на рис. 2.4.1, при несвободном резании тангенциальная технологическая составляющая сила P_z действует вдоль направления вектора скорости резания v , P_x действует вдоль направления продольной подачи, а P_y – перпендикулярно направлению продольной подачи. Векторы сил P_x и P_y действуют в основной плоскости (они и определяют её положение), при токарной обработке она горизонтальна.

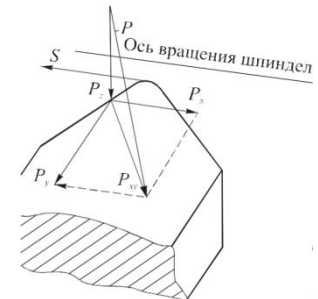


Рисунок 2.4.1–
Направление
технологических
составляющих P_z , P_y и P_x

Для упрощения эксперимента по исследованию распределения контактных напряжений на поверхностях резца выполняется свободное прямоугольное свободное резание диска из обрабатываемого материала, при этом сила вдоль режущей кромки P_x практически равна нулю ($P_x = 0$), поэтому результирующая сил в основной плоскости $P_{xy} = P_y$ (рис. 2.4.2), главный угол в плане $\varphi = 90^\circ$, а длина контакта

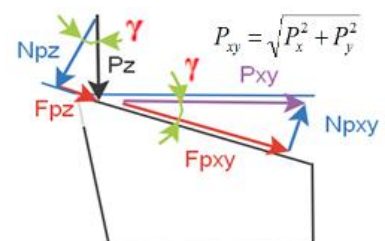


Рисунок 2.4.2– Схема
действия составляющих
силы резания в главной
секущей плоскости при $\gamma > 0^\circ$

режущей кромки с заготовкой равна ширине диска, т.к. длина главной режущей кромки должна быть немного больше ширины диска $b_{\text{диска}}$.

Для расчета напряжения, действующего на режущий клин, технологические составляющие преобразуются в физические составляющие по следующей формуле:

$$N = N_{Pz} - N_{P_{xy}} = P_z \times \cos \gamma - P_{xy} \times \sin \gamma;$$

$$F = F_{P_{xy}} + F_{Pz} = P_{xy} \times \cos \gamma + P_z \times \sin \gamma.$$

где N – это нормальная составляющая, действующая перпендикулярно к передней поверхности; F – это касательная составляющая, действующая касательно к передней поверхности, γ – положительный передний угол.

● Исследование распределения контактных напряжений на передней поверхности резца

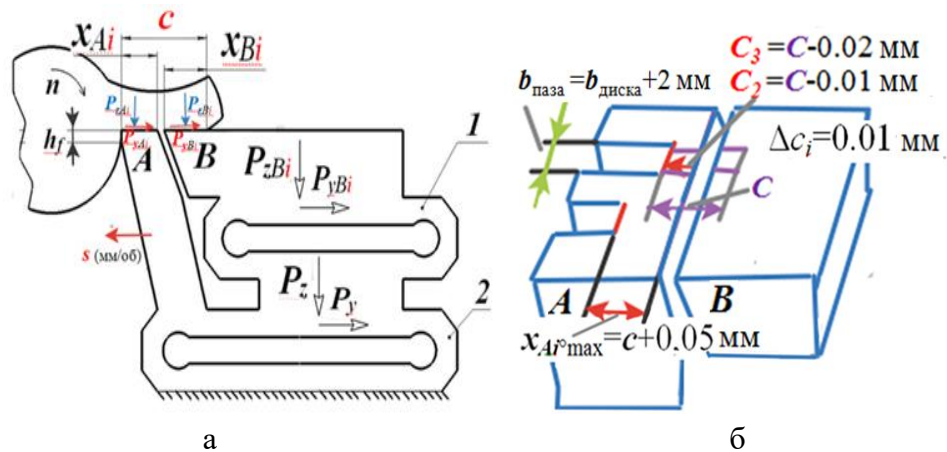


Рисунок 2.4.3 – Исследование распределения контактных напряжений на передней поверхности резца методом разрезного резца: а – положение 4-х компонентного динамометра на токарном станке; б – секции разрезного резца.

Изучение распределения контактных напряжений на передней поверхности резца может быть выполнено методом разрезного резца [5, 6, 7],

методом лазерной интерференции [8] и поляризационно-оптическим методом [5, 9]. Первый метод является самым надёжным и позволяет выполнять исследования при обработке стали, сплавов и других конструкционных материалов при производственных режимах резания. Как правило, при исследовании выполняется прямоугольное свободное резание периферии диска шириной $b_{\text{диска}} = b$ (мм) с радиальной подачей резца $s_{\text{рад}}$ (мм/об), поэтому сила P_x отсутствует и измеряются только тангенциальная P_z и радиальная P_y составляющие силы резания (Н) (рис. 2.4.3).

Разрезной резец имеет от 10 до 15 секций, у каждой из которых задаётся (изготавливается) разное расстояние x_{Ai} от режущей кромки до поверхности раздела двух пластин A и B (рис.2.4.3), но сумма расстояний x_{Ai} и x_{Bi} равна длине контакта стружки с передней поверхностью резца c (мм): $c = x_{Ai} + x_{Bi}$. Уменьшение расстояния x_{Ai} и, соответственно, увеличение расстояния x_{Bi} , приводит к тому, что на передней поверхности пластины B происходит увеличение технологических сил P_{zBi} и P_{yBi} .

Отношение приращения этих технологических сил (ΔP) к приращению площади контакта стружки с поверхностью пластины B на длине x_{Bi} ($\Delta S = b \cdot \Delta x_{Bi}$) есть удельная тангенциальная $q_{Pzi} = \Delta P_{zi} / (b \cdot \Delta x_{Bi})$ и удельная радиальная

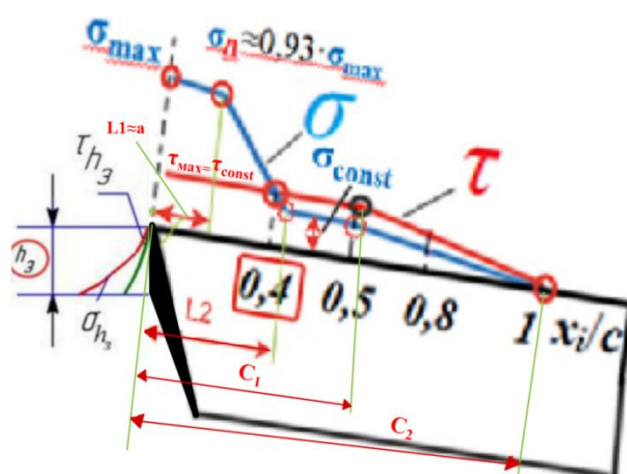


Рисунок 2.4.4— Распределение контактных напряжений на поверхностях резца

$q_{Pyi} = \Delta P_{yi} / (b \cdot \Delta x_{Bi})$ технологические нагрузки (удельные силы) на рассматриваемом i -м участке (Н/мм² или МПа).

С учётом величины переднего угла γ выполняется расчёт нормальной q_{Ni} и касательной q_{Fi} удельных контактных нагрузок на рассматриваемом i -м участке по вышеуказанным уравнениям. При $\Delta x_{Bi} \rightarrow 0$ (и, соответственно, $\Delta x_{Ai} \rightarrow 0$) удельные контактные нагрузки на рассматриваемом i -м участке можно принять за нормальные $\sigma_i \approx q_{Ni}$ и касательные $\tau_i \approx q_{Fi}$ контактные напряжения (МПа).

● Построение эпюр контактных напряжений на передней поверхности при обработке стали

На рис. 2.4.4 показано распределение контактных напряжений (эпюры) на передней поверхности и на искусственной фаске износа по задней поверхности резца.

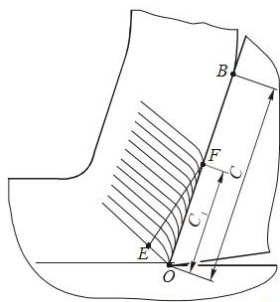


Рисунок 2.4.5 – Искривление текстуры стружки из-за торможения её приконтактного слоя в зоне вторичных пластических деформаций ОЕФ (строгание)

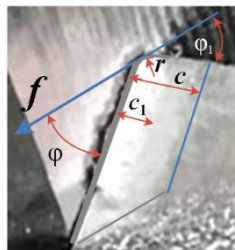


Рисунок 2.4.6 – Главный угол в плане ϕ , радиус при вершине r , общая длина контакта стружки c с передней поверхностью, длина пластического контакта стружки c_1 .

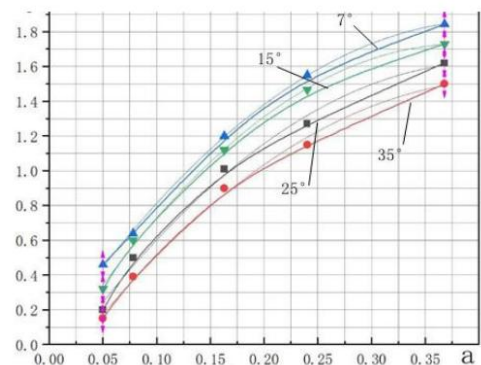


Рисунок 2.4.7 – Влияние толщины среза a (мм) и переднего угла γ (°) на длину контакта стружки c (мм) с передней поверхностью резца при обработке стали 40Х

Область взаимодействия стружки с передней поверхностью можно разделить на две участки: 1) OF – участок пластического контакта длиной c_1 ; 2) FB – участок внешнего трения длиной $c_{\text{вн}}$ ($c_{\text{вн}} = c - c_1$). Длину контакта стружки с можно измерить после резания по участку со следами трения (рис.2.4.6), либо определить из графиков рис. 2.4.7, полученных экспериментально [8].

На участке OF происходит относительное смещение слоя металла внутри стружки (пластическая деформация), т. е. «внутреннее» трение. Это происходит из-за того, что зачищенная, освобожденная от окислов передняя поверхность, контактирующая со стружкой, задерживает смещение прилегающего к ней слоя стружки. Это взаимодействие определяется максимальным касательным напряжением, действующим на передней поверхности τ_{max} . Поскольку величина внутреннего трения определяется не коэффициентом внешнего трения f ($f=F/N$), а пределом прочности на сдвиг $\tau_{\text{пред}}$ при температуре контакта, то величина касательного контактного напряжения τ на участке OF не изменяется: $\tau_{\text{max}} = \tau_{\text{пред}} = \tau_{\text{const}}$.

Когда расстояние от режущей кромкой больше c_1 (длины пластического контакта стружки с передней поверхностью), т.е. на участке FB, то начинается участок «смешанного» трения. В этом случае имеется перемещение стружки как целого объекта вдоль передней поверхности, но имеются небольшие участки, где приконтактная поверхность стружки временно «приваривается», или схватывается с передней поверхностью инструмента и очень короткое время тормозит перемещение стружки в этом

месте.

Затем происходит срыв этой поверхности контакта стружки, при этом, в отличие от участка пластического контакта, материал стружки не остаётся на поверхности инструмента. Это существенно отличается от условий на первом участке (участке пластического контакта, когда $x = 0-c_1$). Это объясняется меньшей температурой на этом участке, поэтому слои стружки не могут смещаться относительно друг друга как на первом участке даже при наличии адгезии, гораздо меньшим давлением со стороны стружки (т.к. она уже прошла через «пластический шарнир» зоны стружкообразования и не подкреплена ещё неудалённым слоем металла заготовки), наличием окислов на передней поверхности инструмента. Поэтому стружка здесь не может прочно закрепиться.

Наличие участков схватывания увеличивает условный коэффициент трения ($\mu_i = \tau_i / \sigma_i$) от 0,4 в начале зоны смешанного трения до $\mu = 1,5 \dots 2,2$ в конце контакта стружки.

Необходимо отметить, что рассчитывать условный коэффициент трения μ в конце контакта стружки с передней поверхностью очень сложно, что может привести к большим погрешностям, т.к. и нормальные, и касательные контактные напряжения здесь очень малы. Около режущей кромки нормальное контактное напряжение максимально, т.е. $\sigma = \sigma_{\max}$. С отдалением от режущей кромки нормальное контактное напряжение уменьшается до σ_{const} на небольшой длине (короткий участок, где график σ параллелен передней поверхности).

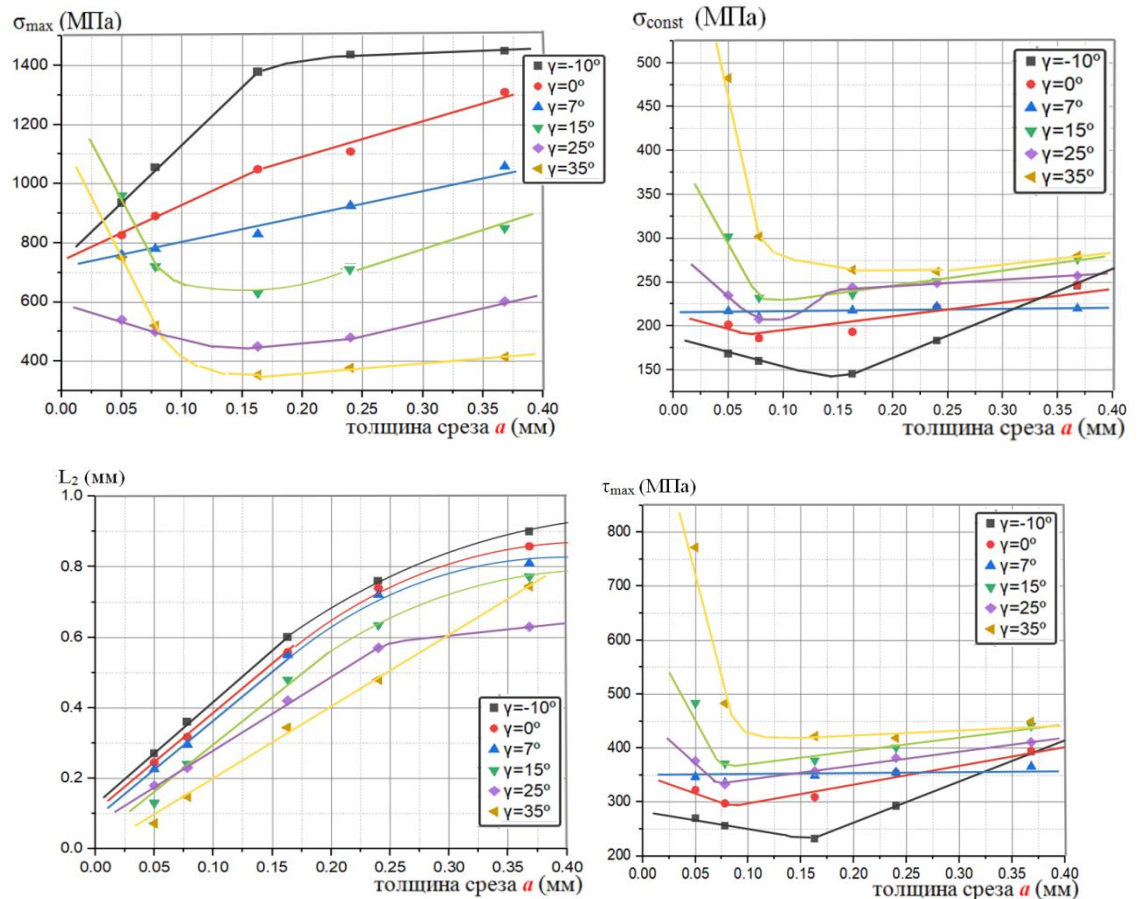


Рисунок 2.4.8– Влияние толщины среза a и переднего угла γ на основные параметры эпюр нормальных σ и касательных τ контактных напряжений

По графикам основных параметров эпюр контактных напряжений, представленным на рис. 2.4.8, строят эпюры нормальных σ и касательных τ контактных напряжений, действующих на передней поверхности. Затем немного корректируют эпюру нормальных контактных напряжений σ , чтобы $N_{\text{эл}} = b \times \int_0^c \sigma(x_i) \approx N_{\text{эсп}}$, где b - ширина среза, x_i – расстояние от режущей кромки. Коррекция выполняется за счёт небольшого изменения величины наибольшего нормального контактного напряжения $\sigma_{\max}$.

Эпюру касательных контактных напряжений обычно исправлять не надо, т.к. при обработке стали $c_1 = 0,5 \cdot c$, поэтому легко определить величину

касательного контактного напряжения на участке пластического контакта ($x = 0 \dots c_1$) $\tau_{\text{const}} = F_{\text{эсп}} / (0,75 \cdot c \cdot b)$, поэтому равенство

$$F_{\text{эл}} = b \times \int_0^c \tau(x_i) \approx F_{\text{эсп}} \text{ будет всегда выполняться.}$$

● **Исследование распределения контактных напряжений на фаске износа по задней поверхности**

Из рис. 2.4.4 и 2.4.9 видно, что чем дальше от режущей кромки, тем больше будет величина нормальных σ_h и касательных τ_h

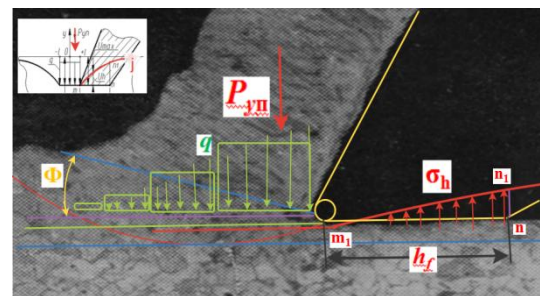


Рисунок 2.4.9 – Прогиб поверхности резания m_1n_1 при сливном стружкообразовании

контактных напряжений на фаске износа по задней поверхности. Это происходит из-за давления поверхности резания m_1n_1 на фаску износа резца m_1n длиной h_z (или h_f в англоязычной литературе). Этот прогиб поверхности резания вызван радиальной силой P_{yp} , действующей со стороны передней поверхности на участок $2l$. (см. рис. 2.4.9). Прогнутая поверхность m_1n_1 является упругой восстанавливающейся поверхностью резания (среза).

Чем дальше от режущей кромки, тем больше будет упругое восстановление поверхности mn_1j и тем больше будет нормальное контактное напряжение, действующее в рассматриваемой точке i на фаску. Так как при резании стали образуется сливная стружка, то при резании этот прогиб существует стабильно.

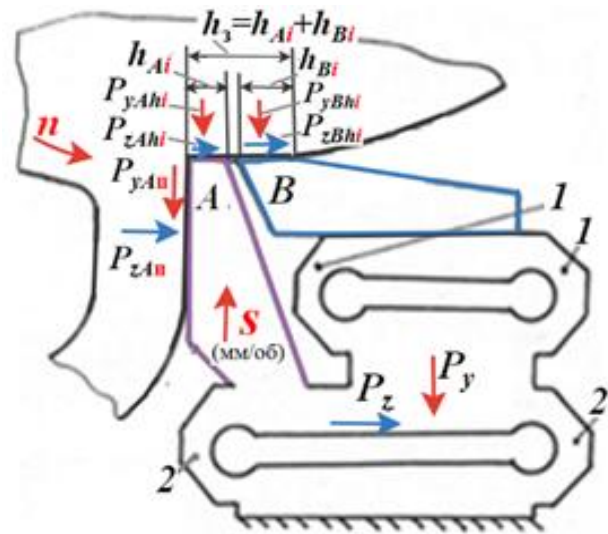


Рисунок 2.4.10– Исследование распределения контактных напряжений на фаске задней поверхности методом разрезного резца при установке динамометра на столе горизонтально-фрезерного станка и его вертикальной радиальной подаче $s_{\min} = s_{\text{об}} \cdot n$ вверх.

Многочисленные исследования показали, что на задней поверхности неизношенного режущего инструмента составляющие силы резания невелики, а на фаске износа по задней поверхности они значительно больше. Изучение распределения контактных напряжений на фаске износа **по задней поверхности** выполняется тоже методом разрезного резца, но специальный четырёхкомпонентный динамометр конструкции В.А. Красильникова устанавливается на стол горизонтально-фрезерного станка [5]. Режущая кромка разрезного резца совмещается с вертикальной плоскостью симметрии диска из обрабатываемого материала, закреплённого на горизонтальной вал-оправке станка. Оправка с одной стороны затягивается в коническое отверстие шпинделя станка (конусностью 7:24) штревелем (длинной

шпилькой), а другой она устанавливается в подшипник серги на хоботе станка.

Подача осуществляется вертикальной подачей вверх стола фрезерного станка (рис.2.4.10). При такой схеме измерения искусственная фаска износа горизонтальна, а передняя поверхность или вертикальна при переднем угле $\gamma = 0^\circ$, или немного отклонена от вертикального положения при $\gamma \neq 0^\circ$. Такая схема резания предотвращает появление уступа между пластинами *A* и *B*, как в случае резания диска разрезным резцом с фаской на задней поверхности при традиционной установке динамометра на токарном станке и горизонтальной радиальной подаче [5].

Искусственная фаска износа затачивается с задним углом на ней $\alpha_f = \alpha_h = 0^\circ$, что характерно при естественном износе по задней поверхности. В отличие от естественного износа задний угол на фаске $\alpha_h = 0^\circ$ строго выдерживается на всех секциях разрезного резца, что позволяет обеспечить одинаковые условия при резании на всех секциях.

Изготовление разрезного резца очень трудоёмко, к тому же при выкрашивании кромок пластин *A* и *B* приходится заново изготавливать пластины. Высока и сложность настройки зазора между измерительными пластинами, чтобы при этом фаска на них находилась в одной плоскости. Поэтому для исследования распределения контактных напряжений на фаске по задней поверхности был предложен метод переменной длины фаски h_z , при котором используется только пластина *A*, на которой изначально затачивается фаска с наибольшей длиной $h_z = h_{\max}$ с задним углом на ней

$\alpha_h=0^\circ$, а затем пластина A перетачивается только по задней поверхности с постоянным задним углом $\alpha=12^\circ$ (рис. 2.4.11 а). Это обеспечивает неизменность величины заднего угла на фаске $\alpha_h=0^\circ$, даже небольшое изменение которого привело бы к существенному изменению сил на этой фаске.

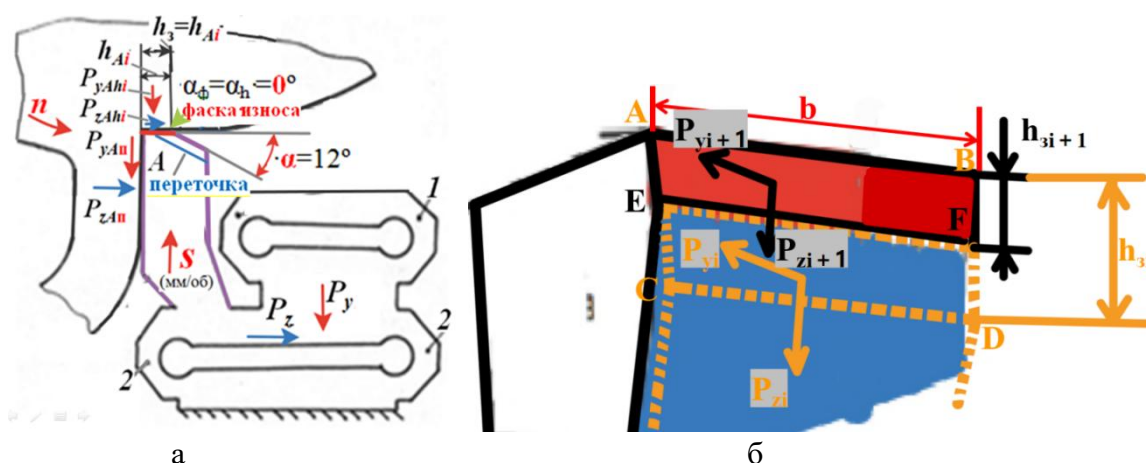


Рисунок 2.4.11– Исследование распределения контактных напряжений на фаске задней поверхности методом переменной длины искусственной фаски износа при $\alpha_h = 0^\circ$

Сравнение результатов, полученных методом разрезного резца и методом переменной фаски, показало расхождение не более 15%. Правомерность использования предложенного метода исходит из положения, что силы на фаске задней поверхности не влияют на силы на передней поверхности [1, 2, 3]. Конечно, большая длина фаски приведёт к увеличению температуры резания, а значит, и к изменению сил на передней поверхности, но исследования показали, что это влияет не так существенно [1, 2, 3], особенно если изменение фаски небольшое (не более 0,15 мм между

переточками по задней поверхности).

Предложенный метод может быть использован и при несвободном косоугольном резании с установкой обычного токарного резца в токарный трёхкомпонентный динамометр (рис. 2.4.11 б). Ширина среза рассчитывается по формуле $b = t/\sin\varphi$, где t – глубина резания (мм), φ – главный угол в плане (°).

● Построение эпюр контактных напряжений на фаске износа по задней поверхности при обработке стали

Эпюры нормальных σ_h и касательных τ_h контактных напряжений, действующих на фаске задней поверхности могут быть определены методом переменной длины искусственной фаски износа h_z .

После переточке по задней поверхности в i -й раз получается длина фаски h_{zi} ,

т.е. площадью ABDC (см. рис. 2.4.11 б). В это время динамометром измеряется тангенциальная сила P_{zi} и радиальная сила P_{yi} . После следующей переточке в $(i+1)$ -й раз получается длина фаски h_{zi+1} , т.е. с её площадью ABFE.

В это время динамометром измеряются тангенциальная сила P_{zi+1} и

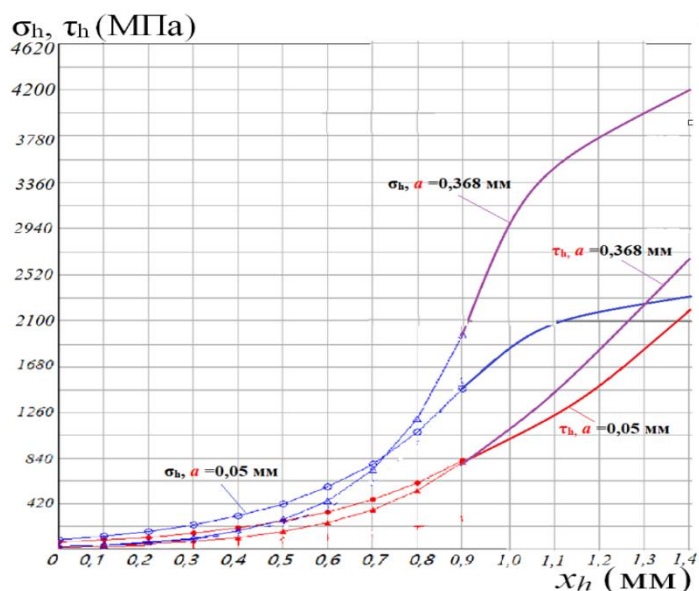


Рисунок 2.4.12 – Распределение нормальных σ_h и касательных τ_h (МПа) контактных напряжений на искусственной фаске износа по задней поверхности резца при установившемся резании.

