

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 15.04.01 Машиностроение
 Отделение школы (НОЦ) Отделение машиностроения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование прочности сменных многогранных пластин при фрезеровании титановых сплавов

УДК 539.4:621.914.2:669.295.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ01	Даурембеков Асылбек Муратович		04.06.22

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМШ ИШНПТ	Козлов Виктор Николаевич	к.т.н., доцент		04.06.22

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН	Гасанов Магеррам Али Оглы	д.э.н.		04.06.22

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н.		04.06.22

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Автоматизация технологических процессов и производств в машиностроении	Мартюшев Н.В.	к.т.н.		04.06.22

Министерство образования и науки 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»
Отделение машиностроения

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
_____ Мартюшев Н.В.
«__» _____ 2022 г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
4АМ01	Даурембеков Асылбек Муратович

Тема работы:

Исследование прочности сменных многогранных пластин при фрезеровании титановых сплавов	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	от 24.02.2022 №55-45/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	04.06.2022
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Обзор и анализ научно-технической литературы по теме ВКР. Объектом исследования является сменная многогранная пластина из ВК8. Материал обработки титановый сплав ВТЗ-1. Требование: исследовать влияния геометрических параметров фрез и их СМП, износа и режима резания на прочность СМП при черновой обработке титановых сплавов
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <small>заклучение по работе).</small>	1. Литературный обзор. 2. Исследовательская часть. Исследование фрезерования титанового сплава концевой однозубой фрезой. Измерение составляющих силы резания при моделировании износа резца по задней поверхности при обработке титанового сплава и стали. Распределение контактных напряжений на искусственной

	<p>фаске износа по задней поверхности инструмента при обработке титанового сплава. Исследование влияния толщины среза, длина контакта стружки с передней поверхностью и длины фаски износа по задней поверхности на НДС режущего клина.</p> <p>3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.</p> <p>4. Социальная ответственность.</p> <p>Заключение и выводы.</p>
Перечень графического материала	Слайды по литературному обзору, графики влияния толщины среза и переднего угла на длину контакта стружки, эпюры контактных напряжений на передней и задней поверхностях, влияние заднего угла и толщины среза на картины НДС режущих пластин при обработке титанового сплава ВТЗ-1.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Исследовательский	Козлов Виктор Николаевич
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Гасанов Магеррам Али Оглы
Социальная ответственность	Антоневич Ольга Алексеевна
Обязательное приложение на английском языке	Сыскина Анна Александровна

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Исследование влияния геометрических параметров фрез и их пластин, износа и режима резания на прочность пластин при черновой обработке титановых сплавов
 Investigation of the influence of geometric parameters of milling cutters and their inserts, wear and cutting mode on the strength of inserts during roughing of titanium alloys

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	25.12.2020
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения материаловедения ИШНПТ	Козлов В.Н.	к.т.н., доцент		25.12.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ01	Даурембеков А.М		25.12.2020

Код компетенции СУОС	Наименование компетенции СУОС
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способность осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий
УК(У)-2	Способность управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла, получать и обрабатывать информацию из различных источников с использованием современных информационных технологий, применять прикладные программные средства при решении практических вопросов с использованием персональных компьютеров с применением программных средств общего и специального назначения в том числе в режиме удаленного доступа
УК(У)-3	Способность организовать и руководить работой команды, выработать командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способность применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия (-ий), анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-5	Способность на научной основе организовывать свой труд, самостоятельно оценивать результаты своей деятельности, владеть навыками самостоятельной работы в сфере проведения научных исследований, создавать и редактировать тексты профессионального назначения
УК(У)-6	Способность определить и реализовать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки, а также использовать приемы первой помощи, методы защиты в условиях чрезвычайных ситуаций
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способность формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки
ОПК(У)-2	Способность применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
ОПК(У)-3	Способность использовать иностранный язык в профессиональной сфере
ОПК(У)-4	Способность осуществлять экспертизу технической документации
ОПК(У)-5	Способность 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, по разработке проектов стандартов и сертификатов, обеспечивать адаптацию современных версий систем управления качеством к конкретным условиям производства на основе международных стандартов

ОПК(У)-6	Способность к работе в многонациональных коллективах, в том числе при работе над междисциплинарными и инновационными
ОПК(У)-7	Способность обеспечивать защиту и оценку стоимости объектов интеллектуальной деятельности
ОПК(У)-8	Способность проводить маркетинговые исследования и подготавливать бизнес-планы выпуска и реализации перспективных и конкурентоспособных изделий в области машиностроения
ОПК(У)-9	Способность обеспечивать управление программами освоения новой продукции и технологий, проводить оценку производственных и непроизводственных затрат на обеспечение требуемого качества продукции, анализировать результаты деятельности производственных подразделений
ОПК(У)-10	Способность организовывать работу по повышению научно-технических знаний работников
ОПК(У)-11	Способность подготавливать отзывы и заключения на проекты стандартов, рационализаторские предложения и изобретения в области машиностроения
ОПК(У)-12	Способность подготавливать научно-технические отчеты, обзоры, публикации по результатам выполненных исследований в области машиностроения
ОПК(У)-13	Способность разрабатывать методические и нормативные документы, предложения и проводить мероприятия по реализации разработанных проектов и программ в области машиностроения
ОПК(У)-14	Способность выбирать аналитические и численные методы при разработке математических моделей машин, приводов, оборудования, систем, технологических процессов в машиностроении
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способность разрабатывать технические задания на проектирование и изготовление машин, приводов, оборудования, систем и нестандартного оборудования и средств технологического оснащения, выбирать оборудование и технологическую оснастку
ПК(У)-2	Способность разрабатывать нормы выработки и технологические нормативы на расход материалов, заготовок, топлива и электроэнергии в машиностроении
ПК(У)-3	Способность оценивать технико-экономическую эффективность проектирования, исследования, изготовления машин, приводов, оборудования, систем, технологических процессов, принимать участие в создании системы менеджмента качества на предприятии
ПК(У)-4	Способность подготавливать заявки на изобретения и промышленные образцы, организовывать работы по осуществлению авторского надзора при изготовлении, монтаже, наладке, испытаниях и с даче в эксплуатацию выпускаемых изделий и объектов машиностроения
ПК(У)-5	Способность разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности на предприятии, оценивать инновационные и технологические риски при внедрении новых технологий, организовывать повышение квалификации и тренинг сотрудников подразделений в области инновационной деятельности и координировать работу персонала при комплексном решении инновационных проблем в машиностроении
ПК(У)-6	Способность разрабатывать мероприятия по комплексному использованию сырья, по замене дефицитных материалов и изысканию способов утилизации отходов машиностроительного производства

ПК(У)-7	Способность организовать развитие творческой инициативы, рационализации, изобретательства, внедрение достижений отечественной и зарубежной науки, техники, использование передового опыта, обеспечивающих эффективную работу подразделения, предприятия
ПК(У)-8	Способность организовать и проводить научные исследования, связанные с разработкой проектов и программ, проводить работы по стандартизации технических средств, систем, процессов оборудования и материалов
ПК(У)-9	Способность разрабатывать физические и математические модели исследуемых машин, приводов, систем, процессов, явлений и объектов, относящихся к профессиональной сфере, разрабатывать методики и организовывать проведение экспериментов с анализом их результатов
ПК(У)-10	Способность и готовность использовать современные психолого-педагогические теории и методы в профессиональной деятельности
ПК(У)-11	Способность подготавливать технические задания на разработку проектных решений, разрабатывать эскизные, технические и рабочие проекты технических разработок с использованием средств автоматизации проектирования и передового опыта разработки конкурентоспособных изделий, участвовать в рассмотрении различной технической документации, подготавливать необходимые обзоры, отзывы, заключения в области профессиональной деятельности
ПК(У)-12	Способность составлять описания принципов действия и устройства проектируемых изделий и объектов с обоснованием принятых технических решений в области профессиональной деятельности
ПК(У)-13	Способность применять новые современные методы разработки технологических процессов изготовления изделий и объектов в сфере профессиональной деятельности с определением рациональных технологических режимов работы специального оборудования в машиностроении

РЕФЕРАТ

выпускной квалификационной работы
студента гр. 4АМ01 Даурембекова А.М

«Исследование прочности сменных многогранных пластин при фрезеровании титановых сплавов»

Выпускная квалификационная работа выполнена на страницах 164, содержит: 78 рисунков, 37 таблицы, 30 источников.

Ключевые слова: обрабатываемость титановых сплавов; износ режущего инструмента; прочность режущего инструмента; контактные напряжения, напряжённо-деформированное состояние режущего инструмента.

Объектом исследования является сменная многогранная пластина.