радиальная сила P_{yi+1} . Вычитанием сил при предыдущей длине фаски (индекс i) и при рассматриваемой длине (индекс $i+1$) получается соответствующие составляющие силы на рассматриваемом удалённом участке фаски задней поверхности EFDC.

Удельная нормальная нагрузка (давление), действующая на площадь EFDC:

$$q_{Nhi+1} = \frac{P_{yi} - P_{yi+1}}{(h_{zi} - h_{zi+1}) \times b}; \text{ (Н/мм}^2\text{) или (МПа)}$$

Удельная тангенциальная нагрузка, действующая на площадь EFDC:

$$q_{Phi+1} = \frac{P_{zi} - P_{zi+1}}{(h_{zi} - h_{zi+1}) \times b}. \text{ (Н/мм}^2\text{) или (МПа)}.$$

Когда изменение длины фаски $\Delta h_{i+1} = h_{zi} - h_{zi+1}$ очень мало, получаемые результаты являются нормальным σ_{hi+1} и касательным τ_{hi+1} контактными напряжениями, действующими на участке EFDC фаски задней поверхности.

Вышеуказанные шаги повторяются, а затем строятся эпюры контактных напряжений (см. рис. 2.4.12).

● **Расчёт напряжённо-деформированного состояния (НДС) режущего клина**

Расчеты напряженно-деформированного состояния выполнены в главной секущей плоскости методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программы ANSYS после приложения контактных напряжений на передней поверхности и на фаске искусственного износа по задней поверхности. Некоторые результаты расчетов представлены на

рис. 2.4.13.

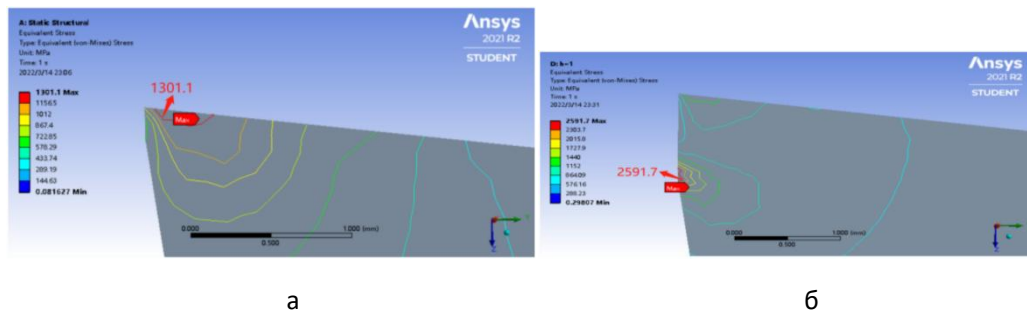


Рис. 2.4.13– Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв max}}$ в режущем клине ($\gamma = +7^\circ$) при толщине среза $a=0,368$ мм при различной длине фаски износа h_3 :
 $a - h_3 = 0,2$ мм; б – $h_3 = 1$ мм.

Когда фаска небольшая ($h_3 = 0,2$ мм), максимальное эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв.max}} = 1301,1$ МПа располагается около режущей кромки на передней поверхности, а на задней поверхности режущего клина эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв}} = 722$ МПа. Однако с увеличением длины фаски износа эквивалентное напряжение быстро увеличивается, и при длине фаски $h_3 = 1$ мм максимальное эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв. max}} = 2597,1$ МПа располагается на фаске около места пересечения фаски и задней поверхности, что может вызвать выкрашивание инструментального материала (в частности твёрдого сплава Т15К6) в этом месте.

3. Методика выполнения работы

3.1 Закрепление образца на фрезерном станке

Для исследования обрабатываемости образцов, изготовленных методом порошковой или проволоочной аддитивной технологии на металлическом принтере, необходимо применять субтрактивную обработку, или, в частности, фрезерование. Форма образца представляет собой прямоугольный параллелепипед размером $60 \times 20 \times 20$ мм. Опыты проводились на консольном вертикально-фрезерном станке с ЧПУ, на котором образец, зажатые в тисках, устанавливается на токарном трёхкомпонентном динамометре Kistler (рис. 3.1.1).



Рисунок 3.1.1 – Установка заготовки на динамометре Kistler 9257B (а) и используемый измерительный комплекс для измерения технологических составляющих F_z , F_y и F_x силы резания (б)

Измерения составляющих силы резания проводились с помощью токарного трёхкомпонентного динамометра Kistler (рис. 3.1.1 а), жесткость и точность которого высоки. Для предотвращения искажения измеряемой силы высота тисков должна быть небольшой, так как при концевом фрезеровании при большой высоте тисков возникает дополнительный момент относительно

опорной поверхности динамометра, что может не только исказить результаты измерений сил фрезерования, но и может привести к появлению вибрации. В некоторых случаях образец, приваренный к опорной пластине в процессе его получения методом аддитивной технологии, закреплялся прямо с пластиной к динамометру четырьмя болтами (см. рис.3.1.1.). Отверстия сверлились в опорной пластине под резьбовые отверстия М8-7Н на поверхности динамометра.

Если образцы были предварительно вырезаны из опорной пластины, то для уменьшения влияния высоты тисов было разработано приспособление, показанное на рис. 3.1.2. Образец зажимается

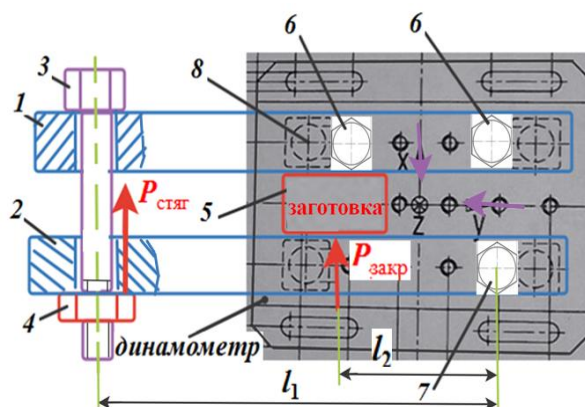


Рисунок 3.1.2– Схема закрепления небольшого образца на динамометре Kistler для фрезерования концевой фрезой

между неподвижной планкой 1, закрепленной двумя болтами 6 к динамометру, и планкой 2, закрепленной одним болтом 7 к динамометру. Закрепление образца выполняется затягиванием болта 3 и гайкой 4. После закрепления образца эксцентрик (не указан на схеме) прижимается к планке 2 для предотвращения вибрации при фрезеровании.

3.2 Измерение сил при фрезеровании

Как показано на рис. 3.1.1, когда направление подачи соответствует максимальной длине образца, сила вдоль оси фрезы P_x обозначается на мониторе динамометра Kistler как сила при токарной обработке F_z , сила

вдоль направления подачи $s_{\min} P_h$ обозначается на мониторе как F_x ; сила, перпендикулярная направлению подачи $s_{\min}$, P_v обозначается на мониторе как F_y .

При
фрезеровании
невозможно
измерить
тангенциальную
составляющую
силу P_z ,
действующую
вдоль направления
вектора скорости

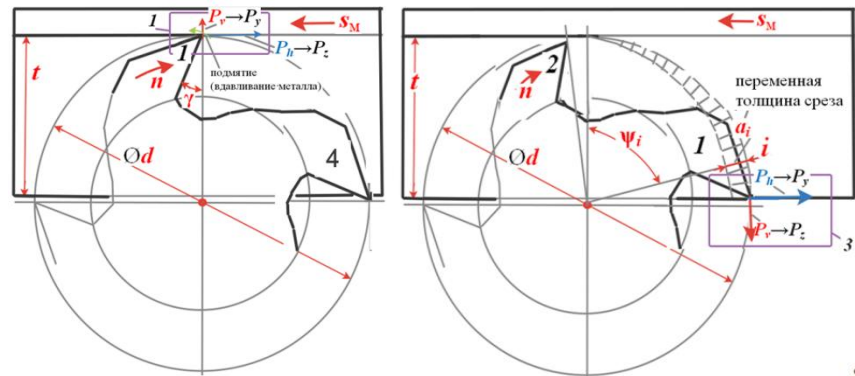


Рисунок 3.2.1 – Схема направления составляющих силы резания при несимметричном встречном концевом фрезеровании четырёхзубой фрезой при глубине фрезерования $t = d/2 - 0,2$ мм: а – при врезании зуба № 1; б – при выходе зуба № 1 из контакта с заготовкой. Наибольшая толщина среза при выходе зуба из контакта $a_{\max} \approx 2 \times s_z \times \sqrt{t/D}$

резания v , и радиальную составляющую силу P_y , направленную к оси вращения фрезы, т.к. при вращении фрезы непрерывно изменяется не только толщина среза $a_i = s_z \cdot \sin \psi$ (мм) (рис. 3.2.1 б), но и направление этих составляющих. Поэтому нами было использовано допущение, что при одинаковой толщине среза при фрезеровании и при токарной обработке будут примерно одинаковое распределение контактных напряжений.

Когда глубина фрезерования t примерно равна радиусу фрезы, то при врезании зуба в заготовку при встречном фрезеровании, т.е. угол контакта $\psi = 0^\circ$, сила, перпендикулярная направлению подачи $s_{\min}$, P_v будет приблизительно равна силе P_y , действующей в радиальном направлении.

Сила вдоль направления подачи $s_{\min}$, P_h будет приблизительно равна силе P_z , действующей тангенциально, т.е. по направлению вектора скорости резания v , если рассматривать действие этой силы от зуба фрезы на заготовку (табл. 3.2.1).

При выходе зуба из контакта с заготовкой при встречном фрезеровании, т.е. когда угол контакта $\psi = 90^\circ$, сила, перпендикулярная направлению подачи $s_{\min}$, P_v будет приблизительно равна силе P_z , действующей от зуба фрезы на заготовку, а сила против направления подачи $s_{\min}P_h$ будет приблизительно равна радиальной силе P_y , действующей от зуба фрезы на заготовку (табл. 3.2.1).

Таблица 3.2.1 – Соответствие между силами при встречном фрезеровании

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

4. Исследовательская часть

4.1 Исследование фрезерования острой концевой фрезой

4.1.1 Изменения силы резания при врезании

Процесс фрезерования является процессом, при котором зубья фрезы постоянно врезаются в заготовку и выводятся из контакта с ней. Поскольку врезание зуба фрезы похоже на врезание резца в коническую поверхность, оставшуюся от предыдущего резания (рис. 4.1.1), то можно проанализировать изменение сил резания при врезании режущей кромки резца сразу по всей её длине, чтобы понять закономерности изменения сил при врезании режущей кромки её зуба.

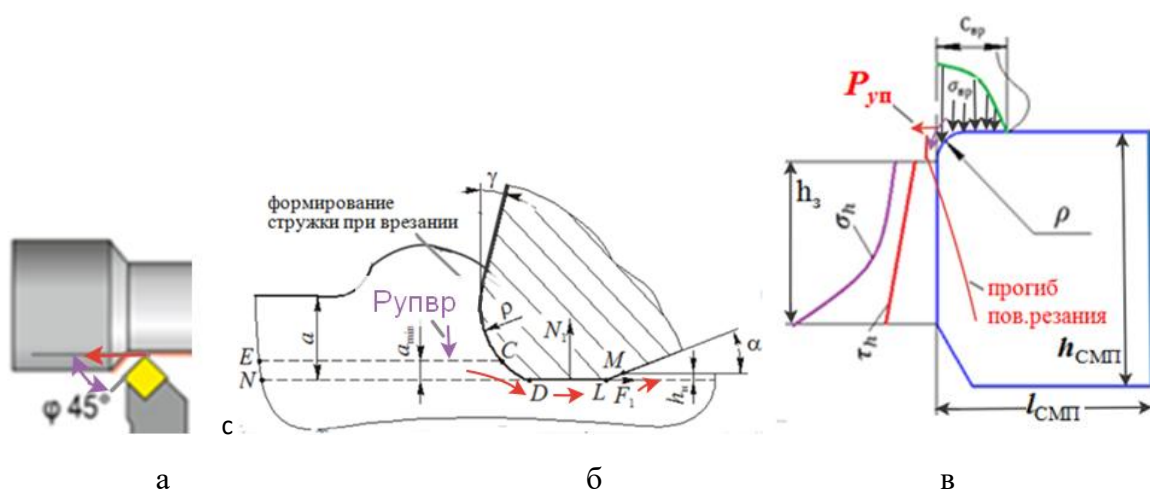


Рисунок 4.1.1 – Врезание режущей кромки резца сразу по всей её длине при косоугольном резании (а), подмятие обрабатываемого материала под режущую кромку при врезании (указано в главной секущей плоскости) (б) и упрощенная модель режущего клина в главной секущей плоскости при его нагрузке контактными напряжениями при **врезании** (в).

При врезании резца в коническую поверхность, оставшуюся от предыдущей обработки (рис. 4.1.1 а) происходит вдавливание

обрабатываемого материала под режущую кромку из-за наличия округления режущей кромки радиусом $\rho = 0,001 \dots 0,005$ мм даже у нового неизношенного резца (рис. 4.1.1 б). Величина этого радиуса зависит от величины зёрен твёрдого сплава, переднего и заднего угла. Попытки заточить, а затем притереть переднюю и заднюю поверхность для уменьшения величины радиуса ρ приводят к скалыванию режущей кромки при первом же касании заготовки.

Величина удельных нормальных контактных нагрузок на передней поверхности q_{Nr} (МПа) (рис. 4.1.1 в) рядом с режущей кромкой при врезании больше, чем при установившемся резании. Т.к. в это время стружка еще не полностью сформировалась и не движется вдоль передней поверхности, то удельные касательные контактные нагрузки на передней поверхности и её радиусном участке можно принять приблизительно равными нулю, т.е. $q_{Fr} = 0$ МПа и потому на схеме не показаны, а удельные нормальные контактные нагрузки на этом участке режущей кромки у передней поверхности можно рассчитать по формуле: $q_{Nr} = N_{вр} / (c_{вр} \cdot b)$, где $N_{вр}$ – нагрузки, действующие на переднюю поверхность при врезании, $c_{вр}$ – длина контакта формирующейся стружки с радиусным участком и передней поверхности у режущей кромки, b – ширина режущей кромки в контакте со стружкой.

Из наших экспериментов было выявлено, что при имеющемся радиусе округления режущей кромки $\rho = 0,003$ мм длина контакта $c_{вр}$, соответствующая максимальной силе при врезании, может быть рассчитана по уравнению $c_{вр} \approx \rho + 0,1 \cdot a$, где a – толщина среза (мм).

При врезании изношенным по задней поверхности резцом в контакт с заготовкой вступает фаска на задней поверхности и происходит вдавливание её как штампа. Сила трения на фаске в это время сначала определяется коэффициентом внешнего трения $f_{h\text{ вр}} = F_{h\text{ вр}}/N_{h\text{ вр}}$, но после нагрева места контакта, начала адгезии и пластической деформации прилегающих к фаске слоёв обрабатываемого материала начинается «внутреннее» трение.

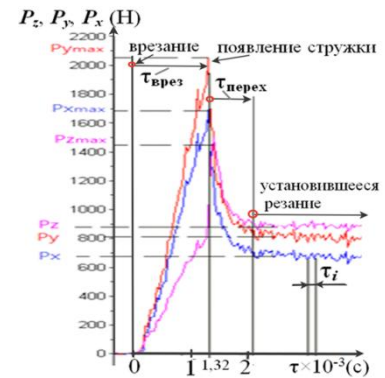


Рисунок 4.1.2 – Изменение составляющих силы резания (Н) при врезании. Сталь 40X – T15K6. $s = 0,07$ мм/об, $v = 120$ м/мин, $t = 1,8$ мм

Эти процессы приводят к бóльшему увеличению составляющих P_x и P_y как силы давления $N_{h\text{ вр}} = P_{x\text{ увр}} = (P_{x\text{ вр}}^2 + P_{y\text{ вр}}^2)^{1/2}$ фаски износа на поверхность резания по сравнению с составляющей P_z , которая при врезании представляет собой силу трения на фаске $F_{h\text{ вр}}$ (рис. 4.1.2).

Т.к. часть обрабатываемого материала упирается в радиусный участок передней поверхности, то возникает радиальная сила $P_{ху\text{ п вр}}$ на этом участке, которая приводит к прогибу

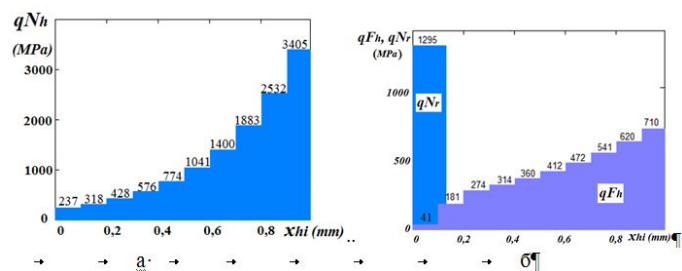


Рисунок 4.1.3 – Распределение (гистограммы) нормальных q_{Nh} (а) и касательных q_{Fh} (б) контактных нагрузок (МПа) на фаске задней поверхности и величина удельных нормальных контактных нагрузок на передней поверхности q_{Nr} (б) (МПа) рядом с режущей кромкой при врезании. Сталь 40X – T15K6. $s = 0,07$ мм/об, $v = 120$ м/мин, $t = 1,8$ мм. Абсцисса – расстояние от режущей кромки вдоль фаски износа по задней поверхности x_{hi} (мм).

поверхности резания (поверхности среза) (см. рис. 4.1.1 в).

После достижения предельного объёма вдавливания обрабатываемого материала под режущую кромку (определяемого модулем упругости материала заготовки E и возможностью перемещения материала под фаской износа) появляется стружка на передней поверхности. Обрабатываемый материал уже в гораздо меньшей степени вдавливается под режущую кромку и в основном перемещается по передней поверхности в виде стружки. Уменьшение вдавливания материала под режущую кромку приводит к интенсивному уменьшению силы давления от поверхности резания на фаску износа по задней поверхности $N_{h\text{ вр}}$ (т.е. к уменьшению сил $P_{x\text{ вр}}$ и $P_{y\text{ вр}}$), а также силы трения на фаске $F_{h\text{ вр}} = P_{z\text{ вр}}$ (см. рис. 4.1.2).

Прогиб поверхности резания при врезании приводит к тому, что на фаске износа по задней поверхности у режущей кромки её упругое восстановления меньше, чем при отдалении от неё, поэтому характер эпюр $\sigma_{h\text{ вр}}$ и $\tau_{h\text{ вр}}$ одинаковы, т.к. чем дальше от режущей кромки, тем больше будет величина восстановления прогнутой поверхности резания, поэтому больше будут и контактные напряжения (см. рис. 4.1.3).

При врезании (см. рис. 4.1.3) и при установившемся резании (см. рис. 2.4.12) характер эпюр контактных напряжений на фаске износа одинаковый, но их величина при врезании больше (см. рис. 4.1.3).

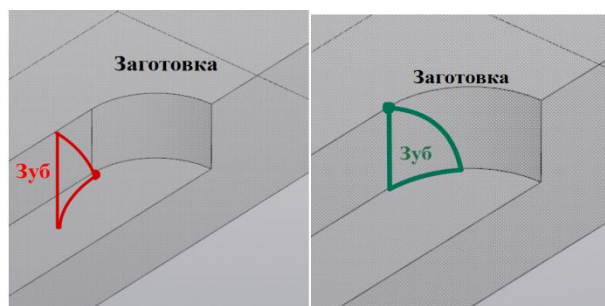
Из рис. 4.1.2 также видно, что при врезании силы резко увеличиваются почти в 2 раза по сравнению с установившемся резанием, что повышает вероятность разрушения режущей кромки при врезании.

4.1.2 Анализ процесса попутного и встречного фрезерования

● Время фрезерования одним зубом

Перед анализом процесса фрезерования необходимо определить время фрезерования одним зубом и тем самым определить интервал исследования резания одним зубом на графике сила-время, полученном с использованием динамометра Kistler при эксперименте. Затем необходимо внутри этого интервала выделить этапы (периоды) изменения величины составляющих сил фрезерования, проанализировать их изменение по времени и относительно друг друга.

Время контакта между зубьями и заготовкой можно разделить на три части: 1) **в момент** врезания зуба фрезы в заготовку (рис. 4.1.4 а); 2) **после** окончания врезания зуба фрезы в заготовку и начало появления стружки на передней поверхности зуба (рис. 4.1.4 б);



а

б

Рисунок 4.1.4— Схема изменения площади контакта зуба фрезы с заготовкой до полного врезания (а) и после полного врезания (б) при встречном фрезеровании

3) в период выхода зуба из контакта с заготовкой. При этом необходимо учитывать угол наклона винтовой стружечной канавки ω и ширину фрезерования B (см. рис. 4.1.5).

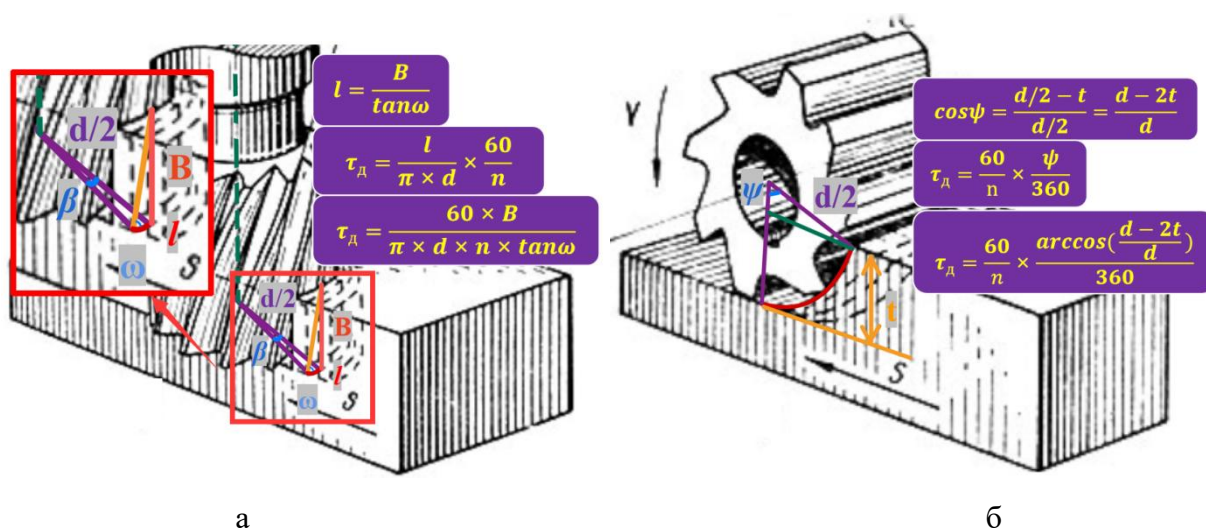


Рисунок 4.1.5 – Схема для расчета времени контакта зуба фрезы с заготовкой до полного врезания (а) и после полного врезания (б)

Время контакта зуба фрезы с заготовкой в период врезания зуба (секунд):

$$\tau_{вр} = \frac{60 \times B}{\pi \times d \times n \times \tan \omega}; \quad (c)$$

Время контакта зуба фрезы с заготовкой после полного врезания зуба:

$$\tau_{п} = \frac{\arccos(\frac{d-2t}{d})}{60 \cdot n}. \quad (c)$$

где **B** – ширина фрезерования (мм), ω – угол наклона винтовой стружечной канавки (°); **d** – диаметр фрезы (мм); **n** – частота вращения фрезы (об/мин); **t** – глубина фрезерования (мм).

Поэтому время фрезерования одного зуба:

$$\tau = \tau_{вр} + \tau_{п} = \frac{60 \times B}{\pi \times d \times n \times \tan \omega} + \frac{\arccos(\frac{d-2t}{d})}{60 \cdot n}. \quad (c)$$

Но, поскольку время контакта зуба фрезы с заготовкой до полного врезания очень короткое, то при небольшой ширине фрезерования **B** (менее 4 мм) при анализе процесса фрезерования можно пренебречь углом наклона

винтовой канавки ω . Поэтому время фрезерования одного зуба:

$$\tau = \frac{\arccos(\frac{d-2t}{d})}{60 \cdot n} \text{ (с)}.$$

Однако обычно отношение времени вращения фрезы на один оборот $[1/n \text{ (мин)}]$ к числу зубьев z (шт) это время контакта зуба фрезы с заготовкой:

$$\tau = \frac{60/n}{\text{количество зубов}}.$$

Время работы одного зуба при $t = d/2$ и четырёхзубой фрезе ($z = 4$ шт)

$$\tau_{\text{1зуба}} = 60/(4 \cdot n) \text{ (с)}.$$

● Процесс встречного фрезерования

При анализе изменения сил фрезерования необходимо иметь в виду, что динамометр Kistler установлен поперёк фрезерного стола

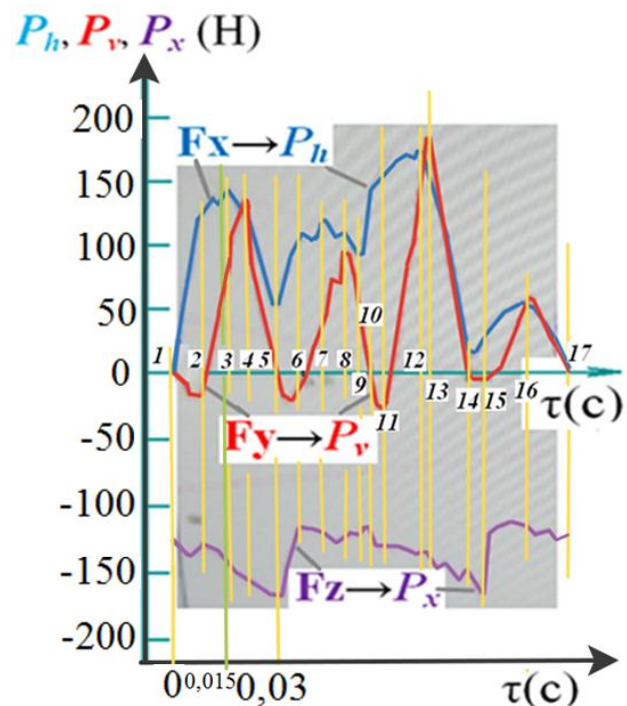


Рисунок 4.1.6 – Графики изменения сил при фрезеровании при повороте острой фрезы на один оборот. Встречное фрезерование 4-х зубой фрезой $d=\varnothing 8$ мм, $t=3,8$ мм, $B=2$ мм, $n=500$ об/мин, $s_m=28$ мм/мин, образец №1 – твердый сплав

(перпендикулярно продольной подаче стола s_m) (см. рис. 3.1.1 а), а заготовка установлена **длинной частью поперёк** динамометра, т.е. **параллельно направлению продольной подачи** стола s_m (см. рис. 3.1.1 а). Заготовка находится за фрезой, если смотреть со стороны оператора (см. рис. 3.1.1 а и рис. 4.1.4).