Цель работы – подтверждение квалификации «магистр техники и технологии» по направлению 15.04.01 "Автоматизация технологических процессов и производств в машиностроении". В ходе исследования проведен обзор и анализ научно-технической литературы по теме магистерской работы, постановка цели и задач исследования. В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния толщины реза и переднего угла на технологическую и физическую составляющие силы резания при использовании сменных многогранных пластин (СМП), которые будут применяться на сборных фрезах. Рассмотрено влияние толщины среза и переднего угла на распределение контактных напряжений на передней поверхности и на фаске износа по задней поверхности, приведены картины напряженно-деформированного состояния режущих пластин. Определены оптимальные геометрические параметры режущего инструмента и режимы резания при обработке титановых сплавов. Использовали токарный станок 1К62, трехкомпонентный токарный динамометр Kistler и программу ANSYS для расчета НДС режущих пластин. В работе были определены необходимые экономические параметры, такие как производительность обработки, затраты на обработку, затраты на инструмент.

Результаты работы позволят использовать рациональные геометрические параметры фрез и режимы резания при обработке титанового сплава для повышения работоспособности режущих пластин.

Степень внедрения: по результатам защиты работы на государственной аттестационной комиссии будет принято, решение о рекомендации разработок к внедрению на производстве в ООО «Мион», г. Томск.

Область применения: производство машиностроительной продукции. Экономическая значимость работы достаточно высокая.

В будущем планируется участвовать в организации производства режущих твердосплавных пластин

SUMMARY

final qualifying work of the student gr. 4AM01 Daurembekov A.M.
**Investigation of the strength of replaceable polyhedral plates during
milling of titanium alloys**

The Final Qualifying Work (Diploma Thesis) is executed on 164 pages of the explanatory note, contains: 78 figures, 37 tables, 30 sources.

Keywords: machinability of titanium alloys; wear of the cutting tool; strength of the cutting tool; contact stresses, stress-strain state of the cutting tool.

The object of research is replaceable polyhedral plate

The purpose of the work is to confirm the qualification "Master of engineering and technology" in the major 15.04.01 "Automation of technological processes and productions in mechanical engineering". During the research, the review and analysis of scientific and technical literature on the topic of master's work, the formulation of the goals and objectives of the research were carried out. The results of an experimental study of the effect of the uncut chip thickness and rake angle on the technological and physical components of the cutting force when using replaceable polyhedral plates to be used on the assembled milling cutters are presented. The influence of the of the uncut chip thickness and rake angle on the distribution of contact stresses on the rake surface and on the worn chamfer of the flank surface is considered, pictures of the stress-strain state of the cutting plates are presented. Optimal geometric parameters of the cutting tool and cutting modes in titanium alloys machining are determined. A 1K62 lathe, a three-component Kistler turning dynamometer, as well as the ANSYS program for calculating the stress-strain state of cutting plates were used.

The necessary economic parameters were determined, such as processing productivity, processing costs, and tool costs.

The results of this work will allow us to use rational geometric parameters of the RPP and cutting modes when processing steel cutting to improve the performance of turning tool with mechanical mounting of cutting plates.

Degree of implementation: based on the results of the work protection at the state attestation Commission, it will be decided whether to recommend the development for implementation in production at MION LLC, Tomsk.

Field of application: manufacturing of engineering products.

The economic significance of the work is quite high.

In the future, it is planned to participate in the organization of production of precast cutters with cutting carbide plates.

Содержание

Введение	11
1. Цель и задание исследования.....	12
2. Литературный обзор	14
2.1. Анализ конструкций и геометрических параметров СМП	14
2.2. Исследование силовых зависимостей процессов резания.....	16
2.3. Расчёт физических составляющих силы резания	17
2.4. Исследование фрезерования титанового сплава	18
2.5. Механическая обработка титановых сплавов	20
2.6. Общие рекомендации по фрезерованию титана.....	24
3. Исследовательская часть ВКР	28
3.1. Исследование фрезерования титанового сплава концевой однозубой фрезой	28
3.2. Влияние режимов резания на составляющие силы резания при фрезеровании титанового сплава концевой фрезой.....	31
3.3. Исследования контактных напряжений на передней поверхности при токарной обработке титанового сплава ВТЗ-1 неизношенным резцом.....	35
3.4. Исследования контактных напряжений на фаске износа по задней поверхности при токарной обработке титанового сплава ВТЗ-1	46
3.5. Исследование процесса фрезерования торцевой фрезой	58
3.6. Влияние радиуса округления режущей кромки на составляющие силы резания..	63
3.7. Распределение температуры в инструменте при резании титанового сплава.....	69
3.8. Расчёт физических составляющих сил резания.....	73
4. Расчет НДС режущего инструмента	81
4.1. Подготовка к расчёту НДС	81
4.2. Исследования влияния величины заднего угла α на наибольшие эквивалентные напряжения.....	85
4.3. Исследование НДС изношенного режущего клина	88
4.4. Распределения контактных напряжений при отрицательном переднем угле	91
4.5. Расчёт НДС режущего клина при отрицательном переднем угле.....	95
Заключение	100
Список литературы.....	103
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	109
Введение	109
5.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	110
5.1.1. Анализ конкурентных технических решений.....	110
5.1.2. SWOT-анализ	111
5.2. Планирование научно-исследовательских работ	115
5.2.1. Структура работ в рамках научного исследования.....	115
5.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения.	117
5.3. Бюджет научно-технического исследования.....	121
5.3.1. Расчет материальных затрат научно-технического исследования.....	121
5.3.2. Расчет амортизации специального оборудования.....	122
5.3.3. Основная заработная плата исполнителей темы	123
5.3.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы.	126
5.3.5. Отчисления во внебюджетные фонды.....	127
5.3.6. Накладные расходы.....	127
5.3.7. Бюджетная стоимость НИР	128
5.4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	129

Выводы по разделу	135
6. Социальная ответственность	139
Введение	139
6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	140
6.1.1 Правовые нормы трудового законодательства	140
6.1.2. Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны	140
6.2. Производственная безопасность	143
6.3. Экологическая безопасность	148
6.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	149
Вывод по разделу	151
Приложение II-Раздел ВКР на иностранном языке	152
Introduction	153
1. Analysis of structures and geometric parameters of the RPR	154
2. Investigation of force dependences of cutting processes	156
3. Calculation of the physical components of the cutting force	157
4. Titanium alloy milling research	158
5. Mechanical machining of titanium alloys	159
Conclusion	165

Введение

В машиностроении большое внимание уделяется повышению производительности инструмента. В настоящее время большинство режущих инструментов оснащаются сменными многогранными пластинами (СМП) в связи с их быстрой заменой после предельно допустимого износа. В то же время изучение прочности СМП является актуальным и важным.

Надежность СМП определяется его гарантированной долговечностью при рациональных режимах резания. Производители режущего инструмента приложили много усилий для создания продуктов, предназначенных для обработки титана. Выбор правильного инструмента и работа с ним также способствует повышению эффективности обработки. Долговечность зависит как от интенсивности износа, так и от хрупкого разрушения. Для оценки вероятности выкрашивания режущей кромки или выкрашивания для определения рациональной геометрии и режима резания необходимо произвести расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) СМП или его режущего клина.

Построение эпюра контактных напряжений для расчётов с помощью программного обеспечения ANSYS позволило в данной работе выполнить анализ влияния геометрии режущего инструмента и режима резания на НДС сменных многогранных пластин

1. Цель и задание исследования

Цель работы: Выявить проблемы возникающие при резания титановых сплавов и улучшить эффективность их обработки.

Задача исследования:

1. Провести анализ конструкций сборных фрез и геометрических параметров используемых у них СМП;
2. Исследовать силовые зависимости процессов резания;
3. Рассчитать физические составляющих силы резания;
4. Исследовать фрезерования титанового сплава концевой однозубой фрезой;
5. Определить контактные напряжений на искусственной фаске износа по задней поверхности инструмента при обработке титанового сплава;
6. Провести измерение составляющих силы резания при моделировании износа резца по задней поверхности при обработке титанового сплава и стали;
7. Построить графики влияния толщины среза a (мм) или подачи s (f) (мм/об), при радиальном свободном прямоугольном точении диска на удельные силы резания ;
8. Исследовать влияния толщины среза и длины контакта стружки с передней поверхностью на НДС режущего клина;
9. Провести сравнение и расчёт физических составляющих силы резания, действующих на ограниченных участках контакта стружки, между титаном и сталью.
10. Провести сравнение НДС режущего клина при обработке титанового сплава BT3-1 и стали 40X.

Научная новизна выполненных исследований

1. Определено влияние переднего угла и толщины среза на величину длины контакта стружки с передней поверхностью при обработке титанового сплава;
2. Получены графики изменения составляющих силы резания в процессе

удаления стружки зубом фрезы при фрезеровании титанового сплава;

3. Получено распределение контактных напряжений на фаске задней поверхности при обработке титанового сплава инструментом с отрицательным передним углом.

4. Получено распределение контактных напряжений на фаске задней поверхности при обработке титанового сплава инструментом с округлённой режущей кромкой;

5. Получено влияние толщины среза и переднего угла на НДС режущего клина при обработке титанового сплава;

9. Исследовали влияния подачи и переднего угла на НДС СМП при обработке титанового сплава.