При врезании зуба в заготовку (см. рис. 4.1.6, диапазон между числами 1 и 2) зуб фрезы своей округлённой режущей кромкой отталкивает заготовку от оси вращения фрезы, т.е. появляется составляющая сила P_v врез с отрицательным знаком (в программе обработки сигналов с датчиков динамометра Kistler «зашиито», что положительный знак у силы F_y (P_v при фрезеровании) будет при действии силы в сторону оператора, т.е. как при токарной обработке).

В это же время составляющая сила P_h врез действует с положительным знаком, т.е. зуб фрезы толкает заготовку в направлении, противоположном

направлению встречной подачи s_m (см. рис. 4.1.7).

Положительный знак у силы F_x (P_h при фрезеровании) на мониторе будет при действии силы слева на право, т.е. как при токарной обработке.

При дальнейшем повороте зуба (см. рис. 4.1.6, диапазон между числами 2 и

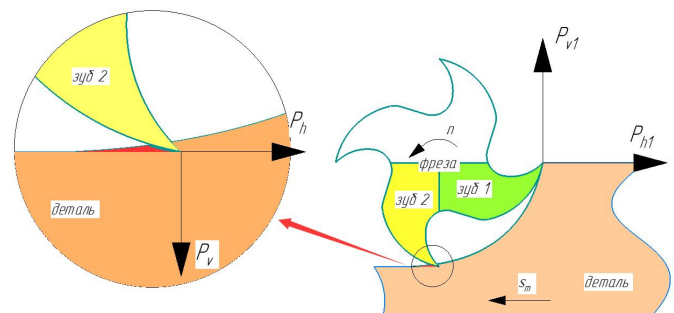


Рисунок 4.1.7 – Составляющие силы, действующие на деталь при встречном фрезеровании при врезании с острой фрезой (показано положение фрезы **после** заготовки на виде сверху)

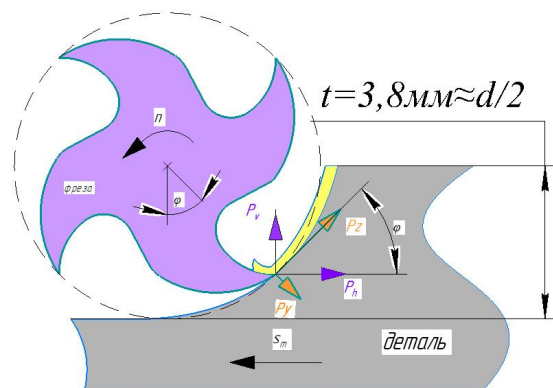


Рисунок 4.1.8 – Составляющие силы (P_y , P_z), полученные после разложения силы при фрезеровании (P_h , P_v) на направление к оси фрезы и тангенциальное направление, т.е. касательно к направлению вращения фрезы (показано положение фрезы **после** заготовки на виде сверху)

3) сила P_v действует уже в положительном направлении оси ОУ, т.е. зуб фрезы притягивает заготовку к оси вращения фрезы из-за положительного главного переднего угла γ (рис. 4.1.8, но показано положение фрезы **после** заготовки на виде сверху). Составляющая сила P_h непрерывно увеличивается по мере поворота зуба фрезы, т.к. увеличивается толщина среза $a_i = s_z \cdot \sin \psi_i$ (см. рис. 4.1.6, диапазон между числами 2 и 3).

По мере поворота зуба фрезы на угол ψ не только увеличивается толщина среза a , но и происходит изменение направления составляющих P_z и P_y силы резания (см. рис. 4.1.8, но показано положение фрезы **после** заготовки на виде сверху). При увеличении толщины среза a сила P_z увеличивается более интенсивно, чем сила P_y , т.к. эта составляющая «отвечает» за срез стружки. Сила P_y при увеличении толщины среза практически не должна изменяться при остром режущем клине из-за малого коэффициента трения на передней поверхности зуба фрезы. Изменение направления действия сил P_z и P_y при повороте фрезы на угол ψ приводит к тому, что составляющая P_v увеличивается, а составляющая P_h начинает наоборот уменьшаться за счёт поворота наибольшей силы P_z в сторону оси ОУ, т.е. она больше увеличивает силу P_v , а не P_h (см. рис. 4.1.6, диапазон между числами 3 и 4).

Дальнейший поворот фрезы приводит к уменьшению толщины среза a_i в период выхода зуба из контакта с заготовкой, что вызывает уменьшение составляющих P_z и P_y , а значит и составляющих P_h и P_v (см. рис. 4.1.6, диапазон между числами 4 и 5). Уменьшение этих составляющих при этом

происходит не так быстро, как уменьшение толщины среза в конце реза зубом, т.к. упругая деформация системы СПИД (станок- приспособление- инструмент- деталь) не позволяет сделать это так резко, как теоретически ожидается. Мы считаем, что с увеличением жёсткости системы СПИД, и, прежде всего, с увеличением жёсткости концевой фрезы как самого нежёсткого элемента, будет происходить более быстрое уменьшение сил в конце работы зуба фрезы.

Осевая составляющая P_x изменяется незначительно в течение всего цикла (см. рис. 4.1.6., диапазон между числами 1 и 5), т.к. по торцевой части в контакте с заготовкой находится практически сразу три зуба при четырёхзубой фрезе и глубине фрезерования $t \approx d/2$. При уменьшении глубины фрезерования $t < 0,2 \cdot d$, т.е. если глубина фрезерования t будет меньше глубины стружечной канавки фрезы H (см. рис. 2.2.3) в постоянном контакте с заготовкой будет находиться только один зуб. Это вызовет большие изменения величины составляющей P_x при повороте фрезы.

Отрицательная величина знака силы P_x ($P_x = -120...-170$ Н) свидетельствует о стремлении фрезы поднять заготовку, что связано с положительным углом наклона зубьев фрезы $\omega = 40^\circ$.

Увеличение силы P_x в отрицательную сторону в диапазоне цифр 2-5 (см. рис. 4.1.6) связано с увеличением толщины среза при повороте фрезы, а уменьшение в диапазоне цифр 5-6 – с уменьшением толщины среза в конце цикла срезания припуска рассматриваемым зубом.

При дальнейшем повороте фрезы следующий зуб фрезы начинает

врезаться в заготовку, поэтому цикл изменения составляющих сил повторяется (см. рис. 4.1.6, диапазон между числами 5 и 9).

● Процесс попутного фрезерования

При врезании зуба в заготовку (см. рис. 4.1.9, диапазон между числами 1 и 2) толщина среза a быстро увеличивается до максимального значения a_{max} (см. рис. 2.2.1 б), поэтому составляющая сила P_h быстро увеличивается до максимального значения, и P_v также быстро увеличивается в

отрицательную сторону направления оси ОУ динамометра (фреза округлённой режущей кромкой и своей задней поверхностью отталкивает заготовку от оси фрезы).

Так как подача $s_m = 104$ мм/мин очень велика, т.е. толщина среза a большая, то сила P_y , действующая в радиальном направлении к оси фрезы имеет в своей составляющей и нормальную нагрузку со стороны задней поверхности зуба в момент **врезания**. Под действием сил P_y и P_z составляющая P_v продолжает увеличиваться в отрицательную сторону из-за большой подачи и перемещения зуба фрезы на продолжение резания. Т.к.

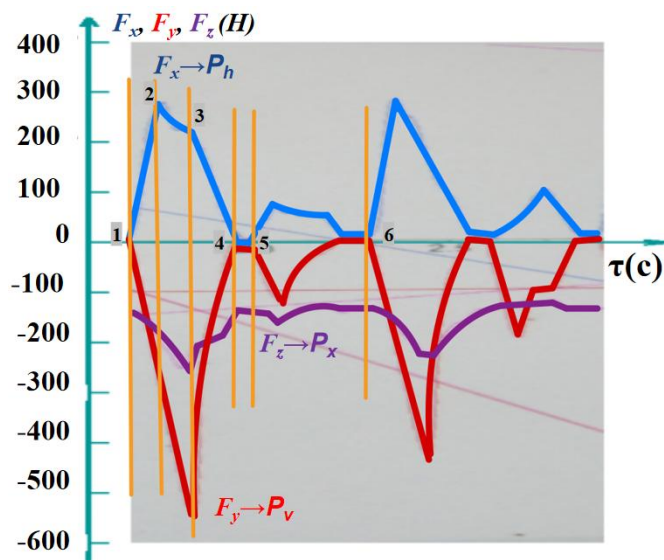


Рисунок 4.1.9 – Графики изменения сил при фрезеровании при повороте острой фрезы на один оборот. Попутное фрезерование 4-х зубой фрезой $d=\varnothing 8$ мм, $t=4$ мм, $B=2$ мм, $n=500$ об/мин, $s_m=104$ мм/мин, образец №1 – твердый сплав

толщина среза при попутном фрезеровании уменьшается, то увеличивается подмятие металла под режущую кромку, но не так интенсивно, как при встречном фрезеровании из-за наличия ещё стружки на передней поверхности зуба фрезы. Составляющая P_h в это время начинает наоборот уменьшаться за счёт уменьшения толщины среза и, соответственно, уменьшения силы P_z , и к тому же происходит поворота её направления в сторону оси ОУ, т.е. она больше действует на силу P_v , а не на P_h (см. рис. 4.1.9, диапазон между числами 2 и 3).

Дальнейший поворот фрезы приводит к дальнейшему уменьшению толщины среза a до нуля, что вызывает уменьшение составляющих P_z и P_y , а значит и составляющих P_h и P_v (см.рис. 4.1.9, диапазон между числами 3 и 4).

Из-за упругой деформации системы СПИД под действием силы P_v фреза отталкивается от обработанной поверхности, из-за чего глубина резания не достигает заданного значения, и, в свою очередь, это приводит к сокращению времени фрезерования одним зубом заготовки. На рис. 4.1.9 в диапазоне между числами 4 и 5 силы равны нулю.

Так же, как изменение силы P_x при встречном фрезеровании, P_x при попутном фрезеровании колеблется вверх и вниз в зависимости от изменения толщины резания a , и эти изменения невелики. Отрицательная величина знака силы P_x свидетельствует о стремлении фрезы поднять заготовку, что связано с положительным углом наклона зубьев фрезы $\omega = 40^\circ$.

При дальнейшем повороте фрезы следующий зуб фрезы начинает врезаться в заготовку, поэтому цикл изменения составляющих сил

повторяется (см. рис. 4.1.9, диапазон между числами 5 и 6). Однако из-за упругой деформации системы СПИД и небольшого радиального биения зубьев максимальная сила каждого цикла не одинакова.

4.1.3 Влияние режимов резания на составляющие силы при фрезеровании

Из-за высокой твердости 3D-печатных материалов зуб фрезы будет подвергаться большой ударной нагрузке при попутном фрезеровании. Это означает, что попутное фрезерование менее благоприятно, чем встречное. Чтобы исследовать наихудший случай, здесь в основном анализируется влияние режимов резания на составляющие силы при попутном фрезеровании и учитываются только **наибольшие** величины сил.

● Влияние минутной подачи s_m на составляющие силы P_h, P_v и P_x при попутном фрезеровании

Зависимость между подачами и составляющими силами при попутном фрезеровании приведена в табл. 4.1.1.

Таблица 4.1.1 – Наибольшие силы при попутном фрезеровании 6-х зубой фрезой $\varnothing d = 12$ мм с глубиной $t = 3$ мм и шириной фрезерования $B = 2$ мм, частотой вращения $n = 2000$ об/мин (образец №3-твердый сплав)

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

Данные в табл. 4.1.1 представлены в графическом виде на рис. 4.1.10. Из рис. 4.1.10. видно, что с увеличением минутной подачи s_m увеличиваются составляющие силы при фрезеровании P_v , P_h и P_z , причем P_v , действующая

перпендикулярно направлению подачи стола, увеличивается больше всего.

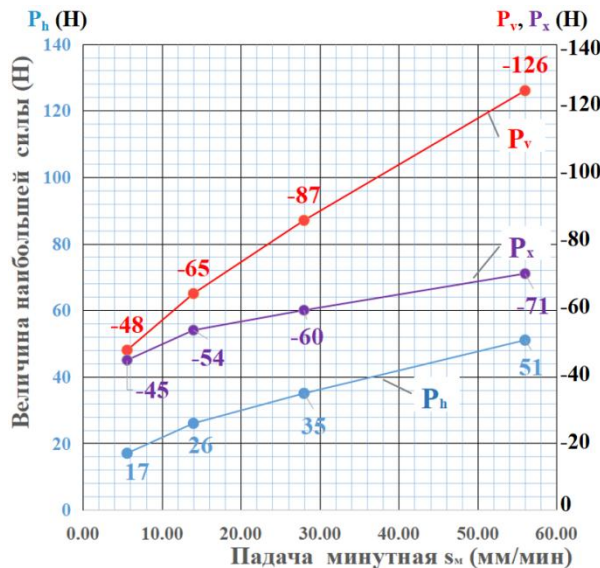


Рисунок 4.1.10 – График влияния подачи s_m (мм/мин) на наибольшие силы P_v , P_h , P_x (Н) при попутном фрезеровании 6-и зубой фрезой $\varnothing d = 12$ мм с глубиной фрезерования $t = 3$ мм, шириной фрезерования $B = 2$ мм, частотой вращения фрезы $n = 2000$ об/мин, образец №3-твердый сплав ВК8.

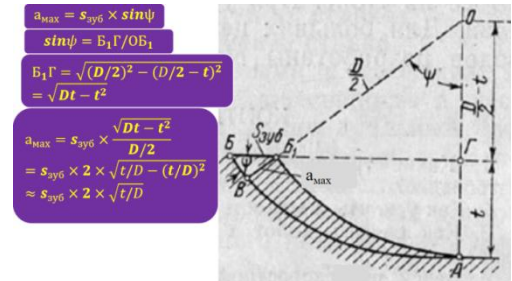


Рисунок 4.1.11 – Сечение срезаемого слоя при попутном фрезеровании цилиндрической или концевой фрезой

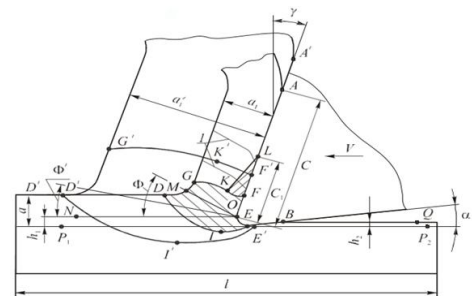


Рисунок 4.1.12– Схема зоны стружкообразования на примере строгания пластины

Из формулы расчёта минутной подачи $s_m = s_z \cdot z \cdot n$ видно, что при увеличении минутной подачи s_m при неизменном числе зубьев z и частоты вращения фрезы n подача на один зуб s_z увеличивается, а значит, максимальная толщина среза a_{max} увеличивается: $a_{max} = 2s_z \sqrt{t/d}$, где t – глубина фрезерования (мм); d (или D) – диаметр фрезы (мм).

При увеличении толщины среза a увеличивается деформация материала в зоне первичной пластической деформации D-I-E-O-F-K-G (см. рис. 4.1.12),

поэтому увеличиваются составляющие силы резания при фрезеровании P_z , P_y , P_x , действующие на зуб, поэтому увеличиваются и силы P_v , P_h , P_x , измеряемые динамометром при фрезеровании.

При попутном фрезеровании при врезании толщина среза наибольшая, поэтому в это время тангенциальная составляющая сила P_z , действующая на зуб

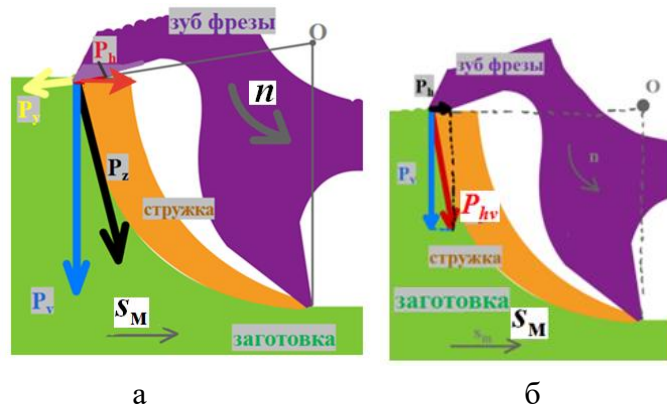


Рисунок 4.1.13 – Схема разложения составляющих P_z и P_y силы резания на силу P_h вдоль направления подачи и силу P_v , перпендикулярную направлению подачи при попутном фрезеровании при врезании. а – при $t < d/2$; б – при $t = d/2$.

фрезы (или от зуба фрезы на заготовку, как указано на рис. 4.1.13 а), наибольшая. В это время сила P_h после разложения P_z вдоль направления подачи и поперёк неё, меньше, чем сила P_v , составляющая силы P_z и направленная перпендикулярно направлению подачи (см. рис. 4.1.13 а).

Это означает, что по сравнению с составляющей силой P_y на составляющую силы P_v больше всего влияет P_z , зависящая от толщины среза. Поэтому при увеличении толщины среза, т.е. при увеличении минутной подачи, P_v увеличивается больше всего (см. рис. 4.1.10).

● Влияние глубины фрезерования t на составляющие силы при попутном фрезеровании

Зависимость между глубиной фрезерования и составляющими силами при попутном фрезеровании приведена в табл. 4.1.2.

Таблица 4.1.2 – Наибольшие силы при попутном фрезеровании 6-и зубой фрезой $\varnothing d = 12$ мм с минутной подачей $s_m = 28$ мм/мин, шириной фрезерования $B = 2$ мм, частотой вращения фрезы $n = 2000$ об/мин (образец №3-твердый сплав)

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

Данные из табл. 4.1.2 представлены в графическом виде на рис. 4.1.14.

С уменьшением глубины фрезерования t составляющие силы P_v и P_h уменьшаются, причем сила P_v уменьшается очень интенсивно. При уменьшении глубины фрезерования t составляющая сила P_x увеличивается в отрицательную сторону.

С уменьшением глубины фрезерования t максимальная толщина среза a_{max} уменьшается, вследствие чего деформация материала в зоне первичной пластической деформации уменьшается

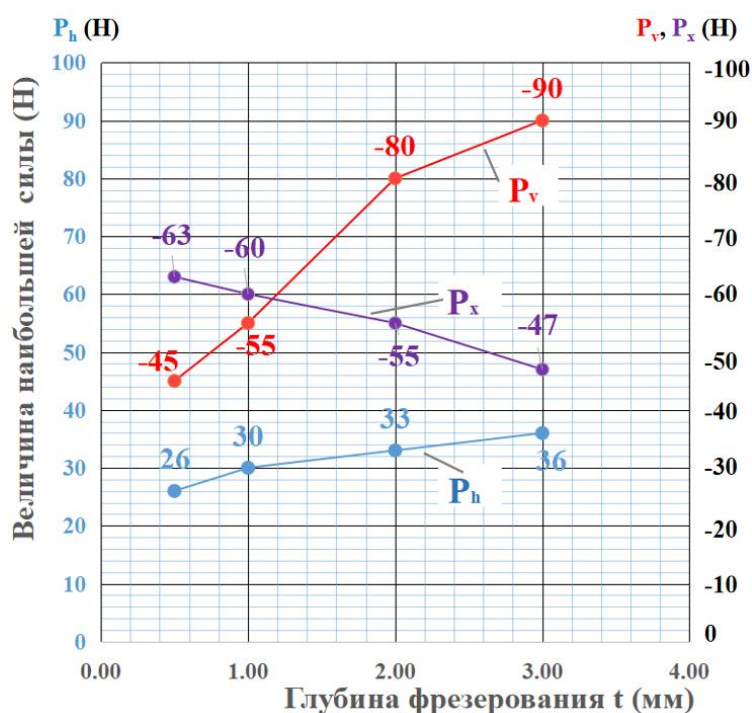


Рисунок 4.1.14– График влияния глубины фрезерования t (мм) на наибольшие силы P_v , P_h , P_x (Н) при попутном фрезеровании 6-и зубой фрезой $d=\varnothing 12$ мм с минутной подачей $s_m=28$ мм/мин, с шириной фрезерования $B=2$ мм, частотой вращения $n=2000$ об/мин (образец №3-твердый сплав)

что приводит к уменьшению составляющих сил P_v и P_h .

При попутном фрезеровании при врезании толщина среза наибольшая, тангенциальная составляющая сила P_z наибольшая. При **большой** глубине фрезерования при врезании силу P_z можно разложить в направления, перпендикулярном подаче, при этом сила P_v существенно увеличится. Сила P_h , действующая в направлении подачи, от увеличения P_z практически не увеличится.

При **малой** глубине фрезерования при врезании составляющая сила P_z разложится не только в направлении, перпендикулярном подаче, но уже будет существенная величина её другой составляющей в направлении подачи. Это приводит к тому, что составляющая сила P_v уменьшается не только за счет уменьшения P_z , но и за счет поворота P_z , а составляющая сила P_h уменьшается из-за уменьшения, связанном и с уменьшением толщины среза $a_{\max}$ при врезании из-за уменьшения глубины фрезерования t , но в связи с поворотом составляющей силы P_z уменьшение P_h будет компенсировано её небольшим увеличением, поэтому эта сила P_h уменьшается не так существенно по сравнению с силой P_v . Следовательно, по мере уменьшения глубины фрезерования **интенсивность** уменьшения составляющей силы P_v больше, чем интенсивность уменьшения составляющей силы P_h .

Основным фактором с виду парадоксального увеличения силы P_x в **отрицательную** сторону при уменьшении глубины фрезерования **является** **уменьшение** осевой силы $P_{x \text{ торц}}$, действующей на **торцовых** режущих

кромках от фрезы
вниз на заготовку (в
положительную
сторону, как сила
 $F_{z\text{при}}$ токарной
обработке), в то
время как осевая сила
на главных режущих
кромках P_x гл.р.кр,
располагающихся на

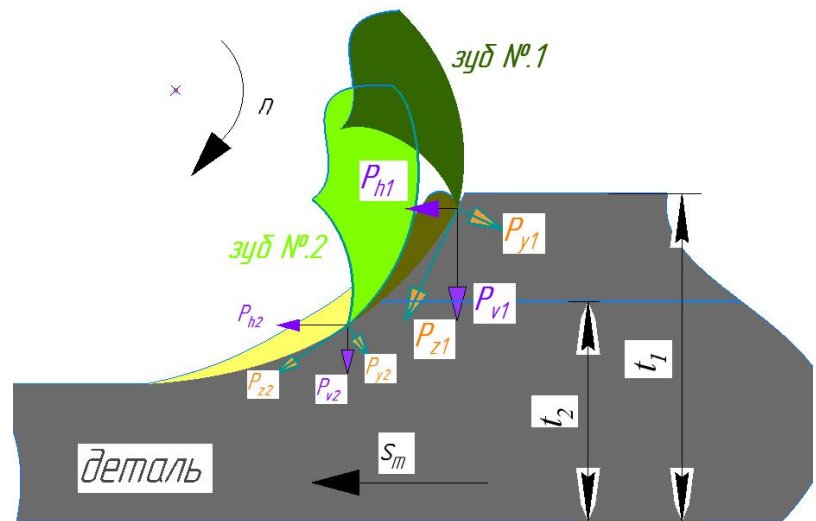


Рисунок 4.1.15 – Изменение направления сил P_y и P_z при попутном фрезеровании при различной глубине фрезерования t

винтовых стружечных канавках с **положительным** углом ω , действует вверх (в **отрицательную** сторону) и старается поднять заготовку. Доля этих сил $P_{x \text{ гл.р.кр}}$ увеличивается при уменьшении глубины фрезерования t , а доля силы $P_{x \text{ торц}}$ наоборот уменьшается, поэтому происходит увеличение силы P_x в отрицательную сторону.

● Влияние ширины фрезерования B на составляющие силы при попутном фрезеровании

Зависимость между шириной фрезерования B и составляющими силами при попутном фрезеровании приведена в табл. 4.1.3.

Таблица 4.1.3 – Влияние ширины фрезерования B на составляющие силы при попутном фрезеровании 6-и зубой фрезой $\varnothing 12$ мм с минутной подачей $s_m=28$ мм/мин, с глубиной $t = 2$ мм, с частотой вращения $n = 2000$ об/мин (образец №3- твердый сплав)

Ширина фрезерования B , мм	P_h , Н	P_v , Н	P_x , Н
8	48	-105	-95
4	37	-80	-90
1	24	-28	-55
0,2	15	-17	10

Данные из табл. 4.1.3 представлены в графическом виде на рис. 4.1.16.

С уменьшением ширины фрезерования B составляющие силы P_v и P_x существенно уменьшаются, причем сила P_v уменьшается более интенсивно. При уменьшении ширины фрезерования B составляющая сила P_h уменьшается меньше всех.

При полном врезании зубьев фрезы в заготовку длина контакта режущей кромки с заготовкой: $l_{\text{конт}} = B/\sin\omega$, где

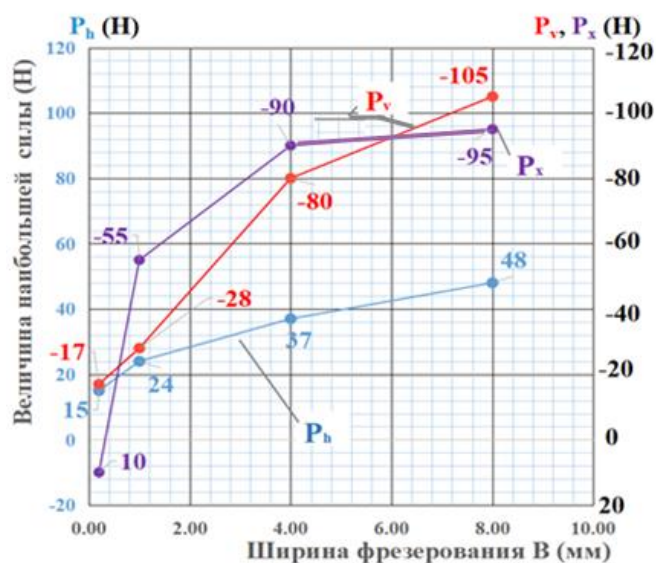


Рисунок 4.1.16 – Влияние ширины фрезерования B (мм) на наибольшие силы P_v , P_h , P_x (Н) при попутном фрезеровании 6-и зубой фрезой $\varnothing 12$ мм. $s_m=28$ мм/мин, $t=2$ мм, $n=2000$ об/мин (образец №3-твердый сплав)

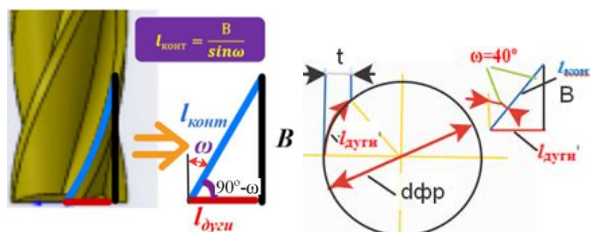


Рисунок 4.1.17 – Схема определения длины контакта режущей кромки с заготовкой $l_{\text{конт}}$ и длину дуги сектора $l_{\text{дуги}} = \pi R \alpha_{\text{сект}}/180$ при несимметричном фрезеровании.

B – ширина фрезерования (мм), ω – угол наклона винтовой канавки ($^\circ$).

Из рис. 4.1.17 видно, что при уменьшении ширины фрезерования длина контакта режущей кромки с заготовкой при полном врезании зубьев фрезы в заготовку уменьшается, что приводит к уменьшению составляющих сил P_v и P_h .

При врезании при попутном фрезеровании толщина среза a в начале резания зубом наибольшая, поэтому составляющая сила P_z , действующая в тангенциальном направлении, наибольшая. В это время на составляющую силу P_v , перпендикулярную направлению подачи s_m больше влияет P_z , а на составляющую силу P_h вдоль направления подачи сила P_z влияет гораздо меньше (см. рис. 4.1.13). Следовательно, когда ширина фрезерования уменьшается, P_z значительно уменьшается, поэтому составляющая сила P_v уменьшается более интенсивно, чем составляющая сила P_h .

При уменьшении ширины фрезерования B сила P_x уменьшается, а при $B = 0,2$ мм становится **положительной**, т.к. нет $P_{x \text{ гл.р.кр}}$, направленной вверх (т.е. с отрицательным знаком). При $B = 0,2$ мм действуют силы практически только на торцевой части зубьев и на уголках, направленные вниз, в сторону заготовки. При $B \approx 0,5$ мм осевая сила $P_x = 0$ Н и происходит переход из отрицательных значений в положительные.

● Влияние частоты вращения n на составляющие силы при попутном фрезеровании

Зависимость между частотой вращения n и составляющими силами при попутном фрезеровании приведена в табл. 4.1.4.

Таблица 4.1.4 – Влияние частоты вращения фрезы на наибольшие силы при попутном фрезеровании 4-х зубой фрезой. $d = 8$ мм, $s_m = 56$ мм/мин, $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, образец №1 - 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

Данные из табл. 4.1.4 представлены в графическом виде на рис. 4.1.18.

С уменьшением частоты вращения n составляющие силы P_v , P_h и P_x увеличиваются, причем сила P_v существенно больше и уменьшается немного более интенсивно.

Сила P_v , действующая в боковом направлении, более существенно влияет на точность обработки заготовки, поэтому с этой точки зрения

желательно увеличивать скорость резания (в рассматриваемом случае частоту вращения шпинделя n), но она может быть ограничена наибольшей частотой вращения шпинделя станка n_{max} ст., а большая скорость резания v приводит к уменьшению стойкости фрезы.

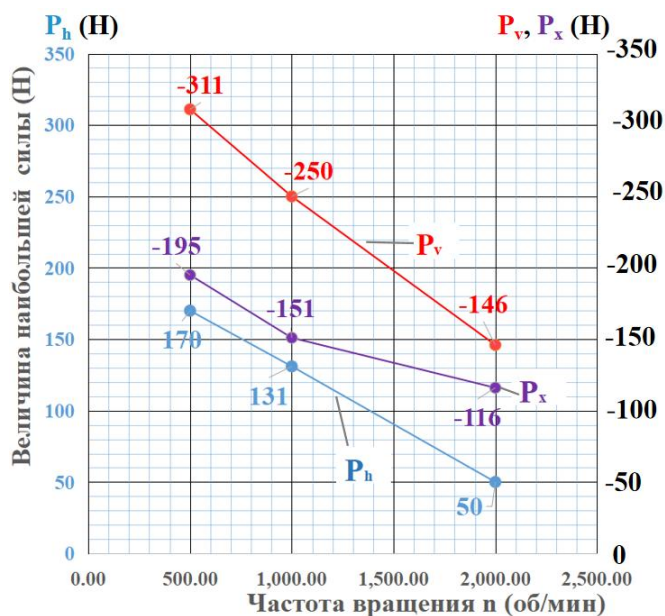


Рисунок 4.1.18– График влияния частоты вращения фрезы n (об/мин) на наибольшую величину сил P_v , P_h , P_x (Н) при попутном фрезеровании 4-х зубой фрезой $\varnothing 8$ мм с минутной подачей $s_m = 56$ мм/мин, глубиной $t = 4$ мм, шириной $B = 2$ мм, образец №1 - твердый сплав ВК8.

Для фрез, изготовленных из твёрдого сплава, ограничением будет n_{max} ст, т.к. даже при достаточно большом диаметре концевой фрезы с цилиндрическим хвостовиком («пальцевая» фреза) $d = 16$ мм и назначенной частоте вращения $n = 2000$ об/мин скорость резания составит $v = 100$ м/мин, что для твёрдого сплава является только нижней границей рекомендуемой скорости резания.

Применение концевой фрезы из твёрдого сплава диаметром более 16 мм нежелательно с точки зрения её стоимости. Фреза диаметром менее 12 мм имеют неудовлетворительную жёсткость в радиальном направлении, что особенно важно для надёжности работы твёрдого сплава.

Наши эксперименты показали, что применение быстрорежущей стали для субтрактивной обработки заготовок из стали 40Х13 и других легированных сталей после аддитивной технологии недопустимо из-за их быстрого износа, особенно по углам. Это вызвано большой твёрдостью подкалённого материала в ходе синтеза заготовки, особенно у корки.

Частота вращения шпинделя более 2000 об/мин вызывает появление вибрации, поэтому требуется использовать жёсткие фрезерные станки и желательно с автоматической динамической балансировкой шпинделя.

Увеличить скорость резания можно используя фрезы с механическим креплением сменных многогранных пластин (СМП). Они не только обладают большей жёсткостью, но и более экономичные, т.к. замена СМП существенно уменьшает стоимость обработки. Однако фрезы с СМП как правило имеют большой окружной шаг между пластинами, что вызывает бóльшую

неравномерность фрезерования, как и отсутствие большого угла наклона винтовой канавки ω , что существенно уменьшает неравномерность фрезерования при использовании рассмотренных цельных концевых фрез.

Цельные концевые фрезы позволяют обрабатывать заготовки с малыми габаритами и обеспечивают лучший доступ к обрабатываемым поверхностям.

В осевом направлении концевые фрезы даже небольшого диаметра имеют высокую жёсткость и прочность, поэтому величина силы P_x не имеет большого значения, по сравнению с силами P_v и P_h .

4.1.4 Влияние геометрических параметров фрезы на составляющие силы при фрезеровании

● Влияние угла наклона винтовой канавки фрезы на составляющие силы при попутном фрезеровании

Использование угла наклона винтовой канавки ω при фрезеровании не только способствует отводу стружки, но и предотвращает резкое

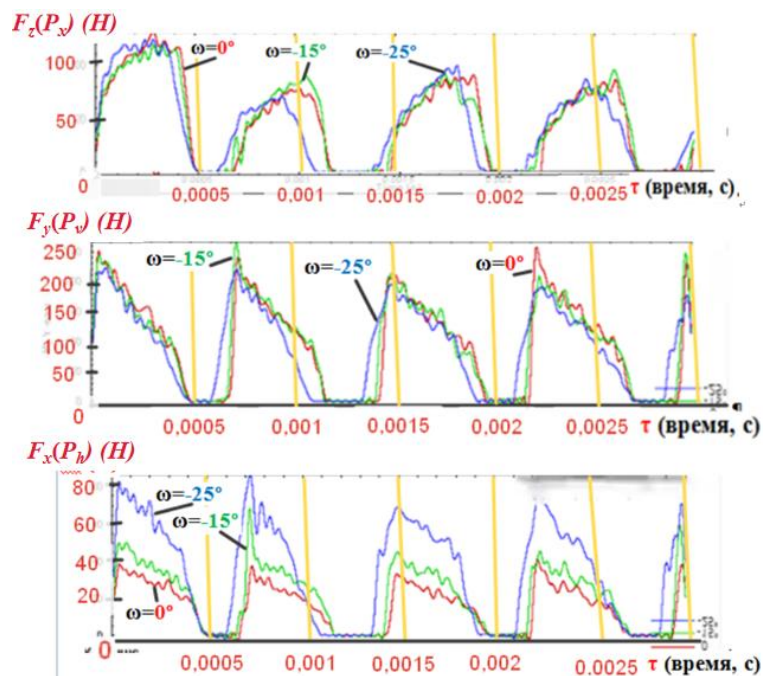


Рисунок 4.1.19 – Изменение составляющих силы резания при разных углах подъёма винтовой канавки фрезы ω от времени работы ($\omega \approx \lambda$)[6].

изменение силы резания из-за врезания и выхода зубьев фрезы, особенно при попутном фрезеровании. Поэтому необходимо исследовать влияние угла наклона винтовой канавки ω на процесс фрезерования.

По рис. 4.1.19, полученному в результате экспериментов по брeющему точению [6], видно, что при изменении угла наклона винтовой канавки от 0 до 25° величина угла ω мало влияет на наибольшую величину силы $F_z (P_x)$ и силы $F_y (P_v)$, но существенно влияет на силу $F_x (P_h)$, действующую вдоль направления подачи, особенно при ω больше 15°, $F_x(P_h)_{\omega=25^\circ} \approx 1,6 \cdot F_x(P_h)_{\omega=15^\circ}$.

Чем больше угол наклона винтовой канавки ω , тем плавнее изменение составляющей силы фрезерования при врезании и выходе зуба фрезы, и чем больше угол наклона винтовой канавки ω , тем нагляднее это явление, т.е. изменение плавности изменения составляющей силы при ω от 15 до 25° больше чем при ω от 0 до 15°. Это явление особенно ярко проявляется в изменении P_h . Когда $\omega=0^\circ$, интенсивность увеличения силы P_h при врезании зуба при попутном фрезеровании существенно больше, чем интенсивность её уменьшения при выходе зуба из контакта с заготовкой.

Наличие разницы величины сил на разных зубьях объясняется радиальным биением зубьев фрезы, и особенно это сказывается на силе P_h (см. рис. 4.1.19). Немного в меньшей степени влияние радиального биения проявляется на графиках изменения силы P_x , а в наименьшей степени, как это ни парадоксально, на графиках изменения силы P_v .

● Влияние инструментального материала на составляющие силы при попутном фрезеровании

Из рис. 4.1.20 а видно, что при большой глубине фрезерования $t = d/2 = 4$ мм составляющая сила P_h , направленная вдоль направления подачи s_m , у твёрдосплавной фрезы изначально отрицательна, а это означает, что в направлении подачи зуб фрезы сначала отталкивает заготовку от фрезы, затем по мере поворота фрезы составляющая силы P_h становится положительной и зуб фрезы подтягивает заготовку к фрезе. Время между врезанием зуба №1 и

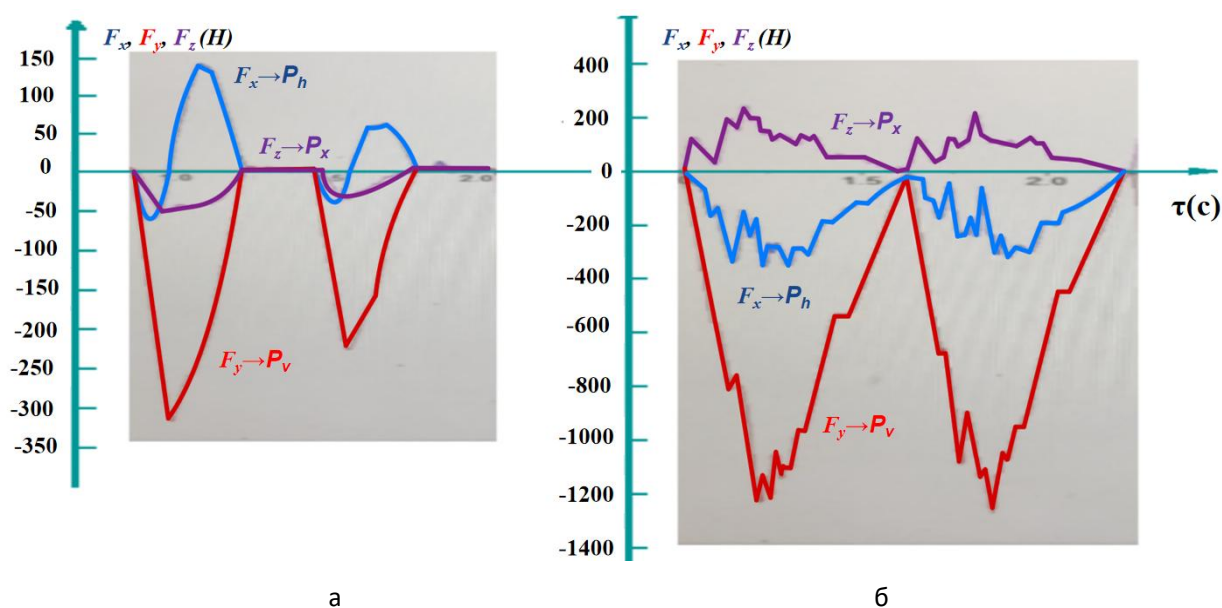


Рисунок 4.1.20 – Графики изменения сил фрезерования при повороте острой фрезы на один оборот. Попутное фрезерование 2-х зубой фрезой Ø8 мм, $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, $s_m = 28$ мм/мин, а – образец №3 – твердый сплав ВК8, б – образец №3 – быстрорежущая сталь Р6М5

зуба №2 достаточно большое (в это время все силы равны нулю).

Сила P_v всегда отрицательна и интенсивность её увеличения при врезании зуба сопоставима с интенсивностью её уменьшения при выходе зуба из контакта с заготовкой.

Сила P_x всегда отрицательна, т.е. фреза тянет заготовку вверх из-за положительного угла наклона винтовых стружечных канавок ω (главных режущих кромок).

Разница в величине сил на разных зубьях объясняется их небольшим радиальным биением.

Фреза из стали Р6М5 начинает сразу же изнашиваться, что видно по положительной величине силе P_x (см. рис. 4.1.20 б), т.е. осевая сила на главной режущей кромке $P_{x \text{ гл.р.кр}}$, которая тянет заготовку вверх из-за положительного угла ω , уже не может компенсировать давление на заготовку вниз осевой силы $P_{x \text{ торц}}$ от изношенных по вершинам зубьям и их торцовой части.

Округление главных режущих кромок из-за износа приводит к отрицательной величине силы P_h (см. рис. 4.1.20. б), т.е. зуб фрезы уже не подтягивает заготовку к себе, как это проявлялось при фрезеровании твёрдосплавной фрезой, у которой режущие кромки остаются острыми достаточно долгое время (см. рис. 4.1.20 а).

Боковая сила P_v при фрезеровании быстрорежущей фрезой почти в 4 раза больше силы P_v при фрезеровании твёрдосплавной фрезой (см. рис. 4.1.20 б, а). Это связано, на наш взгляд, с округлением главных режущих кромок из-за износа.

Большая величина силы P_v приводит к бóльшей упругой деформации системы СПИД, поэтому отсутствует участок с нулевыми силами при заходе в контакт следующего зуба быстрорежущей фрезы (см. рис. 4.1.20 б), хотя

промежуток времени такой же, что и при фрезеровании твёрдосплавной фрезой (см. рис. 4.1.20 а).

При фрезеровании фрезой из стали Р6М5 из-за большой величины составляющих сил и малой жесткости фрезы возникает большая вибрация системы СПИД, что видно по колебанию составляющих сил на рис. 4.1.20 б.

Колебания составляющих сил P_x и P_h более очевидны.

По формуле $\tau = \frac{\arccos(\frac{d-2t}{d})}{6n}$ при глубине фрезерования $t = 4$ мм при частоте вращения $n = 500$ об/мин фрезой Ø8 мм время фрезерования одного зуба: $\tau = \frac{\arccos(\frac{8-2 \times 4}{8})}{6 \times 500} = 0,03$ (с). А время работы (фрезерования) одного зуба фрезой из стали Р6М5 немного больше, чем это время. Это связано с тем, что из-за упругой деформации системы СПИД зуб не так быстро выходит из контакта с заготовкой.

● Влияние количества зубьев фрезы на составляющие силы при попутном фрезеровании

Из рис. 4.1.21. видно, что количеству зубьев фрезы соответствует количество пиков и впадин на графике изменения составляющих сил P_h , P_v и P_x за один оборот фрезы. При фрезеровании 4-х зубой фрезой количество пиков и впадин по четыре (рис. 4.1.21. б), при фрезеровании 6-и зубой фрезой количество пиков и впадин по шесть (рис. 4.1.21. а).

При фрезеровании 4-х зубой фрезой составляющие силы значительно больше, чем у 6-и зубой фрезы. Это связано с тем, что по формуле $s_m = s_z \cdot z \cdot n$ при постоянной минутной подаче s_m и частоте вращения n с увеличением

числа зубьев z , уменьшается подаче на зуб s_z .

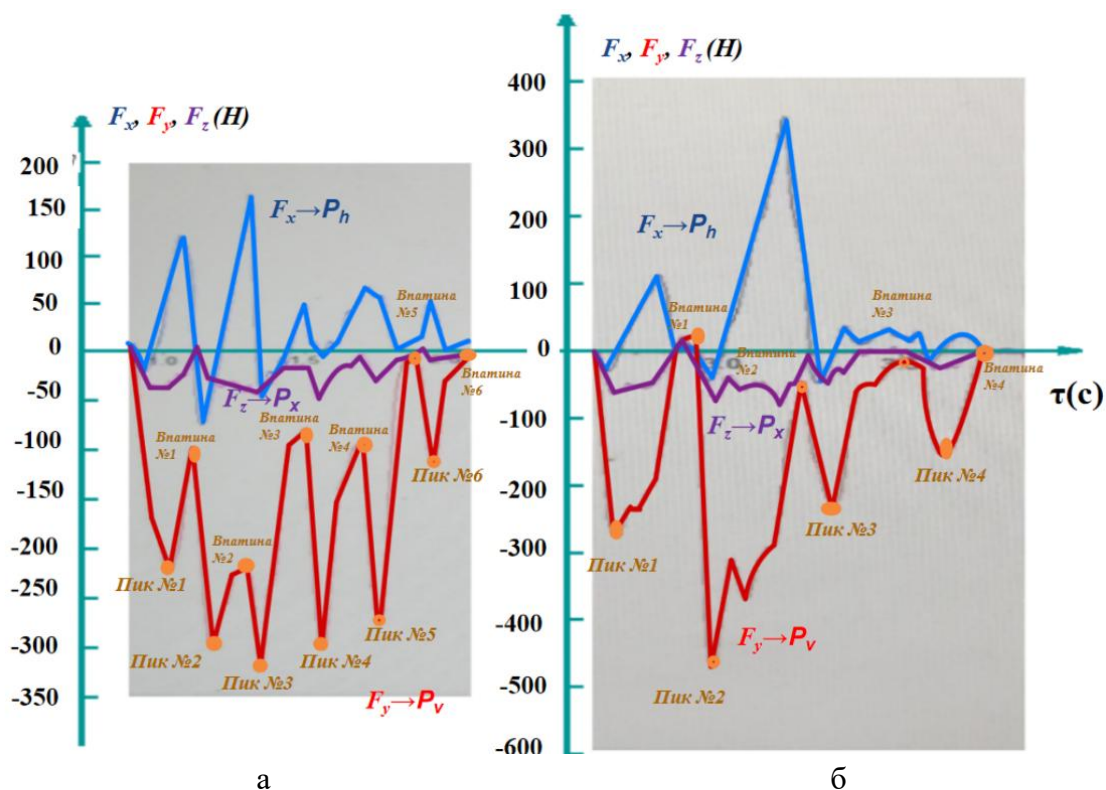


Рисунок 4.1.21 – Графики изменения сил при фрезеровании при повороте острой фрезы на один оборот. Попутное фрезеровании 6-и зубой фрезой (а) и 4-х зубой фрезой (б)
 $\varnothing d = 12$ мм, $t = 5,5$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, $v = 18,85$ м/мин, $s_m = 56$ мм/мин,
 образец №3 - твердый сплав ВК8

Согласно формуле $a_{max} = 2s_z\sqrt{t/D}$ при неизменности глубины фрезерования t и диаметра фрезы D при уменьшении подачи на зуб s_z уменьшается максимальная толщина среза a_{max} , что уменьшает объём деформации материала в зоне первичной пластической деформации D-I-E-O-F-K-G (см. рис. 4.1.12) и уменьшает составляющие силы при фрезеровании.

Количество зубьев особенно сильно влияет на величину составляющей силы P_v , перпендикулярной направлению подачи s_m , за которой следует

величина составляющей силы P_h в направлении подачи, но мало влияет на величину составляющей силы P_x вдоль оси фрезы. Причем при фрезеровании вторым зубом 4-х зубой фрезы, т.е. от впадины №1 к впадине №2, фреза также слегка вибрировала.

При фрезеровании 6-и зубой фрезой диапазон изменения сил значительно меньше, чем при фрезеровании 4-х зубой фрезой. Как показано на рис.4.1.21 а, при использовании второго, третьего и четвертого зубьев 6-и зубой фрезы, т.е. от впадины №1 к впадине №4, диапазон изменения составляющей силы P_v составляет около 250 Н; а при резании второго и третьего зубьев 4-х зубой фрезы, т.е. от впадины №1 к впадине №3, диапазон изменения составляющей силы P_v составляет уже около 500 Н.

● Влияние переднего угла главной режущей кромки фрезы на составляющие силы при попутном фрезеровании

Из-за сложности изменения переднего угла зубьев фрезы трудно исследовать влияние переднего угла γ режущей кромки фрезы на составляющие силы P_h , P_v и P_x при попутном фрезеровании. Поэтому вместо исследования влияния переднего угла режущей кромки фрезы на составляющие силы, исследуем влияние главного переднего угла резца на составляющие силы резания.

Для расчета составляющих силы

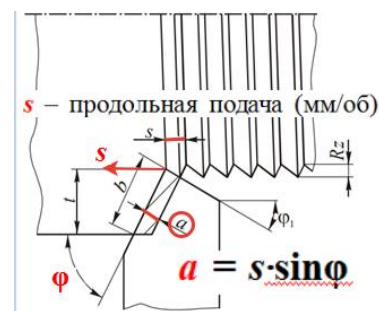


Рисунок 4.1.22 – Форма поперечного сечения среза при токарной обработке

резания можно использовать удельные силы резания:

$$q_p = \frac{P}{a \times b} \approx \frac{P}{t \times s}. \text{ (Н/мм}^2\text{)}$$

где a – толщина среза (мм), $a=s \times \sin \varphi$; b – ширина среза (мм), $b=t/\sin \varphi$; t – глубина резания (мм); φ – главный угол в плане ($^\circ$); s – продольная подача (мм/об).

Иногда для упрощения эксперимента используются **линейные** удельные силы резания:

$$q_{pxy \text{ лин}} = \frac{P_{xy}}{b}, \text{ (Н/мм)}$$

$$q_{pz \text{ лин}} = \frac{P_z}{b}, \text{ (Н/мм)}$$

где P_{xy} – результирующая (суммарная) технологическая составляющая сила, действующая в основной плоскости, состоящая из осевой составляющей P_x и радиальной составляющей P_y : $P_{xy} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$; P_z – тангенциальная технологическая составляющая сила, действующая в направлении скорости резания.

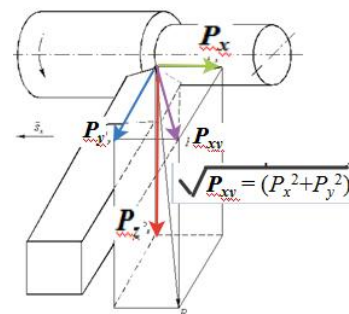


Рисунок 4.1.23 –
Составляющие силы P_x , P_y и P_z , действующие на резец

Из рис. 4.1.24 видно, что при переднем угле γ больше 0° , по мере увеличения переднего угла, т.е. когда режущая кромка становится более острой, линейные удельные силы резания несколько снижаются. Когда передний угол γ меньше 0° , по мере увеличения отрицательного переднего угла, т.е. когда режущая кромка затупляется, линейные удельные силы резания быстро увеличиваются, особенно при толщине среза более 0,163 мм. Это связано с тем, что при отрицательном переднем угле изменяется

направление движения стружки, и чем больше отрицательный передний угол, тем больше изменение, это приводит к повышенной деформации материала в зоне первичной пластической деформации (см. рис. 4.1.12) и увеличению линейных удельных сил резания.