2. Литературный обзор

2.1. Анализ конструкций и геометрических параметров СМП

В современной промышленности широко применяются титаны и его сплавы. Данные материалы являются незаменимыми в аэрокосмической и химических отраслях, а также судостроении и медицине, так они имеют высокую коррозионную стойкость и производительность в различных диапазонах температуры. Из титана и его сплавов производят, диски и лопатки компрессора, ортопедические имплантаты, некоторые элементы рамы воздушного судна, крышки, гребные винты.

Несмотря на эти неоспоримые преимущества, титан и титановые сплавы имеют свои определенные недостатки. Плохая обрабатываемость является одним из них, что приводит к повышенному износу и даже поломкам режущего инструмента [1]. Повышению эффективности обработки способствует правильный выбор инструмента и работа с ним.

У сборных инструментов с механическим креплением сменных многогранных пластин (СМП) необходимая геометрия получается путем определенной ориентации режущей пластины различной формы в корпусе инструмента [2]. Для описания геометрии сборной фрезы наиболее приемлем подход, основанный на задании ориентации СМП путем ее поворота в гнезде корпуса на углы γ_x (осевой передней угол) и γ_u (радиальный передней угол) относительно инструментальной системы координат. Поэтому в современных конструкциях торцевых фрез к основным геометрическим параметрам еще добавлены конструктивные (инструментальные) углы ориентации СМП в корпусе фрезы. К основным геометрическим параметрам торцевой фрезы относятся (рис. 2.1.1):

1) Рабочие (функциональные) углы – это главный угол в плане ϕ , передний угол γ , угол наклона режущей кромки λ , задний угол α ;

2) Конструктивные (инструментальные) углы служат для основной ориентации положения посадочного места пластины и имеют особое значение для конструкции корпуса фрезы[1].

Обозначаются данные углы в разных фирмах по разному:

- инструментальный осевой передней угол γ_x (фирма Korloy) или аксиальный передней угол γ_p (фирма Pramet [2]);
- радиальный передней угол γ_y (γ_f фирма Pramet) или инструментальный боковой передней угол (фирма Korloy).

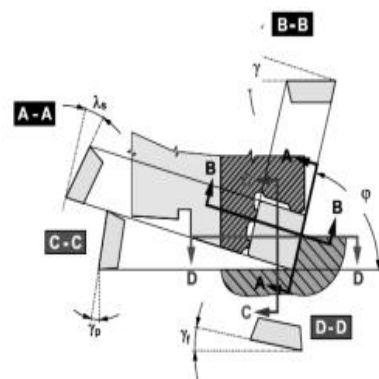


Рисунок 2.1.1 Геометрические параметры торцевой фрезы СМП

Проанализировав конструктивные особенности фрез различных фирм производителей все торцевые фрезы можно классифицировать по геометрическим схемам на четыре вида, которые представлены в таблице 2.1.1.

Таблица 2.1.1 – Геометрические схемы торцевых фрез с СМП

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 ($\gamma_x < 0, \gamma_y > 0$)

За счет изменения углов ориентации СМП в корпусе фрезы изменяется ее геометрия, следовательно, изменяется работоспособность и стойкость фрезы. Для решения задачи по определению геометрии торцевой фрезы необходимо еще на стадии проектирования фрез с СМП уметь определять геометрические параметры [2].

2.2. Исследование силовых зависимостей процессов резания

Для измерения технологических составляющих силы (P_x, P_y, P_z) резания используется трёхкомпонентный токарный динамометр.

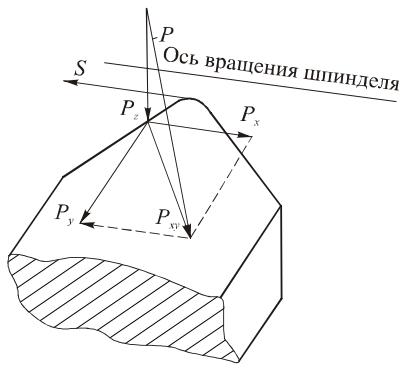


Рисунок. 2.2.1. Направление осей технологических составляющих силы резания

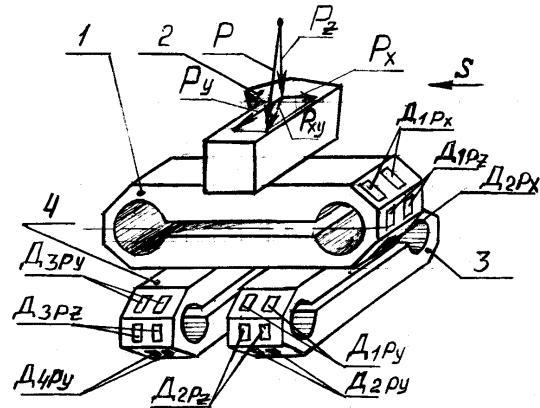
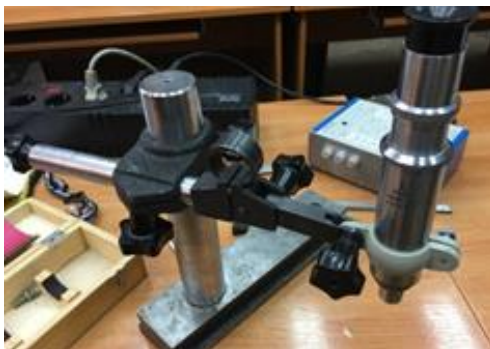
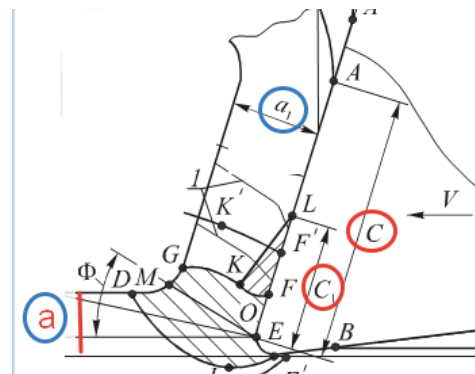


Рисунок. 2.2.2. Трёхкомпонентный токарный динамометр конструкции В.В. Брюхова и В.Н. Сбоева



а



б

Рисунок. 2.2.3. Микроскопом «Мир» для измерения длины контакта стружки с передней поверхностью режущей пластины (а) и зона стружкообразования и контакта стружки с передней поверхностью строгального резца (б)

Для измерения составляющих силы резание использовался динамометр Kistler 9257 В. Результаты измерения выводились на монитор компьютера. После обработки измерялась длина общего контакта стружки с передней поверхностью с помощью микроскопа «Мир» (рис. 2.2.3), а длина пластического контакта c_1 измерялась с помощью микроскопа по остаткам

материала прирезцовой поверхности стружки, прилипшим к передней поверхности.

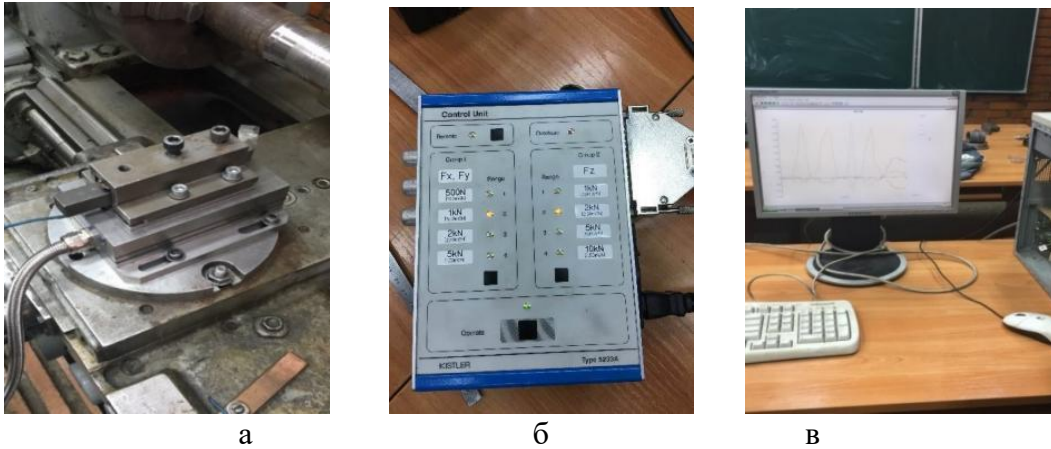


Рисунок. 2.2.4. Установка реза в динамометре Kistler 9257В на токарном станке (а), и настройка усилителя для измерения технологических составляющих силы резания (б), демонстрация на экране монитора изменения составляющих силы резания в процессе резания и их запись отдельным файлом (в)

2.3. Расчёт физических составляющих силы резания

По измеренным во время эксперимента технологическим составляющим P_z , P_y и P_x силы резания рассчитывались её физические составляющие. При положительном переднем угле γ схема действия технологических составляющих представлена на рис. 2.3.1 и рис. 2.3.2. Учитывая направление векторов составляющих силы резания выводится формула расчёта физических составляющих:

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

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

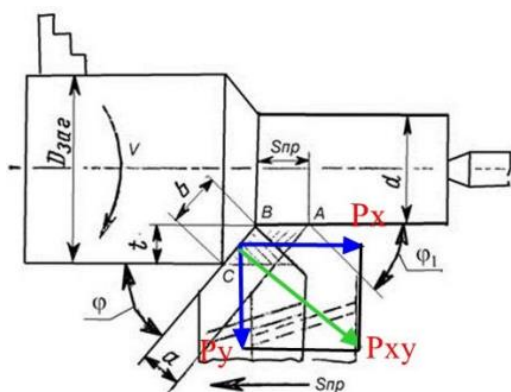


Рисунок. 2.3.1. Технологические P_x , P_y , P_z и P_{xy} составляющие силы резания на виде сверху

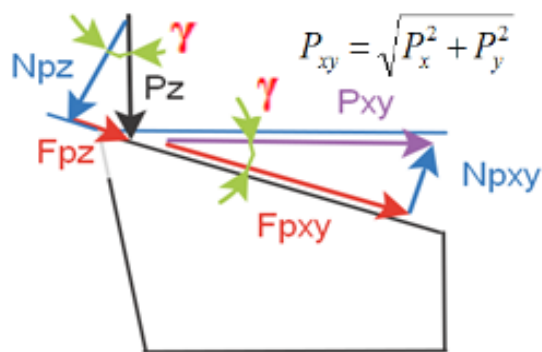


Рисунок 2.3.2 . Схема действия технологических (P_z и P_{xy}) и физических (N и F) составляющих силы резания при положительном переднем угле γ

2.4. Исследование фрезерования титанового сплава

Под обрабатываемостью чаще всего понимают интенсивность износа режущего инструмента (или рациональная скорость резания при рациональной стойкости инструмента, часто это 20-40 минут) и качество обработанной поверхности. Обрабатываемость большинства титановых сплавов плохая и зависит от многих факторов: химического состава, структуры, твердости, метода получения исходной заготовки и её подготовки для дальнейшей лезвийной обработки. Обрабатываемость α - или даже α - β сплавы сравнимы по обрабатываемости, однако обрабатываемость β и псевдо- β сплавов существенно хуже [2]. Основными проблемами при резании титановых сплавов являются следующие факторы:

1) интенсивное тепловыделение в зоне стружкообразования приводит к чрезмерному адгезионному износу режущей кромки с её округлением до радиуса $\rho = 0,1-5$ мм и образованием фаски износа на задней поверхности длиной $h_z = 0,2...5$ мм [2, 3, 4].

Интенсивный износ по передней поверхности приводит к быстрому увеличению лунки износа с уменьшением прочности режущего клина, появлению отрицательного переднего угла γ до -30° ;

2) низкая теплопроводность приводит к плохой теплопередаче и замедленной теплоотдаче, что существенно увеличивает действие первого пункта;

3) низкий модуль упругости E приводит к более существенному восстановлению поверхности резания после прохода под режущей кромкой, что способствует увеличению нормальных контактных напряжений на фаске износа по задней поверхности [1, 2, 3, 4], появлению вибрации, что в целом ухудшает точность обработки и качество обработанной поверхности.

Все эти факторы значительно сокращают срок службы инструмента и отрицательно влияют на производительность, т.к. скорость резания труднообрабатываемых групп титановых сплавов порой в несколько раз меньше скорости резания незакалённой конструкционной стали.

Обрабатываемость титанового сплава различных групп титановых сплавов наглядно представлена на рис. 2.4.1 [2]. При фрезеровании заготовок из титанового сплава стараются использовать наиболее эффективную технологию, или схему, фрезерования.

Технологию фрезерования определяет траектория движения инструмента и отношение «осевая глубина резания (a_p) – радиальная

глубина резания (a_e)» [2]. При этом применяемые термины в справочнике [1] соответствуют следующим применяемым в России терминам при концевом фрезеровании: осевая глубина резания a_p – это ширина фрезерования B ; радиальная глубина резания a_e – это глубина фрезерования t .



Рисунок 2.4.1. Обрабатываемость групп титанового сплава

2.5. Механическая обработка титановых сплавов

Использование титановых сплавов накладывают ограничения и условий при механической обработке в сравнении работы с другими металлами. Свойства титанового сплава влияют не только на процесс резания, но и на обрабатываемый материал. Выбрав правильно инструмент и режим, мы можем достичь высокого качества обработки и работы с материалом. Следовательно, зная свойства и особенности работы с титановым сплавом, можно избежать большинство проблем. У титанового сплава много свойств поэтому он имеет репутация привлекательного материала для изготовления деталей, оказывавший значительный эффект на его обрабатываемость [2,3,5,6], а именно:

- высокая прочность в сочетании с низкой плотностью, что уменьшает вес конструкций, его плотность составляет 60% плотности стали;
- низкая теплопроводность;
- более высокая стойкость к коррозии, чем нержавеющая сталь.

При обработке титанового сплава все свойства, которые были перечислены выше, говорят о том, что он обладает высоко концентрированными силами, действующие на режущую кромку которое ведёт к быстрому износу режущей кромки инструмента и приводит к вибрациям при обработке. Кроме того, у титана низкая теплопроводность. Поэтому используется инструмент с высокой красностойкости [1-5].

Одни из неблагоприятных явлений при обработке к является адгезия (рис.2.5.1), а в некоторых случаях происходит поверхностное упрочнение титановых сплавов, что способствует существенному затуплению РИ.

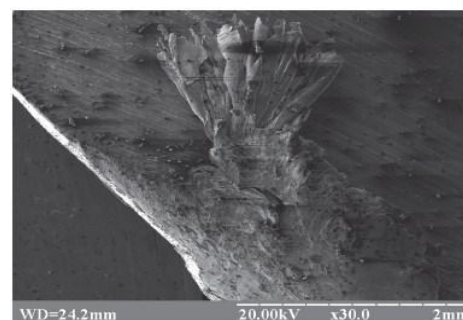


Рисунок 2.5.1
Наростообразование на РИ

Углерод содержащийся более чем 0,2% приводит к образованию карбида титана, из-за того, что углерод в титановом сплаве растворяется только до 0,2%, следовательно, если содержание углерода в титановом сплаве значительно превышает это число, то образуются твёрдые карбиды титана, которые воздействуют на режущую кромку инструмента как абразив и затупляют её.

На рисунках 2.5.2 и 2.5.3 схематично показаны обработка титанового сплава и стали, по которому видно, что длина контакта стружки при обработке титановых сплавов с передней поверхностью, образующих сегментную или даже элементную стружку, гораздо меньше, чем при обработке стали.

Этим же объясняется, что при резании титановых сплавов образуются большие углы сдвига при малой усадке стружки, как правило, коэффициент усадки по ее длине близок к единице. Это мы видим в зависимости продольной деформации стружки от скорости резания и подачи, а также по коэффициенту усадки различных марок твердых и титановых сплавов.

В ряде случаев в результате поглощение кислорода и азота из воздуха при обработке титановых сплавов вызывают так называемую отрицательную усадка, т. е. длина образующейся стружки больше пути резания. Резкое уменьшение сил трения стружки с передней поверхности объясняется снижением усадки стружки с увеличением скорости резания. Ограничение титановых сплавов и их применение характеризуются высокими коэффициентами трения. В результате при обработке титановых сплавов вся нагрузка, распределяющая на очень малом участке передней поверхности,

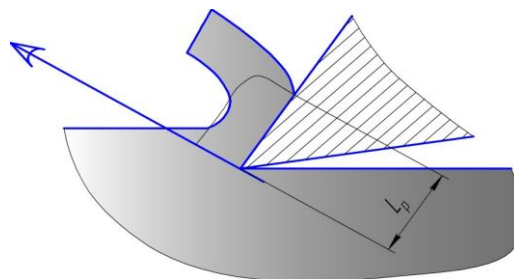


Рисунок 2.5.2 Стружкообразование при обработке стали

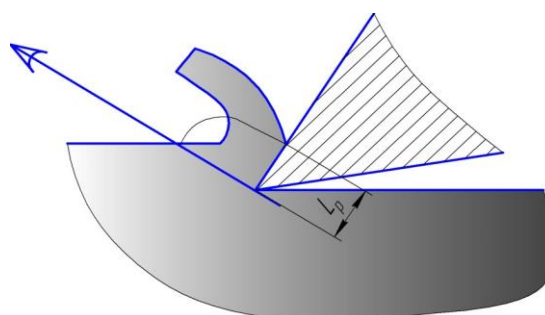


Рисунок 2.5.3 Стружкообразование при обработке титанового сплава

приводит к уменьшению стойкости инструмента и быстрому разрушению его режущей кромки [1, 5].