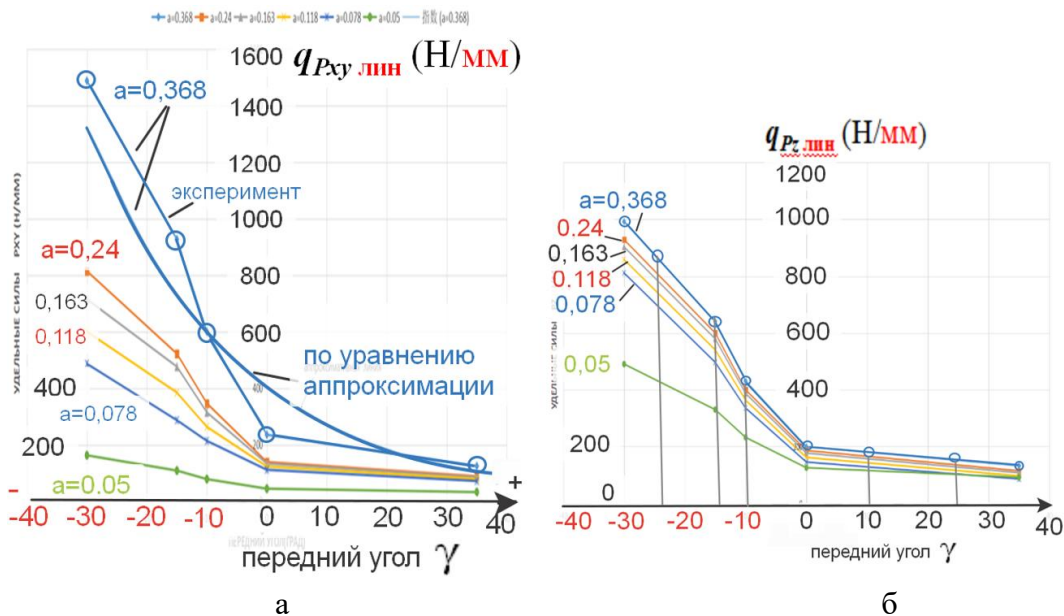


Рисунок 4.1.24 – Влияние переднего угла γ ($^{\circ}$) на линейную удельные линейные силы $q_{Pxy,lin}$ (а) и $q_{Pz,lin}$ (Н/мм) (б) в зависимости от толщины среза a (мм)

По мере увеличения отрицательного переднего угла γ отношение линейной удельной силы резания $q_{Pz,lin}$ к $q_{Pxy,lin}$ уменьшается. Это связано с тем, что увеличивается деформация материала в зоне первичной пластической деформации, что приводит к повышенному тепловыделению и уменьшению коэффициента трения между стружкой и передней поверхностью резца.

4.2 Исследование изменения сил фрезерования при износе фрезы

Поскольку износ фрезы в основном влияет на технологические составляющие силы P_v и P_h , измеряемые динамометром, а также на силы, действующие на зуб фрезы P_y и P_z , то при врезании анализируется процесс встречного фрезерования изношенной концевой фрезой, когда износ по задней поверхности влияет в наибольшей степени.

При врезании в заготовку (рис. 4.2.1, диапазон между числами 1 и 2) фаска зубьев фрезы давит на обработанную поверхность (красный выступ) (см. рис. 4.2.2 а), поэтому составляющая сила P_h в направлении подачи (тангенциальная сила,

действующая от зуба на заготовку) и боковая составляющая сила P_v , перпендикулярная направлению подачи (представляющая собой на этом этапе врезания зуба в заготовку нормальную силу, действующую на фаску), быстро возрастают и P_v достигает наибольшего значения до появления стружки на передней поверхности.

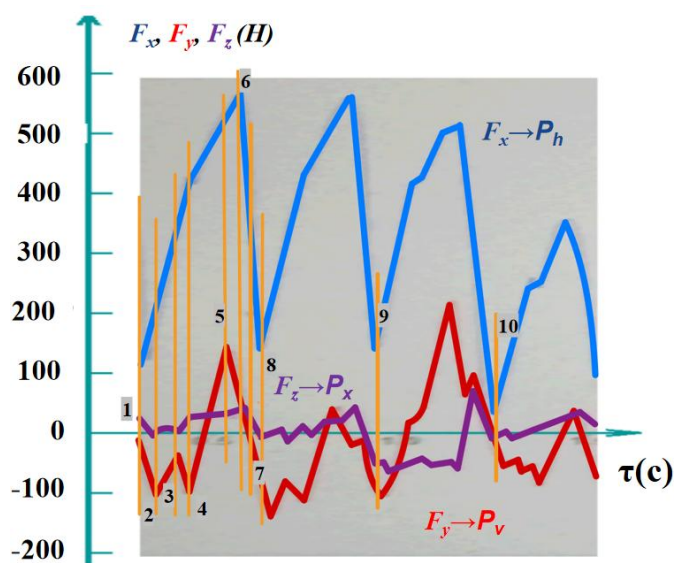


Рисунок 4.2.1 – Графики изменения сил при фрезеровании при повороте изношенной фрезы на один оборот. Встречное фрезерование 4-х зубой фрезой $\varnothing 8$ мм, $t = 3,8$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, $s_m = 28$ мм/мин, образец №1 - твердый сплав

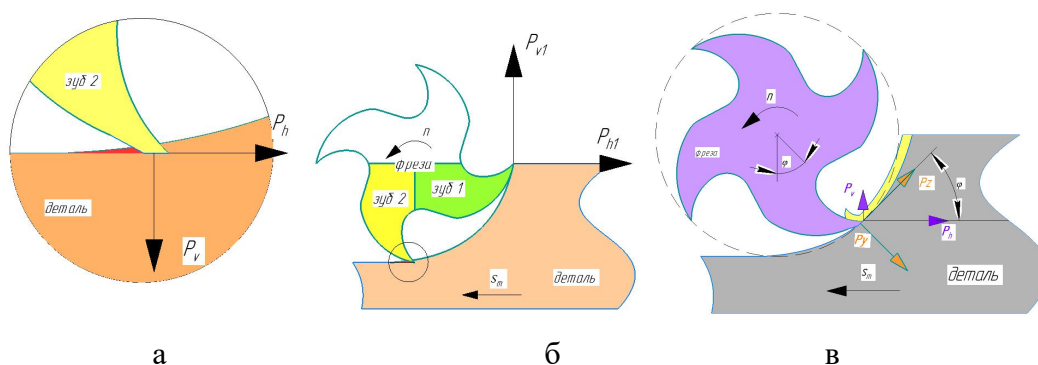


Рисунок 4.2.2 – Составляющие силы, действующие на заготовку при встречном фрезеровании при врезании (а), после врезания (б) изношенной концевой фрезой, а также схема направления сил при центральном угле контакта $\psi \approx 30^\circ$ (в)

Из рис. 4.2.2 в видно, что составляющая сила P_h в направлении подачи рассчитывается по уравнению:

$$P_h = P_z \times \cos\psi + P_y \times \sin\psi; \quad (4.2.1)$$

составляющая сила P_v , перпендикулярная направлению подачи рассчитывается по уравнению:

$$P_v = P_z \times \sin\psi - P_y \times \cos\psi. \quad (4.2.2)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания, действующая вдоль направления вектора скорости резания; P_y – радиальная составляющая силы резания, действующая в радиальном направлении от оси вращения фрезы; ψ – центральный угол контакта режущей кромки зуба с заготовкой от точки (линии) её касания при врезании до текущего положения.

После врезания в заготовку (см. рис. 4.2.1, диапазон между числами 2 и 3), т.е. **после появления** стружки на передней поверхности зуба фрезы, сила P_v временно уменьшается, т.к. уменьшается вдавливание обрабатываемого

материала под режущую кромку из зоны первичных пластических деформаций (см. рис. 4.1.12).

Из-за малой толщины среза a составляющая сила P_z ещё мала, поэтому составляющая сила P_z практически не влияет на величину составляющих сил P_h и P_v . Но из-за поворота зуба фаска износа на задней поверхности дополнительно толкает заготовку от себя вперёд, поэтому сила P_h продолжает увеличиваться (см. рис. 4.2.1, диапазон между числами 2 и 3).

При дальнейшем повороте (вращении) зуба фрезы контактный угол ψ увеличивается, и, хотя сила P_z тоже увеличивается, но из-за поворота её вектора сила P_h увеличивается не так интенсивно, а сила P_v увеличивается не только за счёт увеличения силы P_y , но больше за счёт поворота вектора силы P_z , хотя на этом этапе угол поворота вектора силы P_z ещё небольшой.

По мере того как зуб фрезы продолжает поворачиваться относительно оси вращения фрезы (см. рис. 4.2.1, диапазон между числами 3 и 4), толщина среза a увеличивается более существенно и радиальная сила P_y , действующая от фаски на заготовку как нормальная сила на фаске, увеличивается. Составляющая силы резания P_z вдоль направления скорости тоже увеличивается из-за увеличения толщины среза, но из-за более существенного угла поворота её вектора на этом этапе влияет больше на величину составляющей силы P_v , чем на P_h , поэтому составляющая сила P_h продолжает увеличиваться, а P_v снова начинает увеличиваться.

При повороте фрезы в диапазоне между числами 4 и 5 (см. рис. 4.2.1) составляющая сила P_z в направлении скорости резания увеличивается за счет

увеличения толщины среза a , это приводит к дальнейшему увеличению силы P_h , а составляющая сила P_v уже не отталкивает заготовку от фрезы, а начинает тянуть её к себе, поэтому она сначала уменьшается до нуля, а затем становится положительной, т.е. тянет заготовку к фрезе ещё больше за счёт поворота зуба.

При дальнейшем повороте зуба фрезы (см. рис. 4.2.1, диапазон между числами 5 и 6) толщина среза a начинает уменьшаться перед выходом зуба из контакта, поэтому сила P_z начинает немного уменьшаться, но за счёт давления фаски износа на задней поверхности на заготовку (действует сила P_y , на этом этапе положения зуба она действует уже против подачи стола) сила P_h короткое время продолжает увеличиваться. За счёт уменьшения величины силы P_z , направленной на этом этапе положения зуба фрезы уже перпендикулярно подаче стола, сила P_v уменьшается до нуля (зуб фрезы уже меньше тянет заготовку к оси фрезы).

По формуле 4.2.1 при увеличении радиальной составляющей силы P_y увеличивается составляющая силы P_h , направленная против направления подачи стола.

При повороте зубьев фрезы в диапазоне 6-7 (см. рис. 4.2.1.) толщина среза a быстро уменьшается при выходе зуба из контакта с заготовкой, что приводит к быстрому уменьшению всех составляющих силы резания (P_z и P_y , а значит P_h и P_v).

В точке 8 начинает врезаться в заготовку уже следующий зуб, поэтому цикл повторяется (см. рис. 4.2.1, диапазон 8-9). Разная величина сил в

диапазоне 1-8, 8-9, 9-10 и т.д. говорит о небольшом радиальном биении зубьев фрезы. Уменьшение величины силы P_h от диапазону к диапазону резания разными зубьями может быть объяснена увеличением температуры зубьев фрезы и впереди расположенного, но ещё не срезанного слоя материала заготовки. Это приводит к снижению прочности материала,

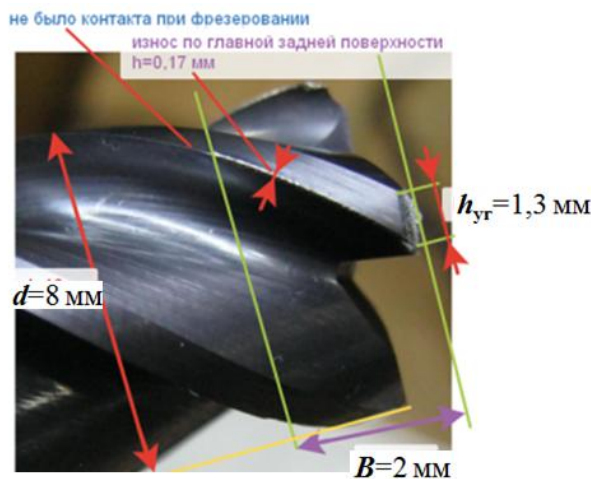


Рисунок 4.2.3 – Зоны износа на фрезе.

входящего в зону контакта с очередным зубом фрезы.

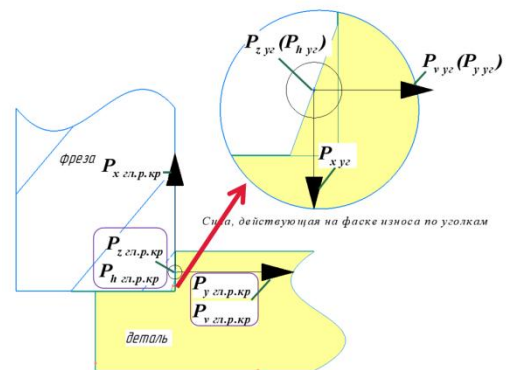


Рисунок 4.2.4 – Направление сил $P_{v\text{ уг.}}$, $P_{y\text{ уг.}}$, $P_{h\text{ уг.}}$, $P_{z\text{ уг.}}$, действующих от фаски износа по углам на заготовку и направление сил $P_{x\text{ гл.р.кр.}}$, $P_{h\text{ гл.р.кр.}}$, $P_{y\text{ гл.р.кр.}}$, действующих от главной режущей кромки.

Как показано на рис. 4.2.3, при фрезеровании твердым сплавом износ возникает не только на задней поверхности основной режущей кромки на цилиндрической части фрезы, т.е. износ по задней поверхности h_z , но и в месте пересечения главной (основной) режущей кромки и вспомогательной режущей кромки, т.е. износ по углам $h_{\text{уг}}$. При фрезеровании твердым сплавом, поскольку длина фаски износа по задней поверхности ($h_z=0,17\text{ мм}$) значительно меньше длины фаски износа по углам ($h_{\text{уг}}=1,3\text{ мм}$), влияние

износа по уголкам на силы намного больше, чем влияние износа по задней поверхности у главной режущей кромки на силы.

Как показано на рисунке 4.2.4, составляющая сила $P_{x \text{ уг}}$, действующая на заготовку вдоль оси фрезы, направлена вертикально вниз, которая заставляет заготовку прижиматься к столу; а составляющая сила $P_{x \text{ гл.р.кр}}$ главной режущей кромки, действующая на заготовку вдоль оси фрезы, направлена вверх, которая отрывает заготовку от стола. При фрезеровании изношенной фрезой, по сравнению с фрезерованием острой фрезой, на заготовку действует еще одна составляющая сила $P_{x \text{ изн уг}}$, которая приводит к уменьшению P_x , что видно из сравнения рис. 4.1.6 и рис.4.2.1.

При изменении толщины среза a под совместным действием силы, действующей на режущую кромку на торце фрезы, на уголок, и силы, действующей на главную режущую кромку, сила P_x вдоль оси фрезы (F_z при токарной обработке) изменяется незначительно по величине. По сравнению с острой фрезой осевая сила P_x редко направлена вверх, т.е. заготовка в основном прижимается фрезой к столу станка (к горизонтальной поверхности тисов).

4.3 Исследование НДС фрезы при фрезеровании

4.3.1 Исследование влияния подачи на НДС острой фрезы

● Определение физических составляющих силы на передней поверхности

Из рис. 4.1.6 видно, что максимальное значение составляющих сил P_h , P_v и P_x не появляется одновременно в одном цикле, но для рассмотрения наихудшего случая предполагаем, что максимальное значение каждой составляющей силы появляется одновременно в одном цикле, и толщина среза a в этот момент наибольшая. При проведении экспериментов динамометром мы измеряем не силы, действующие на фрезу, а силы, действующие от фрезы на заготовку – они будут равны по абсолютному значению, но противоположны по направлению. Но для упрощения формулировок будем прилагать измеряемые силы как действующие на фрезу.

Исходя из проведённых исследований, примем, что при ширине фрезерования $B = 2$ мм составляющие силы, действующие на главную режущую кромку на цилиндрической части $P_{vг}$ и $P_{hг}$, примерно в 2 раза больше чем составляющие силы, действующие на вспомогательную режущую кромку на торцевой части $P_{vб}$ и $P_{hб}$. Осевая составляющая сила, действующая на главную режущую кромку $P_{xг}$, примерно в 9 раз больше, чем осевая составляющая сила, действующие на вспомогательную режущую кромку $P_{xб}$. Поэтому:

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

$$P_{xб} = P_{x\max} \times 1/8; P_{hб} = P_{h\max} \times 1/3; P_{vб} = P_{v\max} \times 1/3.$$

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. 4.1.8 показано, как составляющие силы $P_{v\Gamma}$, $P_{h\Gamma}$, P_{vB} , P_{hB} разлагаются в радиальном направлении и тангенциальном (в касательном) направлении относительно оси вращения фрезы.

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 – центральный 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 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 при положительном переднем угле γ :

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

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

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

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

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

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

● Построение эпюр контактных напряжений на передней поверхности

По эксперименту при встречном фрезеровании 4-х зубой острой фрезой $\varnothing d = 8$ мм, при глубине фрезерования $t = 4$ мм, ширине фрезерования $B = 2$ 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, а максимальная толщина среза

$$a_{\max} = 2s_z \sqrt{t/D - (t/D)^2} = 2 \frac{s_m}{z \times n} \sqrt{t/D - (t/D)^2}; \quad (4.3.7)$$

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

По формулам 4.3.1÷4.3.6 можно получить:

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

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

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

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

Согласно рис. 2.4.5 и рис. 2.4.6 при толщине среза $a = 0,014$ мм основные параметры эпюры нормальных напряжений: длина контакта стружки с передней поверхностью зуба $c = 0,15$ мм, $\sigma_{\max} = 730$ МПа, $\sigma_{\text{const}} = 220$ МПа, $L_2 = 0,05$ мм.

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 нормальная сила по эпюре была равна нормальной силе, полученной из эксперимента, т.е. $\frac{N}{l_{\text{конт}}} = \int_0^c \sigma(x) dx$, 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. 4.1.17.). После этого получается окончательная эпюра нормальных напряжений.

Максимальное касательное напряжение, действующее на передней поверхности зуба

$$\tau_{\max} = \tau_{\text{const}} = F / (c \times 0,75 \times l_{\text{конт}}); \quad (4.3.8)$$

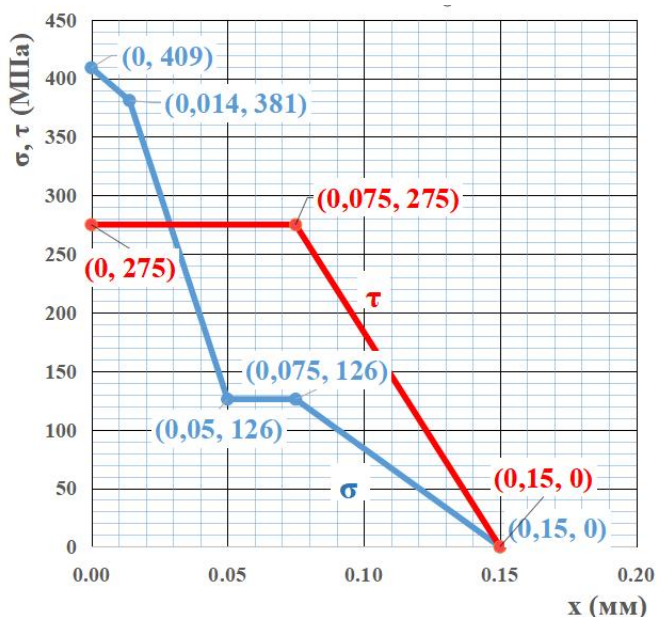


Рисунок 4.3.1— Эпюры контактных напряжений на передней поверхности зуба при встречном фрезеровании 4-х зубой фрезой $\varnothing d = 8$ мм с глубиной $t = 4$ мм, шириной $B = 2$ мм, с частотой вращения $n = 500$ об/мин, с подачей в минуту $s_m = 28$ мм/мин, $c = 0,15$ мм, образец №1-твердый сплав.

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

При использовании метода 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 эпюрам контактных напряжений (табл. 4.3.1).

Рассчитываем удельные технологические силы q_{yzi} и q_{zzi} (МПа) на участках передней поверхности зуба фрезы при подаче $s_m = 28$ мм/мин (табл. 4.3.1).

Таблица 4.3.1– Удельные технологические силы q_{yzi} и q_{zzi} (МПа) на участках передней поверхности зуба фрезы при расчёте НДС зуба. $s_m = 28$ мм/мин, $l_{конт} = 3,1$ мм ($\gamma = 7^\circ$, $\omega = 40^\circ$, $c = 0,15$ мм, образец №1-твёрдый сплав)

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	σ_i , МПа	τ_i , МПа	q_{yri} , МПа	q_{zri} , МПа
1	2	3	6	9	10
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_{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 $\gamma = 7^\circ$.

Напряжение, действующее на каждую область вдоль оси фрезы:

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

Из условий фрезерования вышеуказанной концевой фрезой определяем,

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.

● Исследование влияния подачи на НДС

Ранее было определены контактные напряжения, действующие на переднюю поверхность зуба фрезы при подаче в минуту $s_m = 28$ мм/мин. Затем определяются контактные напряжения при подаче в минуту $s_m = 14$ мм/мин и $s_m = 56$ мм/мин.

Расчёт контактных напряжений при подаче $s_m = 14$ мм/мин.

По эксперименту, при встречном фрезеровании 4-х зубой острой 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 $s_m = 14$ мм/мин, образец №1-твердый сплав: $P_{hmax} = 88$ Н, $P_{vmax} = 75$ Н, $P_{xmax} = 145$ Н.

По формулам 4.3.1÷ 4.3.7 рассчитываются силы:

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

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

$$P_{x\Gamma} = 145 \times 9/8 = 163(\text{Н}); P_{zB} = 75 \times 1/3 = 25 \text{ Н};$$

$$P_{yB} = 88 \times 1/3 = 29(\text{Н}); P_{xB} = 145 \times \frac{1}{8} = 18 \text{ Н};$$

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

Согласно рис. 2.4.5 и рис. 2.4.6 при толщине среза $a = 0,007$ мм

основные параметры эпюры нормальных напряжений: длина контакта стружки с передней поверхностью зуба $c = 0,088\text{ мм}$, $\sigma_{max} = 700\text{ МПа}$, $\sigma_{const} = 210\text{ МПа}$, $L_2 = 0,03\text{ мм}$. Обычно при фрезеровании стали длина пластического участка контакта стружки с передней поверхностью зуба $c_1 \approx 0,5c = 0,044\text{ мм}$.

По формуле 4.3.8 рассчитывается касательное контактное напряжение на первом участке контакта стружки с передней поверхностью зуба фрезы:

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

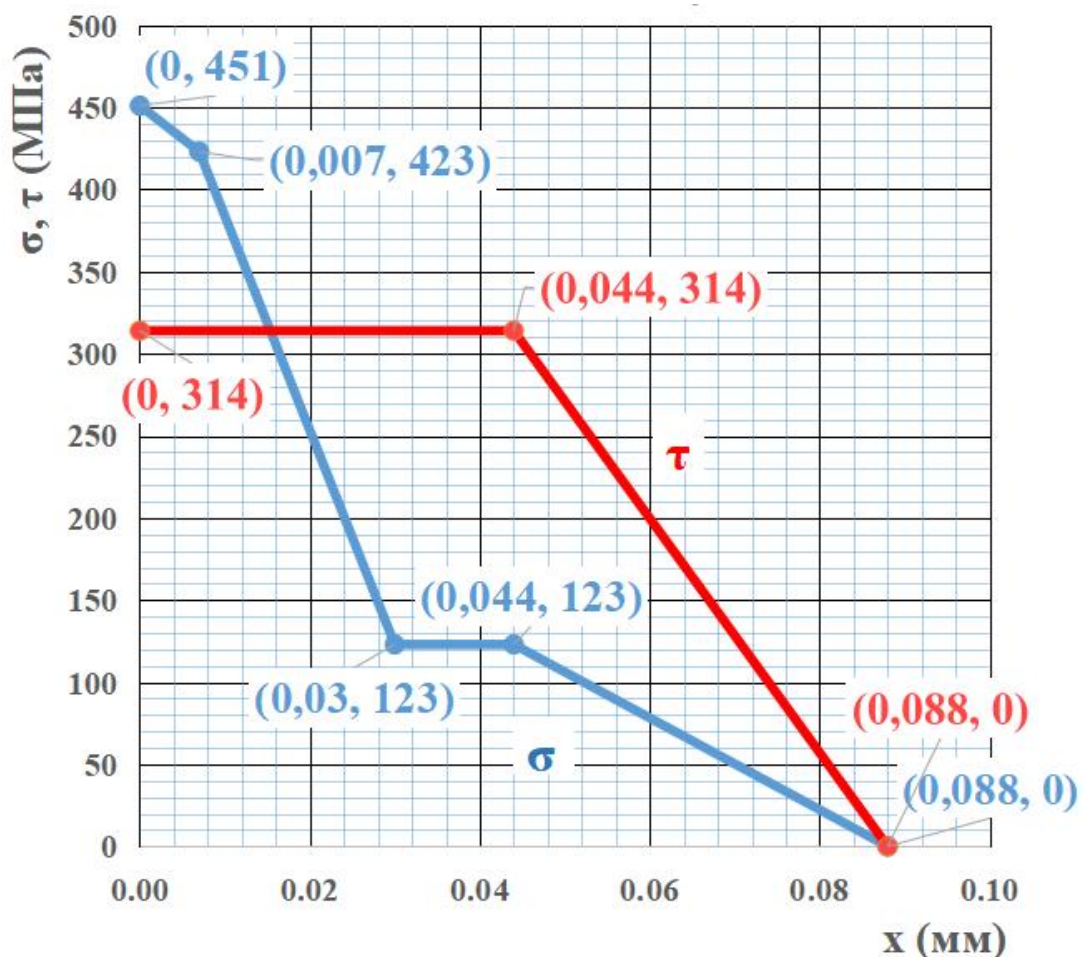


Рисунок 4.3.2 – Эпюры контактных напряжений на передней поверхности при встречном фрезеровании. $z = 4$ шт., $d = 8\text{ мм}$, $t = 4\text{ мм}$, $B = 2\text{ мм}$, $n = 500\text{ об/мин}$, $s_m = 14\text{ мм/мин}$, $c = 0,088\text{ мм}$, образец №1 - твердый сплав ВК8.

Рассчитываем удельные технологические силы q_{yzi} и q_{zzi} (МПа) на участках передней поверхности зуба фрезы при подаче $s_m = 14$ мм/мин (табл. 4.3.2).

Таблица 4.3.2 – Удельные технологические силы q_{yzi} и q_{zzi} (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_{yzi} , МПа	q_{zzi} , МПа
1	2	3	6	9	10
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_{yzi} — удельная технологическая сила, действующее на область i вдоль радиального направления фрезы, $q_{yzi} = \tau_i \times \cos \gamma - \sigma_i \times \sin \gamma$, q_{zzi} — удельная технологическая сила, действующее на область i в тангенциальном направлении относительно оси фрезы, $q_{zzi} = \tau_i \times \sin \gamma + \sigma_i \times \cos \gamma$.

Расчёт контактных напряжений при подаче $s_m = 56$ мм/мин.

Напряжение, действующее на каждую область вдоль оси фрезы:

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

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.

По эксперименту, при встречном фрезеровании 4-х зубой острой фрезой

$d = 8$ мм, $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, $s_m = 56$ мм/мин, образец №1 – твёрдый сплав ВК8, $P_{h\max} = 180$ Н, $P_{v\max} = 216$ Н, $P_{x\max} = 174$ Н.

По формулам 4.3.1÷4.3.7 рассчитываются силы:

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

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

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

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

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

Согласно рис. 2.4.5 и рис. 2.4.6. при толщине среза $a = 0,028$ мм основные параметры эпюры нормальных напряжений: длина контакта стружки с передней поверхностью зуба $c = 0,268$ мм, $\sigma_{\max} = 750$ МПа, $\sigma_{\text{const}} = 230$ МПа, $L_2 = 0,1$ мм. Обычно при фрезеровании стали длина пластического участка контакта стружки с передней поверхностью зуба $c_1 \approx 0,5c = 0,134$ мм.

По формуле 4.3.8 рассчитывается касательное контактное напряжение на первом участке контакта стружки с передней поверхностью зуба фрезы:

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

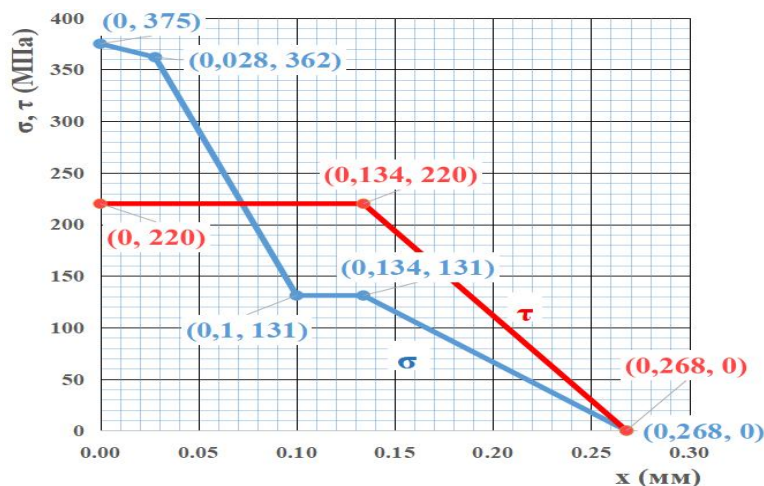


Рисунок 4.3.3– Эпюры контактных напряжений на передней поверхности при встречном фрезеровании 4-х зубой фрезой. $d = 8$ мм, $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, $s_m = 56$ мм/мин, $c = 0,268$ мм, образец №1 - твердый сплав.

Рассчитываем удельные технологические силы q_{yzi} и q_{zzi} (МПа) на участках передней поверхности зуба фрезы при подаче $s_m = 56$ мм/мин (табл. 4.3.3).

Таблица 4.3.3 – Удельные технологические силы q_{yzi} и q_{zzi} (МПа) на участках передней поверхности зуба фрезы при расчёте НДС зуба. $s_m = 56$ мм/мин, образец №1-твердый сплав, $l_{\text{конт}} = 3,1$ 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_{yzi} , МПа	q_{zzi} , МПа
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>6</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
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_{yzi} — удельная технологическая сила, действующая на область i вдоль радиального направления фрезы, $q_{yzi} = \tau_i \times \cos \gamma - \sigma_i \times \sin \gamma$, q_{zzi} — удельная технологическая сила, действующая на область i в тангенциальном направлении относительно оси фрезы, $q_{zzi} = \tau_i \times \sin \gamma + \sigma_i \times \cos \gamma$.

Напряжение, действующее на каждую область вдоль оси фрезы:

$$q_{xгi} = P_{xг}/8 = 196/8 = 24,5 \text{ МПа.}$$

Считаем, что составляющие силы действуют на площадь передней поверхности вспомогательной режущей кромки в виде прямоугольника шириной

$b_v=0,56\text{мм}$ и высотой $a_v= 0,4 \text{ мм}$.

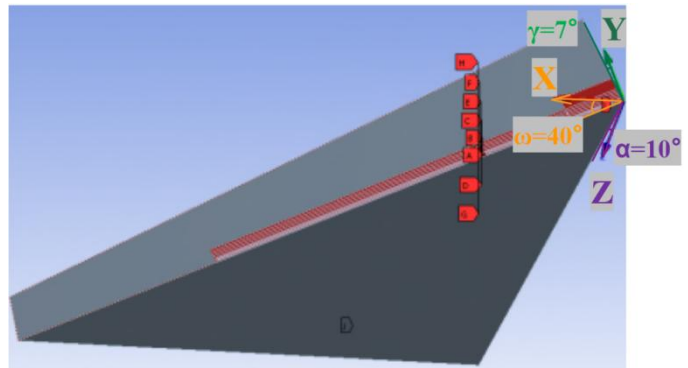
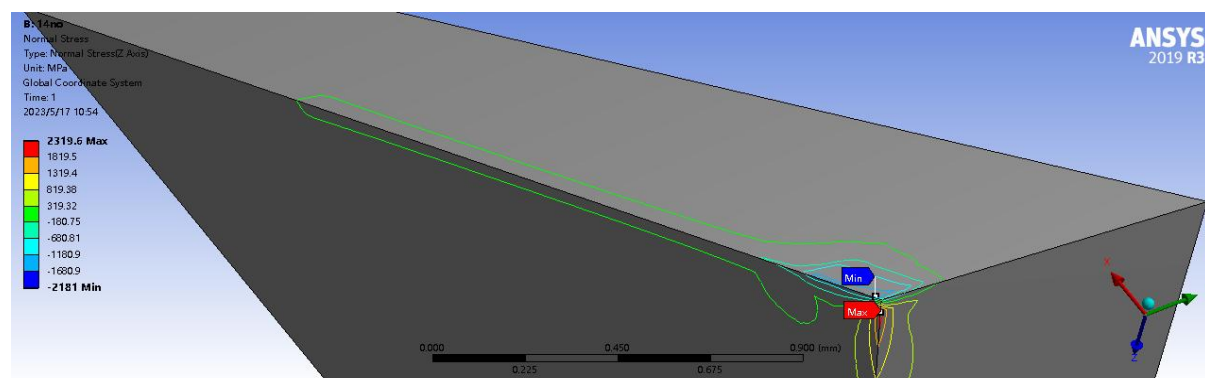
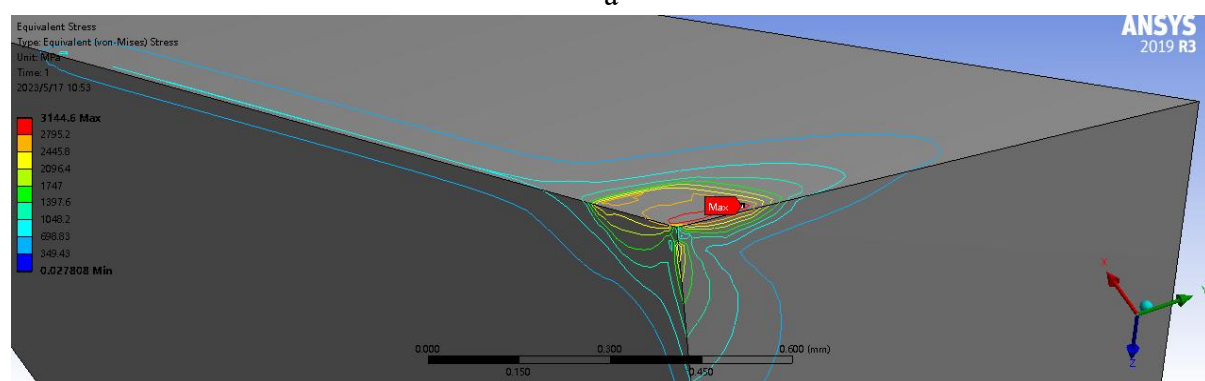
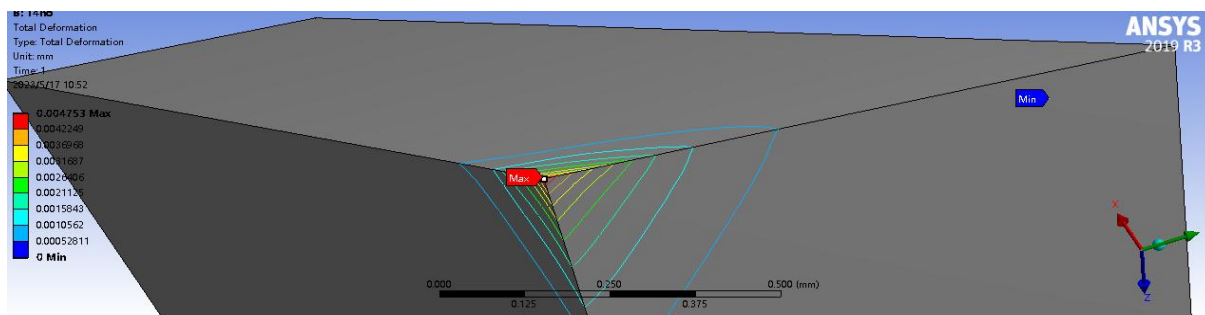


Рисунок 4.3.4. Приложение внешних нагрузок на переднюю поверхность у главной режущей кромки

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 $\omega = 40^\circ$ (см. рис. 4.3.4.).

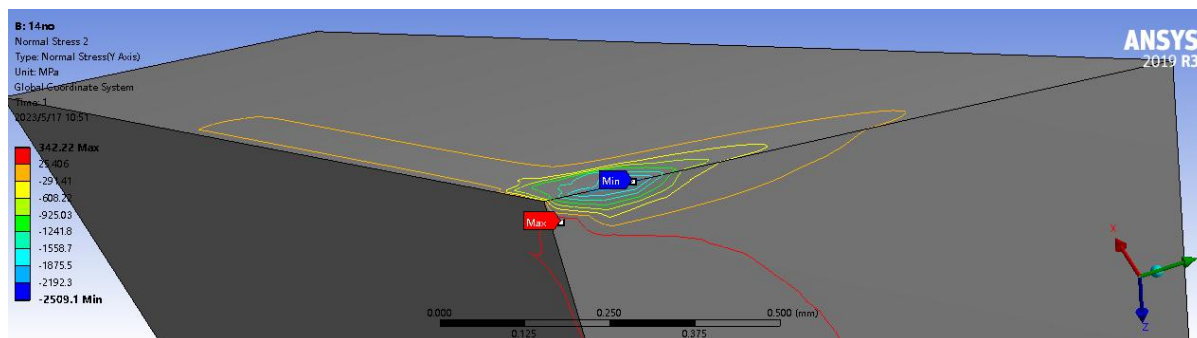
Результаты расчетов напряжений в режущем клине методом конечных элементов (МКЭ) с использованием программы ANSYS представлены на рис. 4.3.5.÷4.3.7.



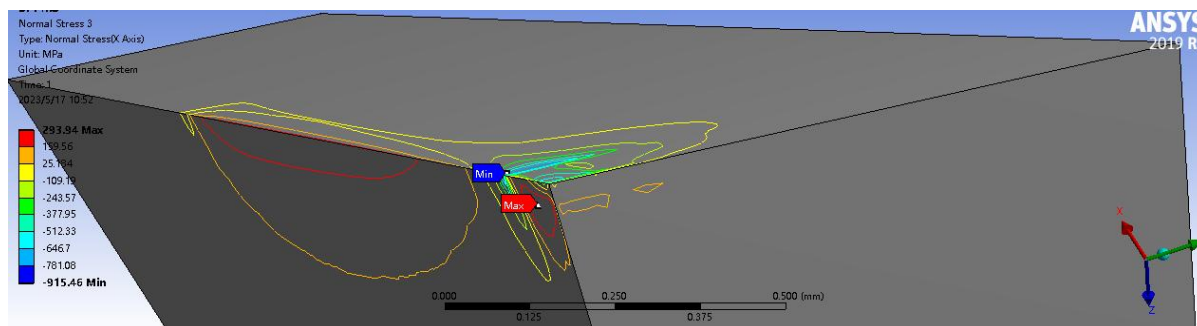
в

Рисунок 4.3.5 – 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 зубой 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.

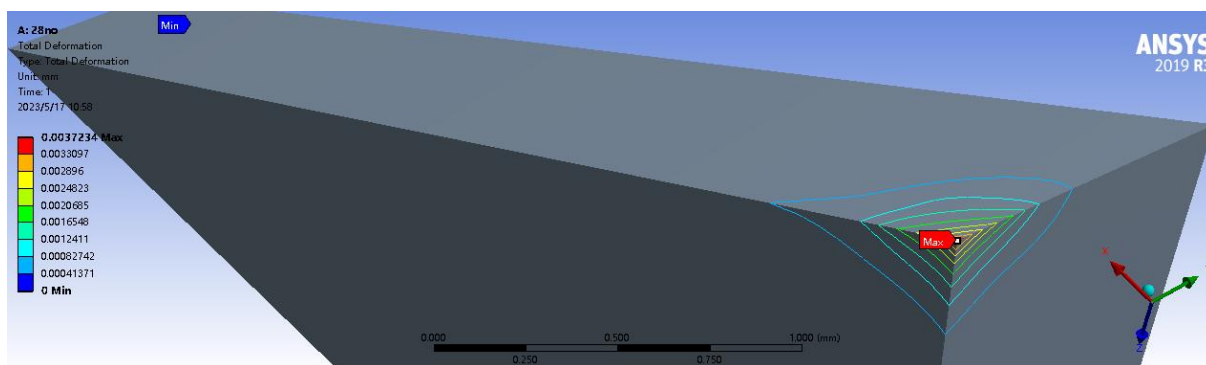


Г



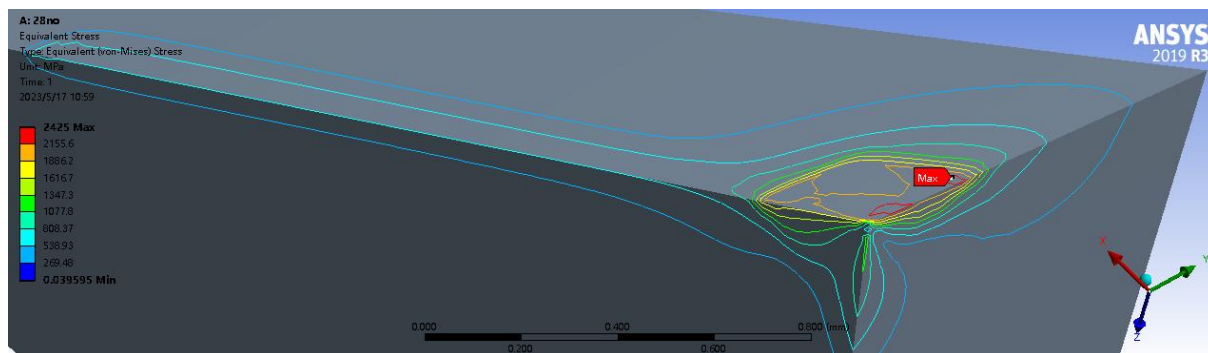
Д

Рисунок 4.3.5 (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 зубой острой фрезой. $s_m = 14$ мм/мин, образец №1-твердый сплав, $d = 8$ мм, $B = 2$ мм, $t = 4$ мм, $I_{\text{конт}} = 3,1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $\omega = 40^\circ$,
 $n = 500$ об/мин, $c = 0,088$ мм.

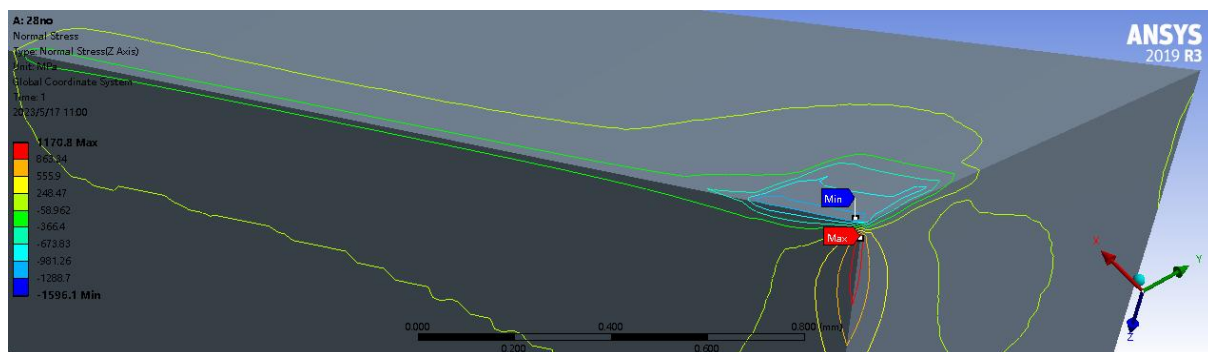


а

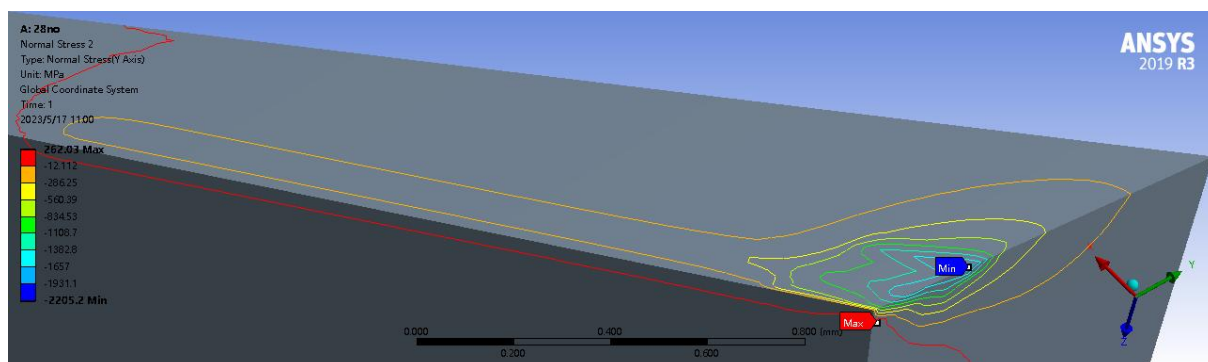
Рисунок 4.3.6 – Распределение общей внутренней деформации ϵ (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа); в – нормальных σ_z (МПа) в направлении оси OZ; г – нормальных σ_y (МПа) в направлении оси OY; д – нормальных σ_x (МПа) в направлении оси OX
Встречное фрезерование 4-х зубой острой фрезой. $s_m = 28$ мм/мин, образец №1-твердый сплав, $d = 8$ мм, $B = 2$ мм, $t = 4$ мм, $I_{\text{конт}} = 3,1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $\omega = 40^\circ$,
 $n = 500$ об/мин, $c = 0,15$ мм.



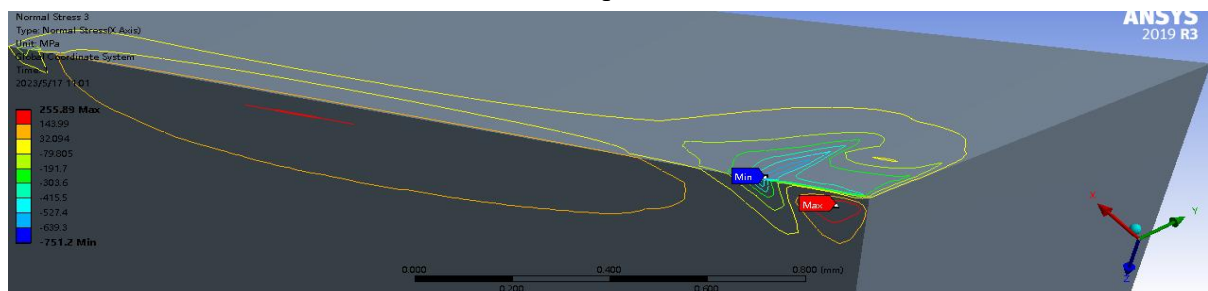
б



в



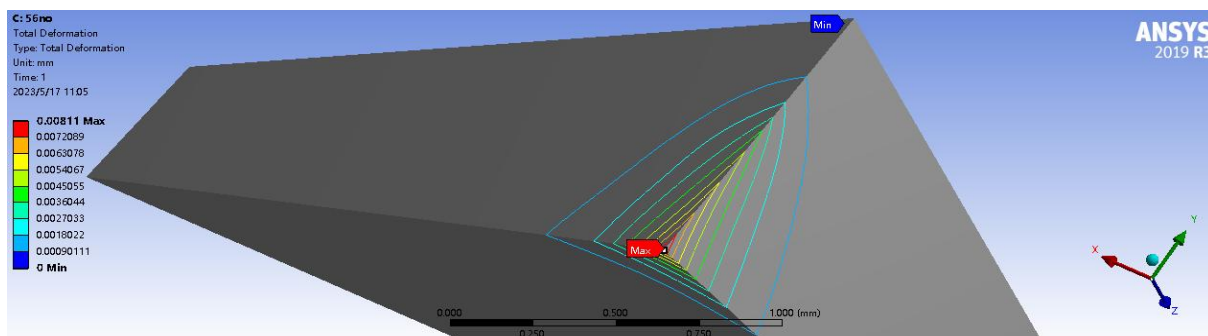
г



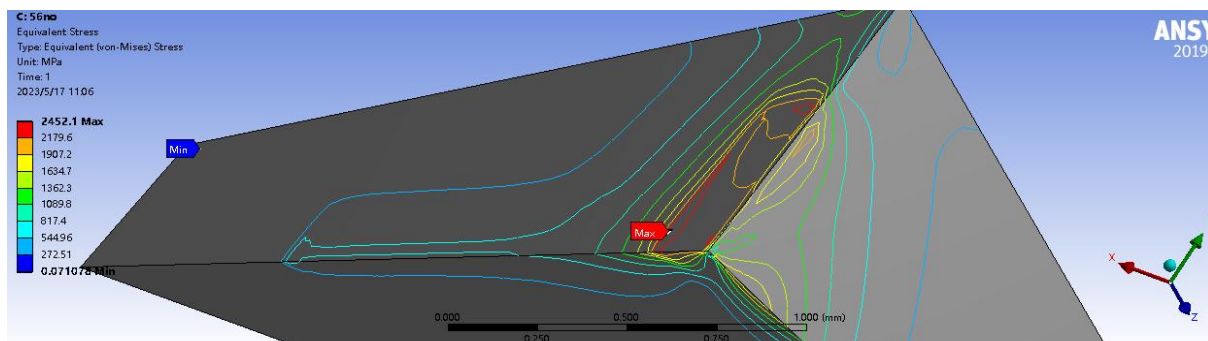
д

Рисунок 4.3.6 (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

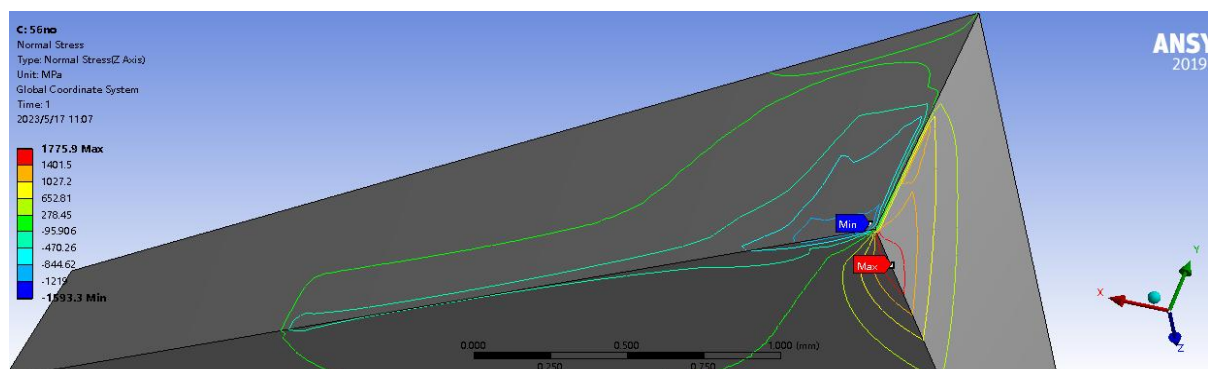
Встречное фрезерование 4-х зубой острой фрезой. $s_m = 28$ мм/мин, образец №1-твердый сплав, $d = 8$ мм, $B = 2$ мм, $t = 4$ мм, $l_{\text{конт}} = 3,1$ мм, $\gamma = 7^\circ$, $\omega = 40^\circ$, $n = 500$ об/мин, $c = 0,15$ мм.