Титан является одним из самых трудных материалов которое подается обработке. Для современных инструментов, станков и методов обработки – это нетипично. Из-за маленького опыта по механической обработке данного материала является частью проблемы в настоящий момент. Другие металлы, такие как чугун или низколегированная сталь, также трудно обрабатывать, как и титан. Есть ряд рекомендации для обработки данного материала:

- обработка другими подачами и скоростями;
- заготовка должна быть максимально хорошо зажата в станке;
- отличное состояние станка, оборудованное со специальным шпинделем ISO 50 с коротким вылетом инструмента.

Данные рекомендации позволят избежать проблемы при механической обработке титанового сплава.

Но нужно понимать, что не всегда при фрезеровании существуют стабильные и идеальные условия. Разная форма деталей так же влияет на обработку. Чтобы деталь изготовилась правильно и подвергалась к успешной обработке, используется инструмент с большой длиной режущей частью, что может быстро привести к деформации инструмента, вызванной вибрацией при обработке титана и его сплавов.

Существуют методы, которые помогут значительно снизить эти вибрации. Интенсивная эксплуатация фрезерных станков, для обработки титанового сплава оснащенные шпинделями с конусом ISO 40 снижает эффективность точности и надежности обработки. Контурная обработка, резание канавок, или обработку кромок, все это может привести к вибрации. Чтобы этого избежать повышают надежность закрепления заготовки и уменьшают упругую деформацию в системе СПИД.

Многоступенчатое крепление заготовок, снижает вибрацию - это является максимальным способом решение данной проблемы.

Так как титановые сплавы сохраняют свою прочность и твердость при высоких температурах, при обработке на режущую кромку действует большая нагрузка. При этом в месте резания выделяется большое количество тепла, что влечет за собой опасность пластической деформации режущего клина и потери им режущих свойств. Поэтому при обработке титана большое значение имеет правильный выбор марки инструментального материала и геометрии сменной пластины, преимущественно из твердого сплава. Решением этой проблемы является пластины с PVD покрытием, которые могут значительно повысить эффективность обработки [1, 3].

В настоящее время существует ряд условий режимов резания при обработке заготовок из титановых сплавов. Точность торцевого и рациональное биение инструментов очень важны при обработке титана. Например, если пластина неправильно установлена в корпусе фрезы, она может быстро повредить режущие кромки.

Хотя предпочтительно геометрия с положительным передним углом, инструмент с небольшим отрицательным передним углом способен обрабатывать с более высокими подачами, до 0,5 мм на зуб. При этом важна надежность закрепления заготовки, жесткость станка и всей системы СПИД. Минимальная подача при фрезеровании титана обычно составляет 0,1 мм на зуб.

Также возможно уменьшить частоту вращения шпинделя чтобы получить рекомендуемую скорость резания как показано таблице 2.5.1. Неправильно выбранная частота вращения шпинделя может снизить стойкость инструмента на 90% при минимальной подаче на зуб.

Другой вариант - это уменьшить количества режущих пластин фрезы [2, 3]., хотя в некоторых источниках наоборот, рекомендуют увеличивать количество зубьев для снижения нагрузки на каждый зуб [1].

Таблица 2.5.1 – Рекомендуемые материалы, скорость резания и коэффициент обрабатываемости титановых сплавов

Группы титанового сплава, его структура и марка	Материал режущего инструмента	Скорость резания, м/с	Коэффициент обрабатываемости по отношению к стали 45
Пластичные: - Низкой прочности ВТ1-1, ОТ4-0, АТ2 - Средней прочности ВТ5-1, ВТ5, ОТ4, АТ3	ВК6М; ВК8	1-1,7	0,45
Конструкционные повышенной прочности: - ВТ6, ИРМ1 (($\alpha+\beta$)- структура) - ВТ20, АТ6, ОТ4-2 (α - структура)	ВК8; ВК6М; Р9К5	1-2,3 0,75-1,2	0,55 0,32
Высокопрочные сплавы: ВТ14, ВТ16, ВТ22, ВТ23 (($\alpha+\beta$)- структура) ВТ15, ТС6 (β - структура)	ВК8;ВК6М	0,8-1,6 0,5-1	0,4 0,25
Жаропрочные сплавы: ВТ3-1, ВТ8, ВТ9 (($\alpha+\beta$)- структура)	ВК8	0,5-1,2	0,28

При обработке титана рекомендуется сохранять малую длину контакта с заготовкой, для обеспечения охлаждения зубьев фрезы в период «передышки» в процессе резания.

Все вышеуказанные рекомендации по конструкции инструмента и режимам резания при обработке титана и его сплавов учитываются современными производителями при проектировании инструмента. Проектируются различные конструкции концевых фрез для обработки титановых сплавов, которые повышают производительность.

2.6. Общие рекомендации по фрезерованию титана

Вращающаяся фреза контактирует с обработанной деталью по дуге, измеряемой углом зацепления AE (что соответствует также символу ψ – центральный угол контакта) (рис. 2.6.1).

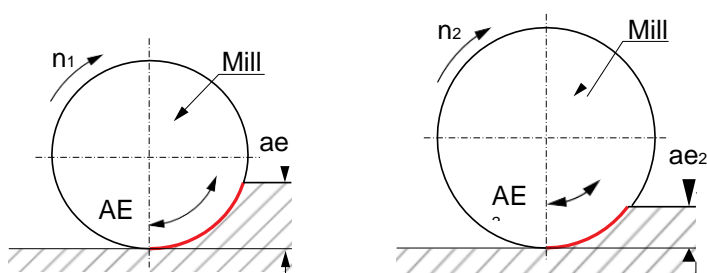


Рисунок 2.6.1. Дуга контакта и угол зацепления

1. Уменьшение глубины резания t (ae) позволяет увеличить скорость резания V_c .

На рис. 2.6.2 показан график зависимости скорости резания V_c от угла контакта зуба фрезы с заготовкой AE и отношения глубины резания ae к диаметру концевой фрезы d , т.е. ae/d , при фрезеровании паза ($ae/d = 1$) или уступа в заготовке из Ti-6Al-4V различными методами.

При фрезеровании паза в цельной заготовке со скоростью резания V_{c1} ширина резания (глубина резания t (ae)) равна диаметру инструмента d , т.е. $ae/d = 1$. По сравнению с этим случаем

при фрезеровании уступа с ae менее $0,1 \times d$ ($AE \approx 37^\circ$) скорость резания V_c может быть увеличена на 150–200% ($V_c = 1,5 \dots 2 \times V_{c1}$).

2. Врезание по дуге (рис. 2.6.3).

Когда фреза входит в обрабатываемый материал по дуге, механические и тепловые нагрузки на режущую кромку растут постепенно, а не внезапно. Такой подход повышает стабильность обработки и увеличивает стойкость инструмента.

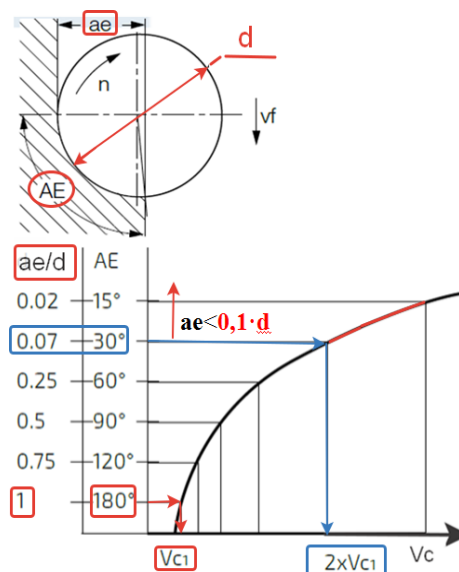


Рисунок.2.6.2. Уменьшение дуги контакта AE приводит к увеличению скорости резания V_c без уменьшения стойкости T

Врезание по дуге позволяет уменьшить интенсивность износа фрезы за счёт более **плавного роста нагрузки** на зуб при его **входе** в контакт и **уменьшения толщины** стружки на выходе зуба фрезы.

3. Значительная удельная сила резания при обработке титановых сплавов, особенно труднообрабатываемых,

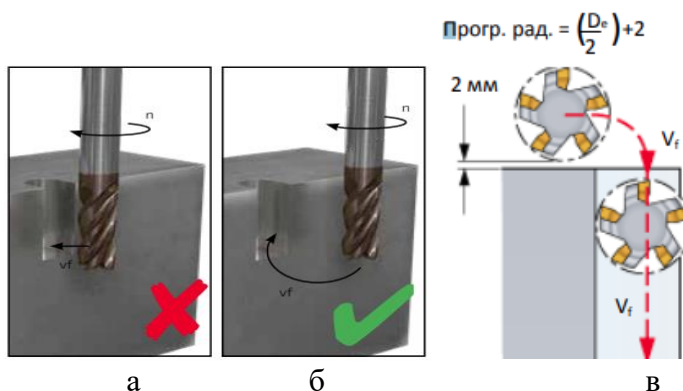


Рисунок 2.6.3. Прямой вход в материал (а) и вход по дуге («вкатывание») (б, в)

приводит к высокой нагрузке на режущую кромку. Малый модуль упругости E , т.е. как бы «пружинистость», титанового сплава усиливает вибрации, особенно при черновом фрезеровании с большими припусками. Эффективное резание в таких условиях обеспечивается высокой жесткостью всей технологической системой, поэтому уменьшение вылета концевой фрезы имеет решающее значение. Это приводит к необходимости использования нескольких фрез с разными вылетами для фрезерования высокого уступа или глубокого паза.

4. Подача охлаждающей жидкости под высоким давлением может значительно повысить эффективность фрезерования, но часто это недопустимо из-за осаждения ингредиентов СОЖ на стружке, что делает невозможным её вторичную переработку.

5. Фрезерование с большой подачей (HFM) – хорошее решение для увеличения **производительности** обработки. Факторы, способствующие **повышению производительности**:

- **преобразование стойкости** в высокую скорость обработки: за счёт уменьшения стойкости T можно увеличить скорость резания v и тем самым увеличить производительность;
- увеличенная подача s_z (мм/зуб);

- использование инструмента с большим количеством зубьев z ;
- увеличенная ширина резания B .

6. Из-за высокой температуры в зоне резания окисление приводит к образованию **локальной проточки** на режущей кромке при её контакте с обрабатываемой поверхностью. Вместо резания происходит деформация материала, что приводит к его упрочнению и образованию трещин на поверхности, создаются неблагоприятные условия резания и ухудшается качество поверхности. Разная ширина резания B при фрезеровании в **несколько проходов** снижает интенсивное образование проточин и влияние негативных факторов

7. Подача охлаждающей жидкости под высоким давлением может значительно повысить эффективность фрезерования, однако применение **СОЖ** часто **не допустимо** из-за загрязнения стружки.

8. Фрезерование титана с быстрой (большой) подачей.

Фрезерование с быстрой подачей (**FF**) (Fast Feed) или фрезерование с большой подачей (**HFM**) (High Feed Machining) обычно связано с черновой обработкой стали и чугуна. Однако этот эффективный метод чернового фрезерования может быть успешно применен в обработке титановых сплавов.

Вместо того, чтобы использовать **традиционную** технологию удаления металла – фрезерование с большой глубиной t и шириной резания b – **FF** предлагает обработку с аналогичной шириной резания b , но с гораздо меньшей глубиной t [1]. Фрезы FF имеют малые углы в плане ϕ (рис. 2.7.1), что позволяет значительно увеличить **подачу на зуб** f_z (s_z) и, следовательно, скорость подачи.

За счёт уменьшения толщины среза a происходит улучшение теплоотвода, что позволяет увеличить

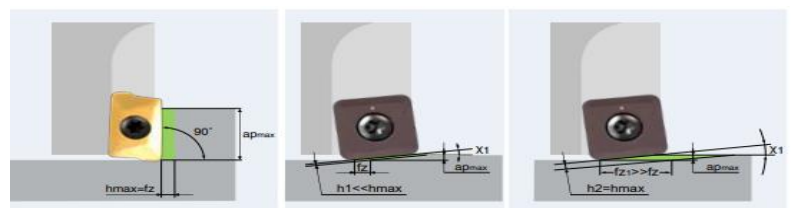


Рисунок. 2.7.1. Геометрические зависимости между подачей на зуб s_z , углом режущей кромки ϕ и толщиной среза a .

скорость резания v или частоту вращения фрезы $n=1000 \cdot v / (\pi \cdot d)$ (об/мин).

Скорость подачи рассчитывается по формуле $V_f = s_{\text{мин}} = s_z \cdot z \cdot n$ (мм/мин). По утверждению авторов [1], благодаря эффекту утонения стружки, или толщины среза a , рассчитываемой по формуле $a = s \times \sin\phi$, происходит уменьшение температуры в зоне контакта стружки с передней поверхностью зуба фрезы или СМП (рис. 2.7.1).

3. Исследовательская часть ВКР

3.1. Исследование фрезерования титанового сплава концевой однозубой фрезой

Среди наиболее эффективных и действенных современных производственных технологий высокоскоростная обработка (BCO) (HSM – High-Speed Machining) используется для повышения производительности, одновременного улучшения качества продукции и снижения производственных затрат. В зависимости от материалов заготовки и инструмента, а также требований к стойкости инструмента, скорость резания, используемая в HSM, часто в 2-50 раз выше, чем при обычной обработке.

Качество обработанной поверхности зависит от скорости фрезерования. При концевом фрезеровании титанового сплава Ti-6Al-4V скорость резания v изменялась от 50 до 110 м/мин. Для получения лучшей шероховатости поверхности при фрезеровании титанового сплава применялась скорость резания v от 100 до 125 м/мин.

Увеличение скорости резания при обработке титанового сплава является одной из задач аэрокосмической и оборонной промышленности. Скорость резания в диапазоне от 50 до 180 м/мин были выбраны для изучения особенностей обрабатываемости титанового сплава [3].

В качестве исследования по обработке концевой фрезерования были использованы заготовки в виде пластин из сплава Ti-6Al-4V и однозубая концевая фреза диаметром 16 мм с механическим креплением СМП из ВК8 и Kennametal 12A01R020A16ED10 [3].

Сила резания, возникающая во время концевой фрезерования, может быть разделена на **три** составляющие, P_h - сила, действующая вдоль подачи $s_{мин}$ (мм/мин); P_v - сила, действующая перпендикулярно подачи $s_{мин}$; P_x - сила, действующая вдоль оси фрезы (оси вращения шпинделя).

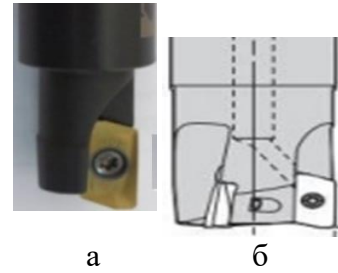


Рисунок 3.1.1. Однозубая фреза с механическим креплением СМП фото (а) и схема с тремя зубьями

При измерении сил с использованием токарного динамометра Kistler на мониторе будут отображаться силы, имеющие направление, соответствующее токарной обработке, а именно P_x – это сила в направлении осевой подачи (оси вращения шпинделя токарного станка), P_y – это сила в направлении радиальной подачи, т.е. перпендикулярно оси вращения шпинделя токарного станка) и P_z – это тангенциальная сила, действующая перпендикулярно основной плоскости (плоскости, в которой направлены осевая и радиальная подачи).

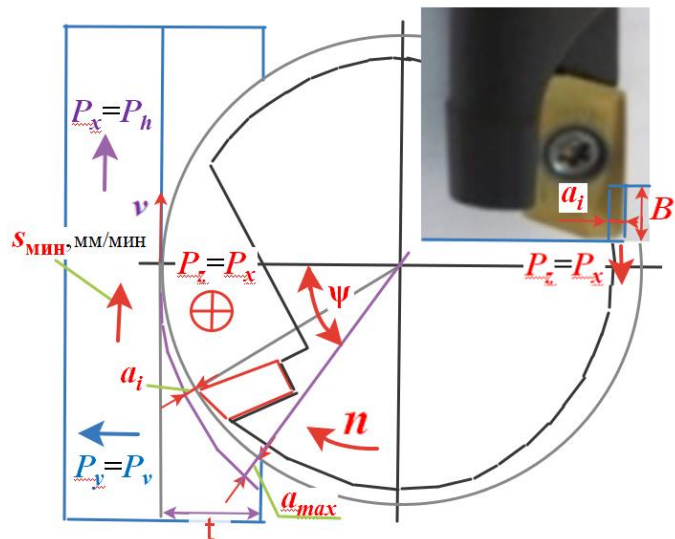


Рисунок 3.1.2. Изменение толщины среза a_i (мм) в процессе вращения фрезы и изменения центрального угла положения зуба фрезы ψ_i относительно точки выхода зуба из контакта с заготовкой

Т.к. в программное обеспечение токарного динамометра Kistler Type 9257B «зашиито» обозначение осей для

точения, то надо преобразовать направления их действия для рассматриваемой схемы фрезерования: P_x – это сила P_h , а при малой глубине резания t это приблизительно P_z ; P_y – это сила P_v , а при малой глубине резания t это P_y ; P_z – это сила P_x (рис. 3.1.2 и 3.1.3).