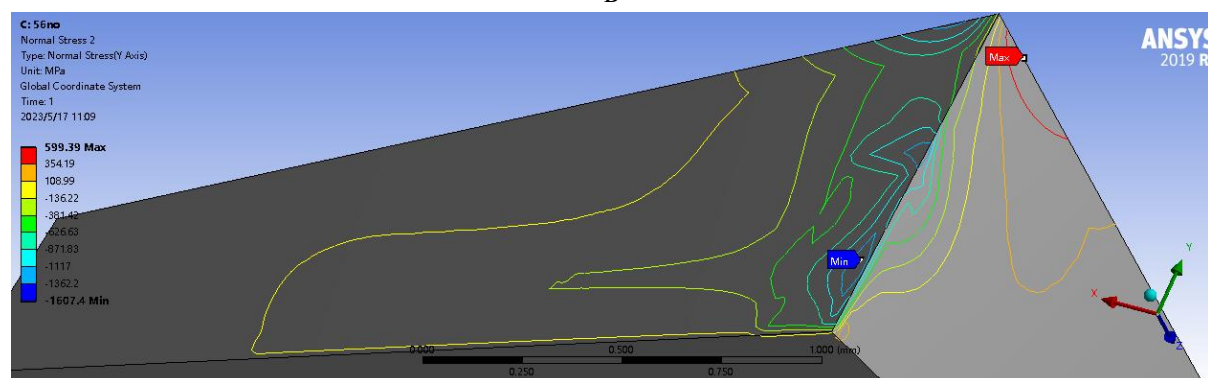
a



б



в

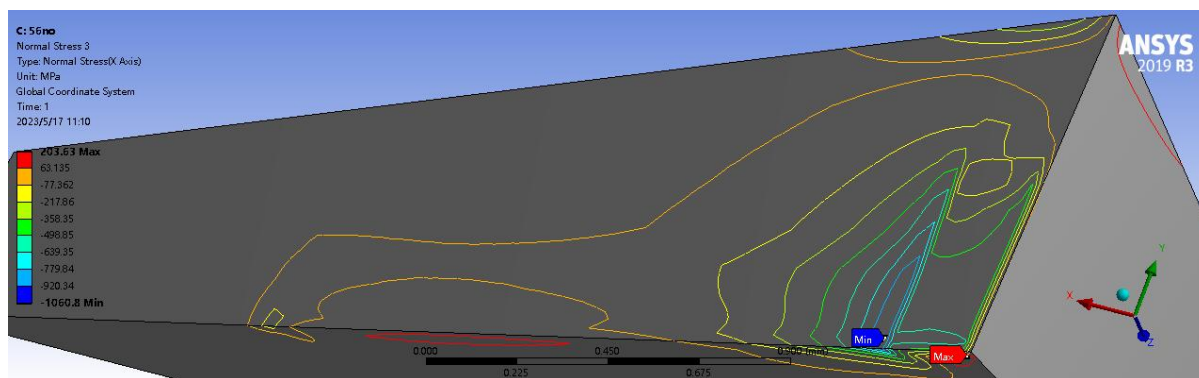


г

Рисунок 4.3.7 – Распределение общей внутренней деформации ϵ (мм) (а) и внутренних напряжений в режущем клине: б – эквивалентных $\sigma_{\text{КВ}}$ (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 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.



д

Рисунок 4.3.7. (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 зубой 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. 4.3.8) 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 [5].

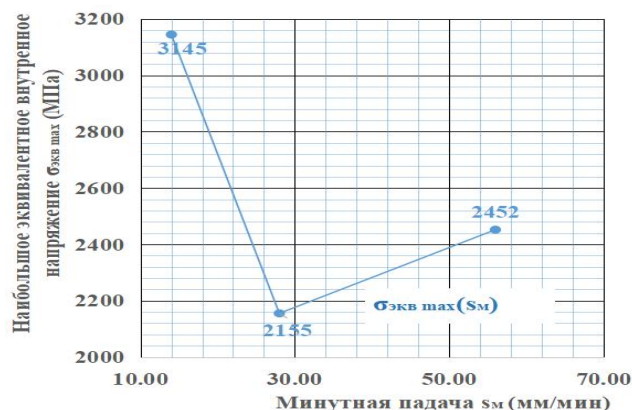


Рисунок 4.3.8. График влияния минутной подачи s_m (мм/мин) на наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$ (МПа), действующее в режущем клине при встречном фрезеровании 4-х зубой острой фрезой $d = 8$ мм, $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, образец №1 - твердый сплав

Также из-за увеличения контакта стружки s с передней поверхностью уменьшается максимальная общая деформация $\varepsilon_{\max}$ (рис. 4.3.9.), при этом $\varepsilon_{\max}$ приходится на пересечении главной и вспомогательной режущих кромок.

Поскольку подача в минуту небольшая, силы, действующие на главную режущую кромку небольшие, максимальное эквивалентное контактное напряжение располагается 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 $\varepsilon_{\max}$ 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

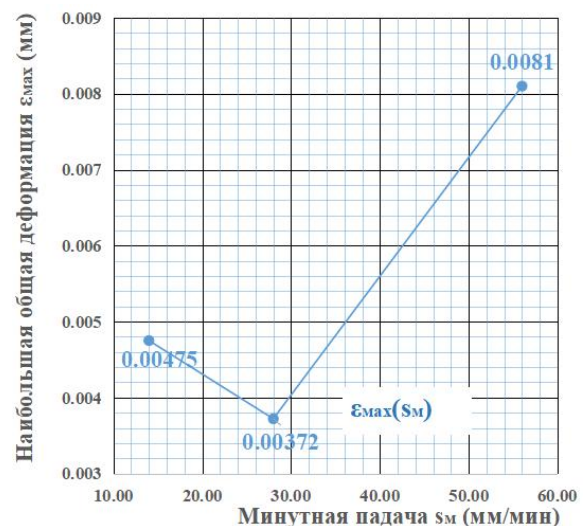


Рисунок 4.3.9– График влияния минутной подачи s_m (мм/мин) на величину наибольшей деформации $\varepsilon_{\max}$ в режущем клине при встречном фрезеровании 4-х зубой острой фрезой $d = 8$ мм, $t = 4$ мм, $B = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, образец №1-твердый сплав.

поверхности главной режущей кромки и в основном определяется напряжением вдоль оси фрезы σ_x .

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, при дальнейшем повороте зуба 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. Увеличение количества зубьев, находящихся в контакте (за счёт увеличения количества зубьев фрезы или при увеличении глубины или ширины фрезерования) приводит к исчезновению изменения направления поперечной силы, что уменьшает вибрацию при обработке.

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

5. 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 .

6. 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;

7. Как при попутном, так и при встречном фрезеровании острой фрезой осевая составляющая сила P_x на главной режущей кромке фрезы (или на кромках при нескольких зубьях в одновременном контакте) старается приподнять заготовку от стола. При увеличении толщины среза осевая сила P_x немного увеличивается.

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

9. При фрезеровании твердосплавной фрезой влияние износа по уголкам на силы намного выше, чем влияние износа по задней поверхности у главной режущей кромки на силы.

10. При фрезеровании изношенной фрезой силы P_h и P_v при фрезеровании изношенной фрезой больше, чем при обработке острой 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 главной режущей кромке;

11. Поскольку направление составляющей силы P_x на фаске износа по уголкам противоположно направлению составляющей силы P_x на главной 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.

12. 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.

13. При попутном фрезеровании с увеличением минутной подачи s_m увеличивается толщина среза и увеличиваются составляющие силы P_h , P_v и P_x , среди которых увеличение P_v происходит наиболее интенсивно.

14. При попутном фрезеровании с уменьшением ширины фрезерования B длина контакта режущей кромки с заготовкой уменьшается, составляющие силы P_h , P_v и P_x уменьшаются, среди которых уменьшение осевой силы P_x происходит более интенсивно, осевая сила P_x направлена вверх даже при маленькой ширине фрезерования B .

15. При попутном фрезеровании с увеличением скорости фрезерования (частоты вращения фрезы n) средняя температура резания увеличивается, что вызывает существенное уменьшение всех составляющих сил резания.

16. При попутном фрезеровании с увеличением глубины фрезерования t увеличиваются составляющие силы P_h , и P_v , а сила P_x наоборот уменьшается. Увеличение силы P_v происходит наиболее интенсивно.

17. По сравнению с фрезерованием твердым сплавом (ВК8), при

фрезеровании фрезой из быстрорежущей стали (Р6М5) не только составляющие силы фрезерования больше, но и вибрация фрезы больше, что приводит к снижению точности и повышению шероховатости обработанной поверхности.

18. 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.

19. 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.

20. С увеличением количества зубьев фрезы z силы при фрезеровании с постоянной минутной подачей уменьшаются, частота изменения сил увеличивается, а амплитуда изменения сил уменьшается.

21. С увеличением угла наклона винтовой канавки фрезы ω силы при фрезеровании увеличиваются, но силы изменяются более плавно.

22. С увеличением переднего угла γ на главной режущей кромке происходит уменьшение силы при фрезеровании. При отрицательном переднем угле силы быстро увеличиваются с увеличением отрицательного переднего угла; при положительном переднем угле силы медленно уменьшаются с увеличением положительного переднего угла.

23. 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.

24. При фрезеровании изношенной фрезой с износом по уголкам длиной $h_{з \text{ уг}} = 1,3$ 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. Нао Чиндан. Аддитивное производство против субтрактивного производства [Электронный ресурс] // Нао Чиндан. – Электрон. текстовые дан. – 2016. – режим доступа к журн.: <https://www.163.com/dy/article/BV8P1K5I05119N54.html>;
2. Технологическая сингулярность. Проблемы внедрения аддитивных технологий в производство. [Электронный ресурс]//Технологическая сингулярность. – Электрон. текстовые дан. – 2019. – режим доступа: <https://zen.yandex.ru/media/id/5c3dffb06d724700ab2e2525/problems-vnedreniia-additivnyh-tehnologii-v-proizvodstvo-5c3e2c68f2b20900a959893e>;
3. Алексей Чехович. 5 основных проблем 3D- печати и пути их решения [Электронный ресурс]//Дмитрий Трубащевский. – Электрон. текстовые дан. – Журнал об аддитивном производстве. 2019. – режим доступа к журн.: <https://www.solver.ru/publications/files/2-solver-provoloka-trend.pdf>;
4. Производственная компания Хуйбо. Фабрика 3D-печати решает многие сложные в производстве сложные конструкционные детали [Электронный ресурс] // Производственная компания Хуйбо. – Электрон. текстовые дан. – 2019. – режим доступа к журн.: <https://www.chuanjiaqi.com/news-3dsb/2019/0808/237.html>;
5. Liverani E., Fortunato A. Additive manufacturing of AISI 420 stainless steel: Process validation, defect analysis and mechanical characterization in different process and post-process conditions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 117(3-4): p. 809-821;

6. Grzesik W. Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: a review[J]. *Journal of Machine Engineering*, 2018, 18(4): p. 5-24;
7. Lopes J G, Machado C M, Duarte V R, et al. Effect of milling parameters on HSLA steel parts produced by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 59: p. 739-749;
8. Montevecchi, Filippo, et al. "Cutting forces analysis in additive manufactured AISI H13 alloy." *Procedia Cirp* 46 (2016): p. 476-479;
9. Gong, Yadong, and Pengfei Li. Analysis of tool wear performance and surface quality in post milling of additive manufactured 316L stainless steel." *Journal of Mechanical Science and Technology* 33 (2019): p. 2387-2395;
10. Arlyapov, Alexey, et al. "Study of the Machinability of an Inconel 625 Composite with Added NiTi-TiB2 Fabricated by Direct Laser Deposition." *Metals* 12.11 (2022): 1956;
11. Kazemipour M, Lunde J H, Salahi S, et al. On the microstructure and corrosion behavior of wire arc additively manufactured AISI 420 stainless steel[C]//TMS 2020 149th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings. Springer International Publishing, 2020: p.435-448;
12. 3D SCIENCE VALLEY,
Текущее состояние и международные стандарты металлической
3D-печати/аддитивного производства //3D SCIENCE VALLEY, Китай, 15
марта 2017.— Свободный доступ из сети Интернет. Режим
доступа: <http://www.3dsciencevalley.com/?p=8676>;
13. Наплавление проволокой как синтез сварки и аддитивной технологии /

Шэ Лу, Чжан Цинжун, Ци Мэнсюй, В. Н. Козлов; науч. рук. В. Н. Козлов // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов сборник докладов II Международной научно-практической конференции, Томск, 26-28 апреля 2022 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Школа базовой инженерной подготовки . — Томск : Изд-во ТПУ , 2022 . — [С. 661-666];

14. Концевые фрезы // Металлорежущие системы (МРС), 01 февраля 2017. — Изд-во МашиностроениеМеталлорежущее оборудование (МРС) и САПР.— Свободный доступ из сети Интернет. Режим доступа:<https://stanki-uchpu.ru/kontsevye-frezy/>

15. 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/>;

16. 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;

17. Козлов В. Н., Чжан Х., Петровский Е. Н. Построение эпюр контактных напряжений на передней поверхности инструмента при обработке стали / 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.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; ред. кол. Е. Н. Пашков [и др.] . — Томск : Томский политехнический университет , 2022 . — [С. 94-97] ;

18. Козлов В.Н., Дин Ц., Ли В. Исследование распределения контактных напряжений на передней поверхности инструмента при обработке стали / В. Н. Козлов, Ц. Дин, В. Ли // Современные проблемы машиностроения сборник трудов XV Международной научно-технической конференции, г. Томск, 22-25 ноября 2022 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; ред. кол. Е. Н. Пашков [и др.] . — Томск : Томский политехнический университет , 2022 . — [С. 98-101];

19. Хэ Л., Ян А., Козлов В.Н. Влияние переднего угла и толщины среза на распределение контактных напряжений при обработке стали / Хэ Лин, Ян Анькан, Козлов В.Н.; науч. рук. В.Н. Козлов // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов сборник докладов II Международной научно-практической конференции, Томск, 26-28 апреля 2022 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Школа базовой инженерной подготовки . — Томск : Изд-во ТПУ , 2022 . — [С. 618-623];

20. Петровский Е.Н., Шэ Л., Чжан Ц., Козлов В.Н. Особенности фрезерования образцов после аддитивного синтеза / Е.Н. Петровский, Л. Шэ, Ц. Чжан, В.Н. Козлов // Современные проблемы машиностроения сборник

трудов XV Международной научно-технической конференции, г. Томск, 22-25 ноября 2022 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; ред. кол. Е. Н. Пашков [и др.] . — Томск : Томский политехнический университет , 2022 . — [С. 102-104];

21. Kozlov V., Gerasimov A., and Kim A. Distribution of contact loads over the flank-land of the cutter with a rounded cutting edge. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 124. No. 1. IOP Publishing, 2016.

22. Хэ Л., Ян А., Козлов В.Н. Анализ напряжённо-деформированного состояния режущего клина при обработке стали / Хэ Лин, Ян Анькан, В.Н. Козлов; науч. рук. В. Н. Козлов // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов сборник докладов II Международной научно-практической конференции, Томск, 26-28 апреля 2022 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Школа базовой инженерной подготовки . — Томск : Изд-во ТПУ , 2022 . — [С. 611-617].

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

Студенту:

Группа	ФИО
4АМ11	Чжан Цинжун

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	Машиностроение
Уровень образования	Магистратура	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	12.03.2023
---	-------------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гасанов М. А.	д.э.н.		14.03.2023

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ11	Чжан Цинжун		14.03.2023

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

5.1.1 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 5.1.1 – 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:

$$K = \sum B_i \cdot B_i = 0,1 \cdot 3 = 0,3, \quad (5.1)$$

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.

5.1.2 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 5.1.2.

Таблица 5.1.2 – Матрица SWOT

Сильные 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.	Слабые стороны 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 5.1.3 - 5.1.6.

Таблица 5.1.3 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и сильные стороны»

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

Таблица 5.1.4 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	B1	-	+	+	-	-
	B2	-	-	-	-	-
	B3	-	-	-	-	-
	B4	-	-	-	-	-
	B5	-	-	-	-	-

Таблица 5.1.5 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и сильные стороны»

Сильные стороны проекта						
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	У1	-	-	-	+	-
	У2	-	-	+	-	-
	У3	-	-	-	-	+
	У4	+	-	-	-	-
	У5	-	-	-	-	+

Таблица 5.1.6 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта						
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	У1	+	-	-	-	-
	У2	-	-	-	+	-
	У3	-	+	-	-	-
	У4	+	-	-	-	-
	У5	-	-	-	-	+

Результаты выполнения SWOT-анализа представлены в таблице 5.1.7.

Таблица 5.1.7 – Результаты SWOT-анализа

Сильные 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.		Слабые стороны 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.	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.

Таблица 5.1.7 (продолжение) – Результаты SWOT-анализа

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.	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 персонал даёт возможность преодолеть проблемы с возможным отсутствием правила использования программы ANSYS.	Уязвимости: У2Сл4. Появление зарубежных аналогов и более ранний их выход на рынок угрожает полученным результатам исследования за счёт их погрешности и неопределённости в некоторых случаях. У4Сл1 Возникновение новых технологических производств, например технология 3D печати может заменить традиционную 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

5.2.1 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 5.2.1:

Таблица 5.2.1 – 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 полученных результатов.	инженер, научный руководитель
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	10	Составление пояснительной записки.	инженер

5.2.2 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:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (5.2.1)$$

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:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожи}}{Ч_i}, \quad (5.2.2)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, рабочие дни; $t_{ожи}$ – 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 (4.3):

$$T_{ки.лнж} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (5.2.3)$$

где $T_{ки}$ – 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:

$$k = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{праз}} = \frac{365}{365 - 89 - 29} = 1,48 \quad (5.2.4)$$

где $T_{кал}$ – общее количество календарных дней в году; $T_{вых}$ – общее количество выходных дней в году; $T_{праз}$ – общее количество праздничных дней в году (2023 год).

Расчеты временных показателей проведения научного исследования обобщены в таблице 5.2.2.

Таблица 5.2.2 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						T_{pi} Длительность работ в рабочих днях	T_{ki} Длительность работ в календарных днях
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$T_{ож}$, 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 тем 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

Таблица 5.2.2 (продолжение)– Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						T_{pi} Длительность работ в рабочих днях	T_{ki} Длительность работ в календарных 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
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 5.2.3).

Таблица 5.2.3 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп	$T_{\text{кз}}$, кал. дн.	Продолжительность работ											
				февр			март			апр			май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение темы 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, построить эпюры контактных напряжений и рассчитать их параметры.	Исп2	18												
6	Исследование НДС фрез с помощью программы ANSYS.	Исп1 Исп2	63												
7	Проведение компьютерного эксперимента.	Исп2	9												
8	Обработка полученных данных.	Исп2	14												
9	Оценка правильности полученных результатов.	Исп1 Исп2	10												
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.

5.3.1 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 40Х13).

В результате экспериментов было установлено влияние толщины среза а 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 40Х13; 5) Державка токарная с набором твёрдосплавных фрез с разными передними углами; 6) Резец с напайкой

режущей пластиной (материал BK8); 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 5.3.1.

Таблица 5.3.1 – 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 BK8)	1290	2	2580
Фрез с разными передними углами (материал BK8)	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

5.3.2 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:

$$H_A = \frac{1}{n} \quad (5.3.1)$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot t \quad (5.3.2)$$

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

Таблица 5.3.2– 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 5.3.2):

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

5.3.3 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 $Z_{осн}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p \quad (5.3.3)$$

где $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (Таблица 4.9).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \times M}{F_d} \quad (5.3.4)$$

где Z_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:

$$Z_m = Z_{мс} \times (1 + K_{пр} + K_d) K_p = 28600 \times (1 + 0,3 + 0,2) \times 1,3 =$$

$$= 55770 \text{ руб.} \quad (5.3.5)$$

– для инженера:

$$\begin{aligned} Z_m &= Z_{mc} \times (1 + K_{пр} + K_d) K_p = 11280 \times (1 + 0,3 + 0,2) \times 1,3 = \\ &= 21996 \text{ руб.} \end{aligned} \quad (5.3.6)$$

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

Таблица 5.3.3 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{mc}, \text{руб}$	$k_{пр}$	k_d	k_p	$Z_m, \text{руб}$	$Z_{дн}, \text{руб}$	$T_p, \text{раб.дн.}$	$Z_{осн}, \text{руб}$
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:

$$Z_{бон} = K_{бон} \times Z_{осн} = 0,15 \times 77179,2 = 11576,8 \text{ руб.} \quad (5.3.7)$$

– для инженера:

$$Z_{бон} = K_{бон} \times Z_{осн} = 0,15 \times 157971,3 = 23695,7 \text{ руб.} \quad (5.3.8)$$

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

5.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Для руководителя:

$$Z_{внеб} = K_{внеб} (Z_{осн} + Z_{бон}) = 0,3 \times (77179,2 + 11576,8) = 26626,8 \text{ руб.} \quad (5.3.9)$$

Для инженера:

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

(5.3.10)

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).

5.3.5 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 4.13:

$$З_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) K_{нр} \quad (5.3.11)$$

Где:

$K_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,16.

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

5.3.6. Бюджетная стоимость НИР

Группировка затрат по статьям представляется в таблице 5.3.4:

Таблица 5.3.4 –Группировка затрат по статьям

Статья						
1	2	3	4	5	6	7
Материалы, руб.	Амортизация, руб.	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Отчисления на социальные 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-субтрактивной обработке образцов из стали 40X13 » по форме, приведенной в таблице 5.3.5. В таблице также представлено определение бюджета затрат двух конкурирующих научно-исследовательских проектов.

Таблица 5.3.5 – 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 исполнителей темы	35272,6	145737,42	44515,54
5	Отчисления во 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:

$$I_{финр}^{Ана.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} \quad (5.3.12)$$

Где

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

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

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения.

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

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

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

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 4.4.1).

Таблица 5.4.1 – Сравнительная оценка характеристик всех вариантов

Критерии / Объекты исследования	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1. Безопасность при использовании установки	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:

$$I_{Тек.пр.} = 4,85;$$

$$I_{аналог1} = 4,45;$$

$$I_{аналог2} = 4,05.$$

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

$$I_{Ана.і} = \frac{I_{pi}}{I_{финр}^{Ана.і}} \quad (5.3.13)$$

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

$$I_{Ана.1} = \frac{4,45}{1} = 4,45$$

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

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 5.4.2).

Таблица 5.4.2 – 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.

Выводы по разделу

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.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа		ФИО	
4AM11		Чжан Цинжун	
Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	Машиностроение
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	15.04.01 Машиностроение

Тема ВКР:

Исследование аддитивно-субтрактивной обработки при фрезеровании 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 аддитивно-субтрактивной обработки при фрезеровании образцов из стали 40X13. Область применения: машиностроение, заводская обработка. Рабочая зона: лаборатория. Размеры помещения: 56 м². Количество и наименование оборудования рабочей зоны: компьютер, фрезерный станок с ЧПУ, динамометр. Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне: установите динамометр, проведение экспериментов по обработке и сбор данных, отойдите 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 при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	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. Общие эргономические требования. 3. ГОСТ 22269–76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования. 4. Федеральный закон от 28 декабря 2013 г. N 426-ФЗ "О специальной оценке условий труда. 5. ПНД Ф 12.13.1–03 Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения);
2. Производственная безопасность при разработке проектного решения: – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов	Опасные факторы: 1. Повышенная температура поверхностей 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; Вредные факторы: 1. Отклонение показателей микроклимата; 2. Превышение уровня шума; 3. Недостаточная освещенность рабочей зоны; 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 ситуацияхпри эксплуатации.	Возможные ЧС: Природные катастрофы (сильные морозы зимой.); Техногенные воздействия (шпионаж, диверсия); Наиболее типичная ЧС: Пожар.
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
12.03.2023	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н.		14.03.2023

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ11	Чжан Цинжун		14.03.2023

6. Социальная ответственность

Введение

При выполнении работы большая часть времени проводилась в 16а корпусе ТПУ. В лаборатории № 101 проводилось исследование аддитивно-субстративной обработки при фрезеровании образцов из стали 40X13.

В результате экспериментов было установлено влияние толщины среза а на силы на передней поверхности режущего клина и изменение составляющих сил при фрезеровании с учётом выбранного переднего угол.Используемое оборудование и материалы имеют следующие виды: 1) фрезерный станок с ЧПУ. 2) динамометр фирмы Kistler (Швеция) с интерфейсом для подключения к персональному компьютеру. 3) Микроскоп БМИ-1. 4) Металлические печатные образцы из стали 40X13. 5) Фрезы с разным количеством зубьев и разным диаметром.

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 щетку.

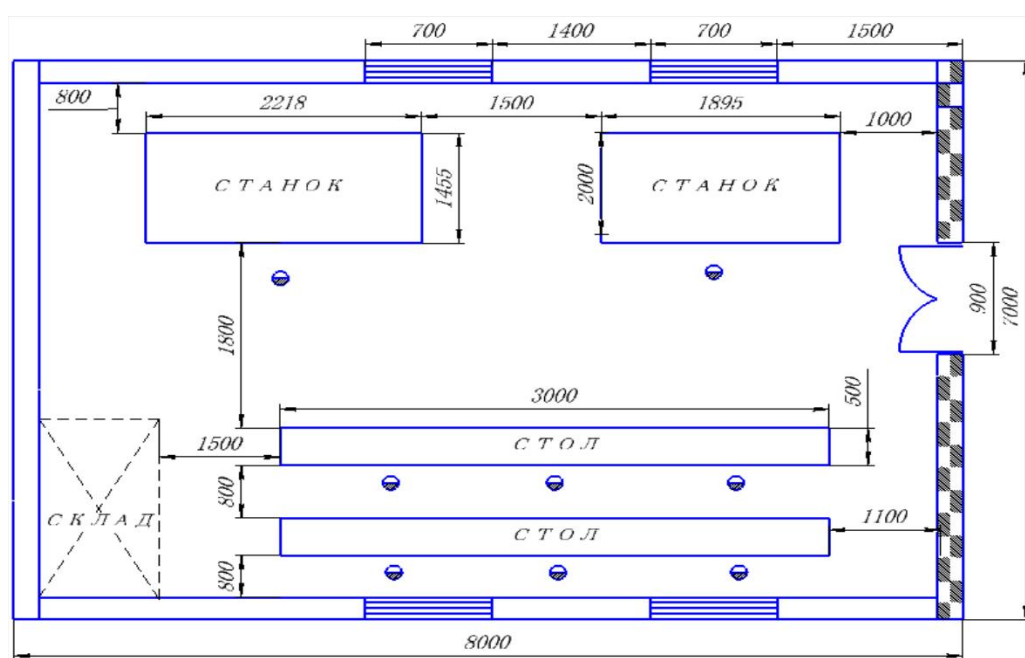


Рис. 6.1.1 – Рабочее место (Аудитория 101 в 16а корпусе)

● 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.2)

● **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 состоит 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, мои 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

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.