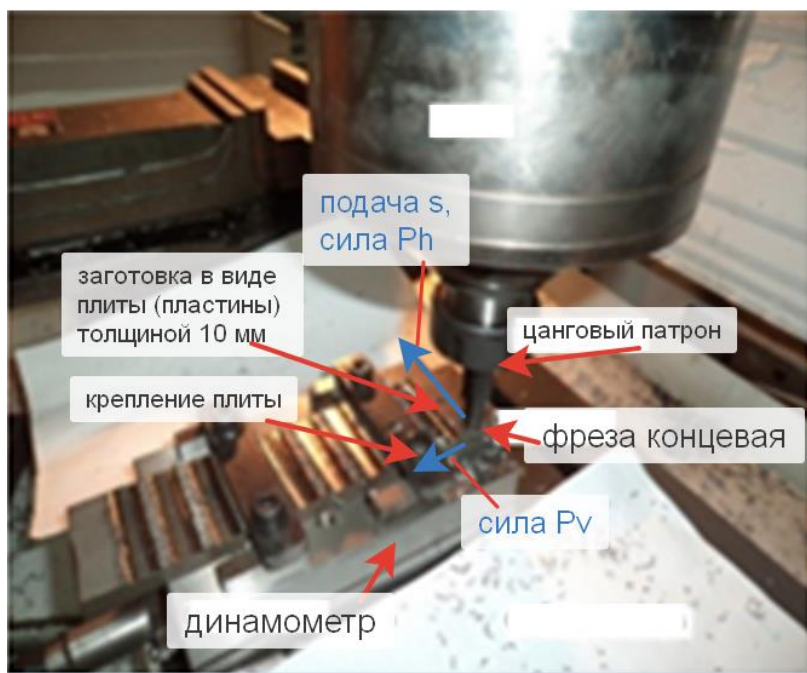


Рисунок 3.1.3. Фрезерование заготовки (плиты) с продольной подачей $s_{\text{мин}}$ (мм/мин) при **попутном** фрезеровании

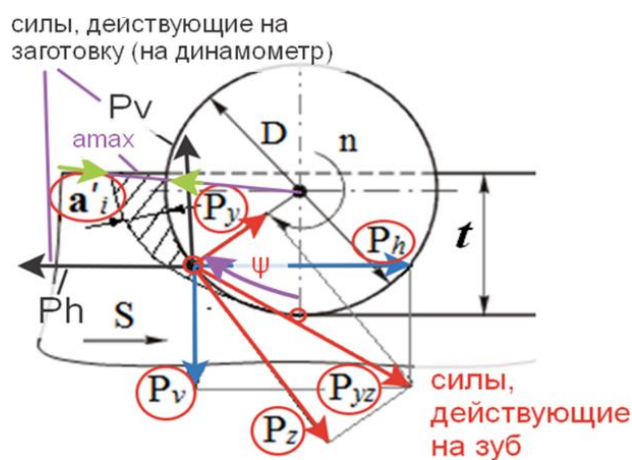


Рис. 3.1.4. Изменение направления составляющих P_z и P_y силы резания при **повороте** зуба фрезы при несимметричном **встречном концевом** фрезеровании. Толщина среза $a_i = s_z \cdot \sin \psi$, наибольшая толщина среза

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

Большой проблемой является то, что при фрезеровании невозможно измерить в чистом виде радиальную силу P_y , действующую на зуб фрезы в направлении оси вращения фрезы, и тангенциальную силу P_z , действующую на зуб фрезы против скорости резания v , т.к. фреза вращается и изменяются

направления действия этих сил (рис. 3.1.4). Только сила P_x имеет постоянное направление: на заготовку она действует вертикально вниз как сила P_z при точении, а на зуб фрезы действует такая же сила по величине, но направленная вверх.

При попутном фрезеровании (подача направлена в том же направлении, что и вектор скорости резания v) зуб начинает резать с большой толщиной среза и по мере поворота зуба фрезы толщина среза a уменьшается до нуля в момент выхода зуба из контакта заготовки.

Это позволяет избежать затирания режущей кромки и выглаживания обрабатываемой поверхности в начальный момент резания, но приводит к удару режущей кромки зуба фрезы в момент врезания.

При попутном фрезеровании под действием силы P_h заготовка сдвигается в направлении подачи и при наличии люфтов в винтовой передаче могут появляться рывки при врезании зуба в заготовку.

Поэтому должен обеспечиваться безззорный привод в механизме подачи стола. Когда фреза врезается в заготовку, подача непреднамеренно увеличивается, что может вызвать чрезмерное увеличение толщины стружки и повреждение режущей кромки. В таких случаях следует рассмотреть возможность использования встречного фрезерования.

3.2. Влияние режимов резания на составляющие силы резания при фрезеровании титанового сплава концевой фрезой

Из экспериментальных результатов установлено, что при токарной обработке глубина резания имеет большее влияние на силы резания, чем скорость подачи, а скорость резания практически не влияет на тангенциальную силу P_z . При концевом фрезеровании, когда глубина резания t , ширина фрезерования B и подача на зуб s_z увеличиваются, силы резания также увеличиваются из-за увеличения объема снимаемого материала.

При изменении скорости резания не наблюдалось никакого влияния на тангенциальную силу P_h (силу в направлении продольной подачи) и поперечную силу P_v , а наблюдалось незначительное увеличение осевой сила резания P_x . Из экспериментальных результатов видно, что существует сильная взаимосвязь между силой резания и глубиной резания и между силой резания и подачей. Более высокая скорость подачи и глубина резания приводит к увеличению силы резания, следовательно, требуется больше энергии для удаления большего объема материала с учетом времени.

На рис. 3.2.1 показаны графики изменения составляющих силы резания, полученные во время эксперимента с измерением с использованием трёхкомпонентного токарного динамометра Kistler. При этом необходимо

делать поправку на направление сил: на мониторе Kistler. При фрезеровании в соответствии с направлением минутной подачи стола сила F_x на мониторе – это сила в направлении подачи стола, т.е. P_h ;

сила F_y на мониторе при фрезеровании – это поперечная сила P_v ; сила F_z на мониторе при фрезеровании – это осевая сила P_x .

Т.к. глубина резания t при фрезеровании была небольшая ($t=0,75$ мм) по сравнению с диаметром фрезы d ($d=12$ мм), то принимаем, что сила P_h приблизительно равна действию силы P_z , а сила P_v – это приблизительно сила P_y . Сила P_x остаётся с таким же символом P_x (на мониторе она обозначена символом F_z).

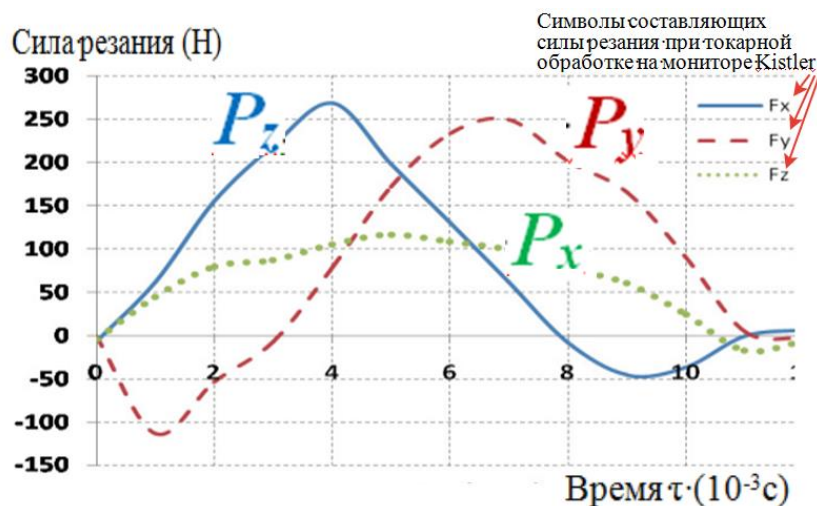


Рисунок 3.2.1. Изменение составляющих силы резания при попутном фрезеровании однозубой концевой фрезой ($d=12$ мм, $v=120$ м/мин, $s_{об}=0,075$ мм/об, $t=0,75$ мм, $n=3981$ об/мин, $B=5$ мм)

Эти составляющие, действующие на зуб фрезы, указаны непосредственно у графиков. Конечно, эти силы действуют со стороны зуба фрезы на заготовку, а значит, и на динамометр, с помощью которого измеряются силы. Но, учитывая, что реакция со стороны заготовки на зуб будет такой же по величине, но направленная в противоположном направлении, принимаем используемое обозначение символов.

Период или частота у графиков зависит от скорости вращения режущего инструмента, а длительность каждого цикла – от подачи на зуб. Одиночный скачок в каждом отдельном цикле наблюдался из-за того, что в этом эксперименте использовалась только одна СМП, чтобы не исказить графики наложением друг на друга после начала работы следующего зуба (СМП). Один процесс резания происходил за один оборот режущего инструмента при прохождении пути по дуге с центральным углом ψ от точки врезания СМП в заготовку до выхода из контакта (см. рис. 3.1.4). Переменная толщина среза рассчитывается по формуле $a_i = s_z \cdot \sin\psi$, а наибольшая толщина среза – по формуле $a_{\max} \approx s_z \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{t}{d}}$.

При врезании зуба фрезы (СМП) сила P_z интенсивно увеличивается, а потом уменьшается к моменту выхода зуба из контакта (рис. 3.2.1). В это же время сила P_y наибольшая так как материал заготовки вдавливается под режущую кромку зуба и отжимает фрезу в сторону оси её вращения.