6.2.1 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, воздухопроводов 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 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 обрабатываемая 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 обрабатывающую 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.

6.2.2 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, м^2 ;

K_z – 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),

$N_{\text{л}}$ – 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 $R_c=50\%$, потолка $R_n=70\%$.

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).

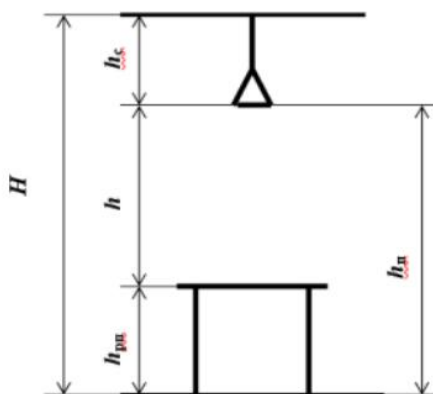


Рисунок 6.2.1 – Основные расчетные параметры

Принимаем $\lambda=1,4$, расстояние светильников от перекрытия (свес) $h_c = 0,5$ 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:

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

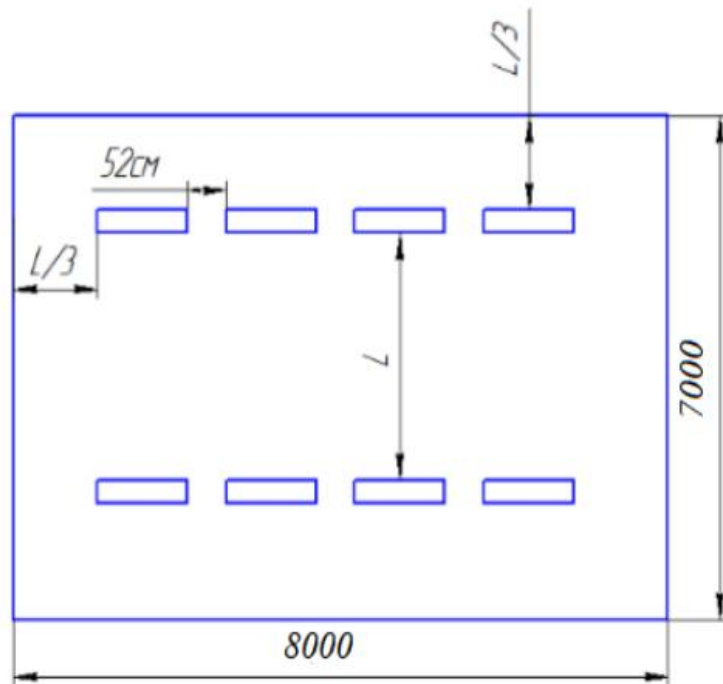


Рисунок 6.2.2 – Схема расположения светильников производственном помещении

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

Потребный световой поток люминесцентной лампы светильника определяется по формуле:

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

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 фрезерования 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

Чрезвычайные 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.

6.4.1 Наиболее типичной ЧС в 1-ом этаже корпуса 16А, ТПУТПУ 16а

- 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.

6.4.2 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.Vodokanal:

- 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>

6.4.3 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

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.

Приложение – Раздел на иностранном языке

(справочное)

Changes in cutting force during plunging and climb and up milling analysis

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4AM11	Чжан Цинжун		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	Гутарева Н. Ю.	к.п.н.		14.03.2023

Introduction

Abstract: The paper presents the results of an experimental study of changes in the components of the cutting force over time during conventional (down-milling) and up-milling with sharp and worn end mills and the results of an experimental study of the influence of milling modes and milling characteristics on milling forces.

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

1 Changes in cutting force during plunging

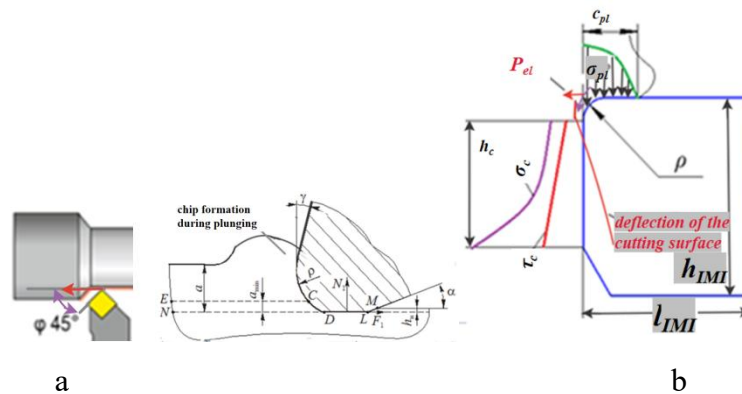


Figure 1.1 - Plunging the cutting edge of the cutter immediately along its entire length with oblique cutting (a) and the model of loading the cutting wedge with contact stresses during plunging (b).

The milling process is a process in which the teeth of the cutter constantly cut into and out of contact with the workpiece [1. p. 215]. Since the insertion of a cutter tooth is similar to the insertion of a cutter into a conical surface left over from the previous cutting, it is possible to analyze the change in cutting forces during insertion of the cutting edge of the cutter immediately along its entire length in order to understand the patterns of change in forces during insertion of the cutting edge of its tooth.

When the cutter plunges into the conical surface remaining from the previous processing (Fig. 4.1.1. a), the workpiece material is pressed under the cutting edge due to the rounding of the cutting edge with a radius of $\rho = 0.001 \dots 0.005$ mm, even for a new unworn cutter. The value of this radius depends on the size of the grains of the hard alloy, the front and back angles. Attempts to sharpen and then grind the front and back surfaces to reduce the radius ρ lead to chipping of the cutting edge at the first touch of the workpiece.

The value of the specific normal contact loads on the front surface q_{Nr} (MPa) (Fig. 1.1. b) near the cutting edge during plunging is greater than during steady cutting. Because at this time, the chip is not yet fully formed and does not move along the front surface, then the specific tangential contact loads on the front surface and its radius section can be taken equal to zero, that is $q_{Fr}=0$ MPa, and the specific normal contact loads in this section of the cutting edge near the front surface can be calculated by the formula $q_{Nr}=N_{pl}/(c_{pl} \cdot b)$, where N_{pl} is the load acting on the front surface during plunging, c_{pl} is the contact length of the formed chip with the radius section and the front surface at the cutting edge, b is the width of the cutting edge in contact with the chip. According to experiments with a cutting edge rounding radius

$\rho=0.003$ mm, the contact length c_{pl} , corresponding to the maximum force during plunging, is calculated by the equation $c_{cont} \approx \rho + 0.1 \cdot a$, where a is the cut thickness (mm).

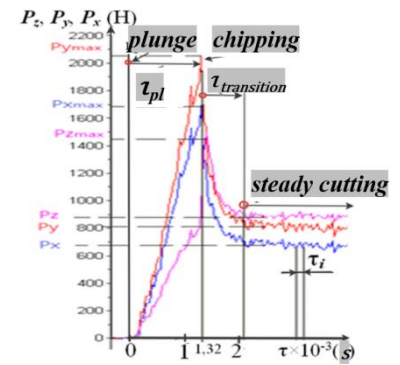


Figure 1.2 - Change in the components of the cutting force (N) during plunging. Steel 40X - T15K6. $s = 0.07$ mm/rev, $v = 120$ m/min, $t = 1.8$ mm

When plunging with a cutter worn on the back surface, a chamfer on the back surface comes into contact with the workpiece and it is pressed in like a stamp. The friction force on the chamfer at this time is first determined by the coefficient of external friction $f_{c\,pl} = F_{c\,pl} / N_{c\,pl}$, but after heating the contact point, the onset of adhesion and plastic deformation of the layers of the processed material adjacent to the chamfer, “internal” friction begins.

These processes lead to a greater increase in the components P_x and P_y as the pressure force $N_{c\,pl} = P_{xy\,pl} = (P_{x\,pl}^2 + P_{y\,pl}^2)^{1/2}$ of the chamfer on the cutting surface compared to the component P_z , which during plunging is the friction force on the chamfer $F_{c\,pl}$ (Fig. 1.2.).

Because part of the material being machined rests against the radius section of the front surface, then a radial force $P_{xy\,p}$ arises in this section, which leads to deflection of the cutting surface (uncut surface) (see Fig. 1.1. b).

After reaching the maximum volume of indentation of the workpiece material under the cutting edge, chips appear on the front surface. The workpiece material is already pressed under the cutting edge to a much lesser extent and mainly moves along the front surface in the form of chips. Reducing the indentation of the material under the cutting edge leads to an intensive decrease in

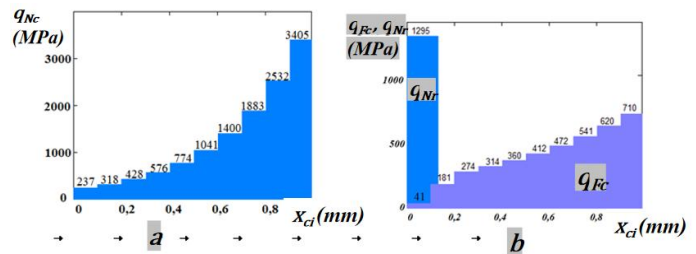


Figure 1.3 - Distribution (histograms) of normal q_{Nc} (a) and tangential q_{Fc} (b) contact loads (MPa) on the chamfer of the rear surface and the value of specific normal contact loads on the front surface q_{Nr} (b) (MPa) near the cutting edge at plunging. Steel 40X - T15K6. $s=0.07$ mm/rev, $v=120$ m / min, $t=1.8$ mm. Abscissa - distance from the cutting edge along the wear chamfer on the flank surface x_{ci} (mm).

the pressure force from the cutting surface to the wear chamfer along the rear surface N_{cpl} , as well as the friction force on the chamfer $F_{cpl} = P_{zpl}$ (see Fig. 1.2).

The deflection of the cutting surface during plunging leads to the fact that on the wear chamfer along the rear surface near the cutting edge, its elastic recovery is less than when moving away from it, therefore, the nature of the diagrams σ_{cpl} and τ_{cpl} are the same, because the farther from the cutting edge, the greater the amount of recovery of the bent cutting surface, therefore, the contact stresses (τ_c , σ_c) will also be greater (see Fig. 1.3. a).

During plunging (see Fig. 1.3. a) and with steady cutting (see fig. 1.3. b), the nature of the contact stress diagrams on the wear chamfer is the same, but their value during plunging is greater (see Fig. 1.3 a).

From fig. 4.1.2. It can also be seen that when cutting in, the force sharply increases by a factor of 2 compared to steady-state cutting, which increases the likelihood of cutting edge destruction during cutting.

2 Climb and up milling analysis

● Milling time per tooth

Before analyzing the milling process, it is necessary to determine the milling time of the tooth and thereby determine the research interval on the force-time graph obtained using the Kistler dynamometer during the experiment.

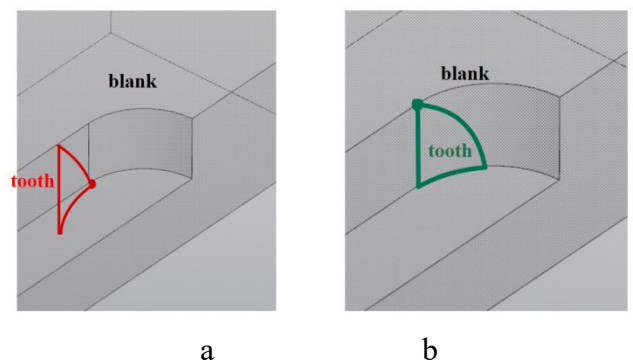


Figure 2.1 - Scheme of contact of the cutter tooth with the workpiece before full penetration (a) and after full penetration (b)

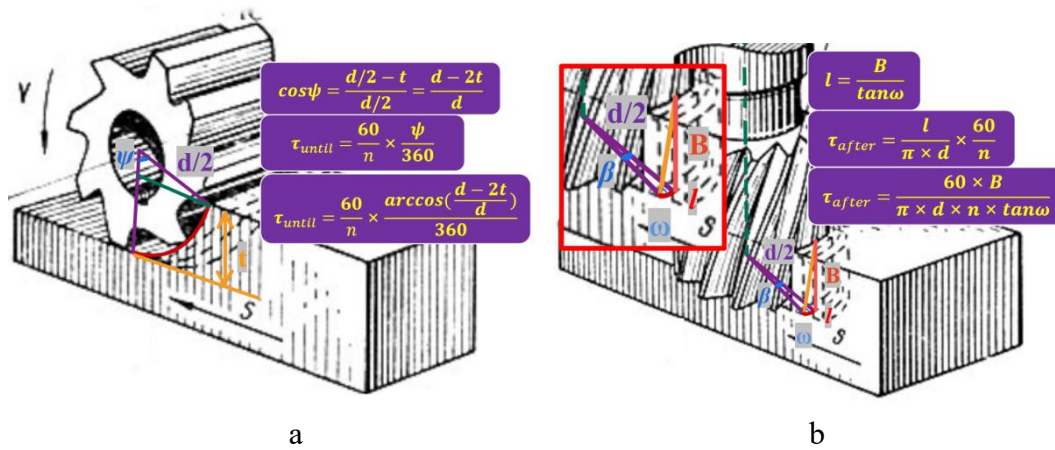


Figure 2.2 - Scheme for calculating the contact time of the cutter tooth with the workpiece

The contact time between the teeth and the workpiece can be divided into two parts: the part until the cutter tooth is completely embedded in the workpiece; part after cutting the cutter tooth into the workpiece. In this case, it is necessary to take into account the angle of inclination of the helical flute ω and the milling width B (see Fig. 2.2.).

The time of contact of the cutter tooth with the workpiece until full penetration:

$$\tau_{\text{until}} = \frac{60 \times B}{\pi \times d \times n \times \tan\omega};$$

Time of contact of the cutter tooth with the workpiece after full penetration:

$$\tau_{\text{after}} = \frac{\arccos(\frac{d-2t}{d})}{60 \cdot n}.$$

where B is the milling width, ω is the helical flute angle, d is the cutter diameter, n is the rotational speed, t is the milling depth.

Therefore, the time of milling one tooth:

$$\tau = \tau_{\text{until}} + \tau_{\text{after}} = \frac{60 \times B}{\pi \times d \times n \times \tan\omega} + \frac{\arccos(\frac{d-2t}{d})}{60 \cdot n}. \text{ (s)}$$

But since the contact time of the cutter tooth with the workpiece until full penetration is very short, when analyzing the milling process, the helix angle ω can

be neglected. Therefore, the time of milling one tooth:

$$\tau = \frac{\arccos(\frac{d-2t}{d})}{60 \cdot n} \text{ (s)}.$$

However, usually the ratio of the time of rotation of the cutter per revolution to the number of teeth is expressed as the contact time of the cutter tooth with the workpiece:

$$\tau = \frac{60/n}{\text{Number of teeth}}.$$

Working time of one tooth at $t=d/2$ and four-tooth cutter $\tau_{1\text{tooth}} = 60/(4 \cdot n)$ (s).

● Up milling process

When a tooth cuts into a workpiece (see Fig. 2.3., the range between numbers 1 and 2), the cutter tooth with its rounded cutting edge pushes the workpiece away from the cutter rotation axis, that is there is a component force $P_{v_{pl}}$ with a negative sign. At the same time, the component force P_h of the cut acts with a positive sign, that is the cutter tooth pushes the workpiece in the opposite direction to the counter feed s_m (see Fig. 2.4.).

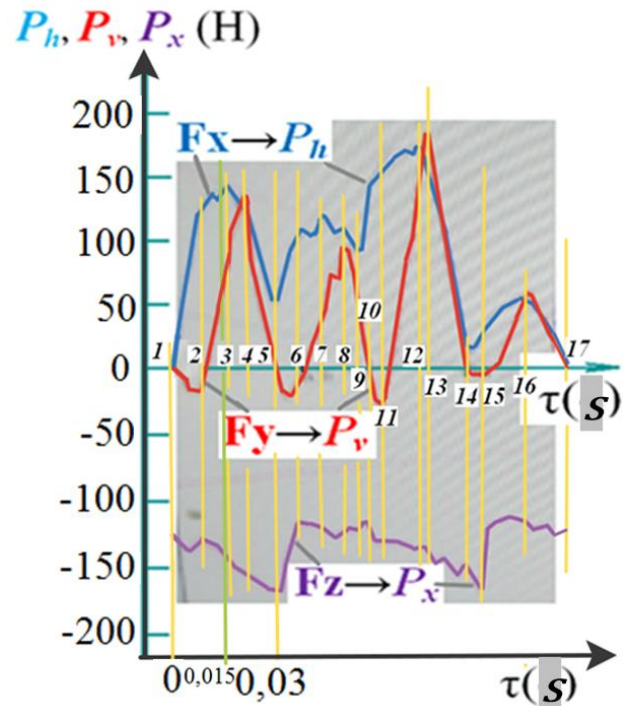


Figure 2.3 - Graphs of force changes during milling when turning a sharp cutter for one revolution. Up milling with a 4-tooth cutter $d=\varnothing 8$ mm, $t=3.8$ mm, $B=2$ mm, $n=500$ rpm, $s_m=28$ mm/min, sample No. 1 – cemented carbide

With further rotation of the tooth (see Fig. 2.3, the range between numbers 2 and 3), the force P_v acts already in the direction of the OY axis, , that is the tooth of

the cutter pulls the workpiece to the axis of rotation of the cutter due to the positive main rake angle γ (Fig. 2.4.). The component force P_h continuously increases as the cutter tooth

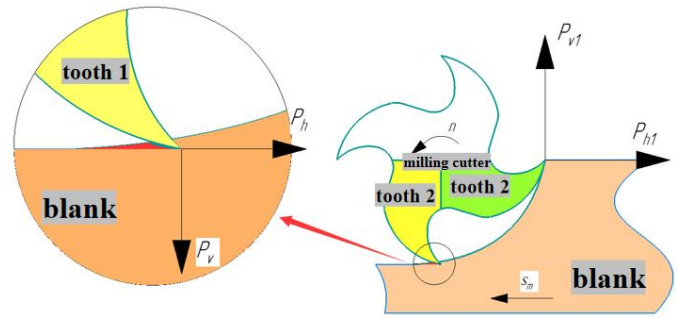


Figure 2.4 - The components of the forces acting on the part during up-cut milling when plunging with a sharp cutter

rotates, because the slice thickness increases $a_i = s_z \cdot \sin \psi_i$ (see Fig. 2.3., range between numbers 2 and 3).

As the cutter tooth rotates through an angle ψ , not only the cut thickness a increases, but the direction of the components P_z and P_y of the cutting force also changes (see Fig. 2.5). With an increase in the thickness of the cut a , the force P_z increases more

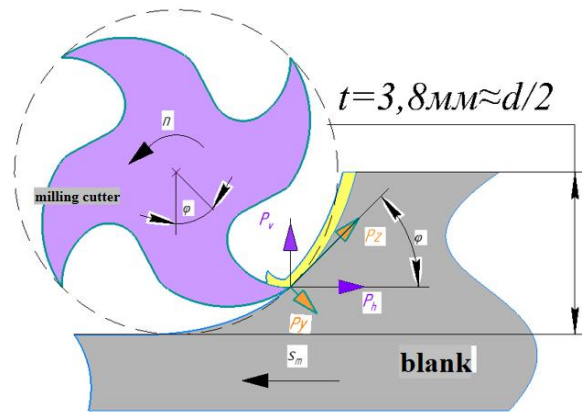


Figure 2.5 - Force components (P_y , P_z) obtained after decomposition of the milling force (P_h , P_v) into the direction towards the cutter axis and tangential, that is tangent to direction of cutter rotation

intensively than the force P_y , because this component is "responsible" for cutting the chips. The force P_y with an increase in the thickness of the cut should practically not change with a sharp cutting wedge due to the low friction coefficient on the front surface of the cutter tooth. A change in the direction of action of the forces P_z and P_y when the cutter is rotated through an angle ψ leads to the fact that the P_v component increases, and the P_h component, on the contrary, begins to decrease (see Fig. 2.3., the range between numbers 3 and 4).

Further rotation of the cutter leads to a decrease in the thickness of the cut a_i , during the period when the tooth leaves contact with the workpiece, which causes a decrease in the components P_z and P_y , and hence the components P_h and P_v (see Fig. 2.3, the range between numbers 4 and 5). The decrease in these components in this case does not occur as quickly as the decrease in the thickness of the cut at the end of the cut with a tooth, because elastic deformation of the machine - fixture - tool - part system does not allow this to be done as sharply as theoretically expected. We believe that with an increase in the rigidity of the machine - fixture - tool - part system, and above all with an increase in the rigidity of the end mill as the most non-rigid element, there will be a faster decrease in forces at the end of the cutter tooth.

The axial component P_x changes slightly during the entire cycle (see Fig. 2.3, the range between numbers 1 and 5), because on the end part, three teeth are almost immediately in contact with the workpiece with a four-tooth cutter and a milling depth of $t \approx d/2$. With a decrease in the milling depth $t < 0.2 \cdot d$, that is if the milling depth t is less than the depth of the chip groove of the cutter H , only one tooth will be in constant contact with the workpiece. This will cause greater changes in the value of the P_x component when the cutter is rotated.

The negative value of the sign of the force P_x ($P_x = -120 \dots -170$ N) indicates the desire of the cutter to lift the workpiece, which is associated with a positive angle of inclination of the teeth of the cutter $\omega = 40^\circ$.

The increase in force P_x in the negative direction in the range of numbers 2-5 (see Fig. 2.3) is associated with an increase in the thickness of the cut when turning

the cutter, and a decrease in the range of numbers 5-6 is associated with a decrease in the thickness of the cut at the end of the cycle of cutting the allowance under consideration tooth.

As the cutter turns further, the next cutter tooth begins to cut into the workpiece, so the cycle of changing the force components is repeated (see Fig. 2.3, range between numbers 5 and 9).

● Climb milling process

When a tooth cuts into a workpiece (see Fig. 2.6., the range between numbers 1 and 2), the cut thickness quickly increases to the maximum value a_{max} , so the component force P_h quickly increases to maximum value, and P_v also rapidly increases in the negative direction of the OY axis of the dynamometer.

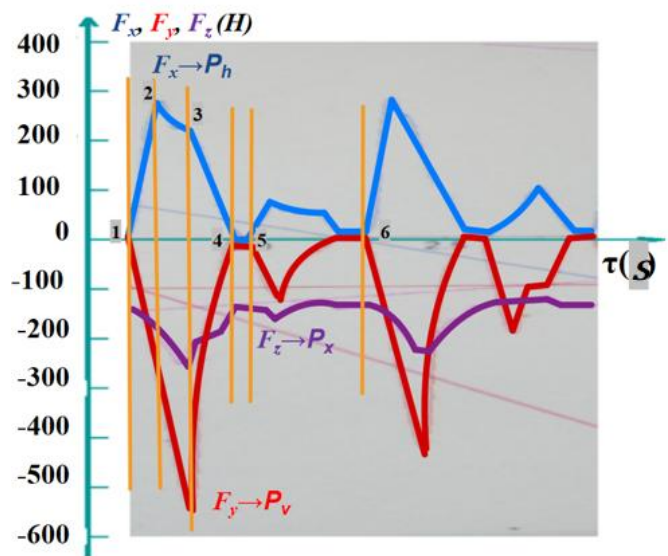


Figure 2.6 - Graphs of force changes during milling when turning a sharp cutter for one revolution. Climb milling with a 4-tooth cutter $d=\varnothing 8$ mm, $t=4$ mm, $B=2$ mm, $n=500$ rpm, $s_m=104$ mm/min, sample No. 1 - carbide

Since the feed $s_m = 104$ mm / min is very large, that is uncut thickness a is large, then the force P_y is in the radial direction to the cutter axis, that is the normal load acting on the back surface of the tooth cannot be neglected. Under the action of P_y and P_z , the P_v component continues to increase, while the P_h component, on the contrary, begins to decrease (see Fig. 2.6., the range between numbers 2 and 3).

Further rotation of the cutter leads to a further decrease in the uncut chip

thickness a , which causes a decrease in the components P_z and P_y , and hence the components P_h and P_v (see Fig. 2.6., the range between numbers 3 and 4).

Due to the elastic deformation of the machine - fixture - tool - part system under the action of the P_v force, the cutter is repelled from the machined surface, due to which the depth of cut does not reach the specified value, and, in turn, this leads to a reduction in the milling time with one tooth of the workpiece. In fig. 2.6 in the range between numbers 4 and 5 the forces are equal to zero.

Just like the change in P_x in up-and-down milling, P_x in climb milling fluctuates up and down depending on the change in uncut chip thickness a , and these changes are small. The negative value of the sign of the force P_x indicates the desire of the cutter to lift the workpiece, which is associated with a positive angle of inclination of the teeth of the cutter $\omega=40^\circ$.

As the cutter turns further, the next cutter tooth begins to cut into (plunging) the workpiece, so the cycle of changing the force components is repeated (see Fig. 2.6, the range between numbers 5 and 6). However, due to the elastic deformation of the technological system and the small radial run out of the teeth, the maximum force of each cycle is not the same.

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. In counter milling with a sharp cutter, when only one tooth is in contact with the workpiece, the transverse force P_v changes its sign: when plunging, the

tooth first pushes the workpiece away from the cutter axis, but after the appearance of chips, the cutter tooth pulls the workpiece towards the cutter, which leads to the attraction of the workpiece to cutter axis. A change in the direction of the force P_z acting on the workpiece from the cutter tooth in the tangential direction leads to an even greater increase in the attraction of the workpiece to the cutter axis. A change in the sign of the transverse force P_v , even with its small value, leads to vibration, especially if there is a gap (backlash) in the screw pair table nut - transverse feed screw.

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.