На рис. 3.2.2 показано влияние скорости резания и глубины резания при постоянной скорости подачи 0,075 мм / об. Поверхность графика разработана на основе модели, с использованием экспериментальных данных. График показывает, что увеличение скорости резания при меньшей глубине резания увеличивает силу резания более чем на два раза. В то время как при большей глубине резания (в отливке 1 мм) сила резания стабилизируется и даже

немного уменьшается из-за более высокой температуры резания. Это говорит о характерном уменьшении сил резания при более высокой температуре, что отмечается многими исследователями. Глубина резания оказывает большее влияние на силу резания, чем скорость подачи. Но высокая термическая нагрузка приводит к уменьшению стойкости инструмента. Различные исследования показывают о чувствительности процесса к параметрам режима резания при обработке титановых сплавов.

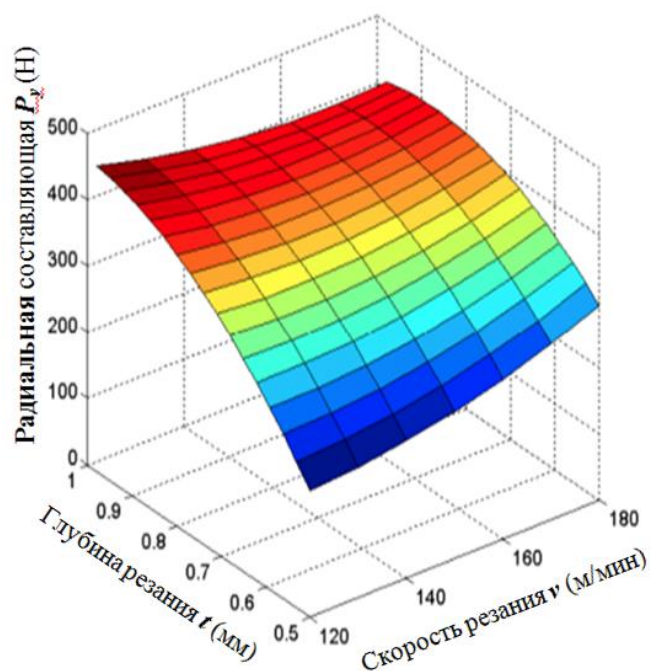


Рис. 3.2.2. Влияние глубины t (мм) и скорости v (м/мин) резания на величину наибольшей радиальной составляющей P_y (Н) силы резания при фрезеровании уступа на пластине из титанового сплава. **Ti-6Al-4V – BK8**
 $s_z=0,075$ мм/зуб

3.3. Исследования контактных напряжений на передней поверхности при токарной обработке титанового сплава ВТЗ-1 неизношенным резцом

Как уже подчёркивалось выше, при современном развитии техники невозможно измерить составляющие P_z и P_y силы резания, действующие на зуб фрезы в процессе его поворота относительно оси вращения фрезы. Но эти силы нам необходимы для расчёта физических составляющих, действующих на передней поверхности зуба фрезы или СМП: нормальной силы N , действующей перпендикулярно передней поверхности, и касательной силы F (силы трения), действующей вдоль передней поверхности. Только зная эти силы можно построить графики распределения нормальных σ и касательных τ контактных напряжений (эпюры) на передней поверхности неизношенного зуба фрезы или СМП.

Без знания величины контактных напряжений и особенностей их распределения невозможно приложить внешнюю нагрузку на переднюю поверхность 3D модели режущего и достоверно рассчитать напряжённо-деформированного состояния (НДС) СМП.

При износе режущего инструмента необходимо дополнительно знать распределение нормальных σ_h и касательных τ_h контактных напряжений (эпюры) на фаске износа по задней поверхности зуба фрезы или СМП. Для этого надо предварительно выделить силы, действующие на передней и задней поверхности.

В качестве обрабатываемого материала был выбран титановый сплав ВТЗ-1, широко используемый в машиностроении как жаропрочный, но в тоже время труднообрабатываемый.

Т.к. при фрезеровании происходит непрерывное изменение толщины среза a , то было принято, что надо рассматривать влияние на процессы обработки не подачи $s_{\text{мин}}$ (мм/мин), $s_{\text{об}}$ (мм/об) или s_z (мм/зуб), а толщины среза a (мм). В этом, случая зная текущую величину a_i (мм), можно рассматривать соответствующие ей эпюры контактных напряжений как на передней, так и на фаске износа по задней поверхности зуба фрезы или СМП.

Для упрощения задачи было решено исследовать силовые процессы при токарной обработке, т.к. направление действия составляющих P_z , P_x и P_y силы резания не меняется и можно использовать токарный динамометр, в частности, фирмы Kistler.

При обработке ВТЗ-1 необходимо рассмотреть влияние различных факторов на силы резания:

1. Влияние толщины среза a ;
2. Влияние скорости резания v ;
3. Влияние величины переднего угла γ ;
4. Влияние радиуса округления режущей кромки ρ .

Наиболее простым способом обработки при исследованиях процесса резания является резание периферии диска резцом с радиальной (поперечной) подачей. Для того, чтобы процесс стружкообразования был одинаковым в любом главном сечении, проходящим перпендикулярно к главной режущей кромки, необходимо, чтобы главная режущая кромка резца была перпендикулярна к направлению подачи $s_{\text{рад}}$ (мм/об). Ширина резца b_r должна быть больше ширины обрабатываемого диска b_d . В этом случае будет реализовано свободное прямоугольное резание.

При радиальной подаче резца $s_{\text{рад}}$ (мм/об) толщина среза будет равна подаче за один оборот заготовки, т.е. $a = s_{\text{рад}}$ (мм). Осевая составляющая P_x силы резания направлена вдоль главной (и единственной) режущей кромки и будет равна нулю.

Результаты измерения сил резания при обработке периферии диска практически неизношенным резцом представлены на рис. 3.3.1.

Для выделения сил на задней поверхности был использован метод экстраполяции на нулевую толщину среза (силы при $a = 0$ мм) продолжением графиков до пересечения оси ординат (ось сил P_z и P_y).

Из рис.3.3.1 видно, что при толщине среза $a = 0$ мм касательная сила на задней поверхности резца (или на режущей кромке с радиусом округления ρ при отсутствии фаски на задней поверхности) $F_h = F_\rho = P_z$ при $a=0$ мм равна нулю, а нормальная сила $N_h = N_\rho = P_{y a=0}$ имеет большую величину: $N_\rho = N_{h+\rho} = 420$ Н, или удельную линейную силу на 1 мм длины режущей кромки $q_{N\rho} = N_\rho / b = 420 / 2,3 = 182,6$ (Н/мм) при обработке ВТ3-1 резцом из ВК8.

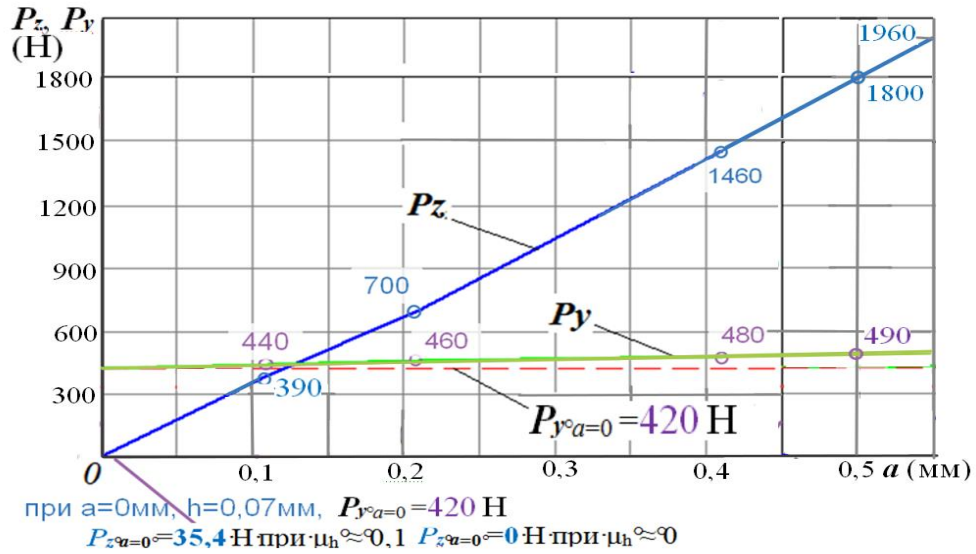


Рисунок 3.3.1. Влияние толщины среза a (мм) при прямоугольном свободном точении диска с радиальной подачей $s_{рад}$ (мм/об) на силы на передней поверхности острого резца при обработке титанового сплава ВТ3-1 при $\gamma=0^\circ$. ВТ3-1 – ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $v = 60$ м/мин, $b = 2,3$ мм.

При переднем угле $\gamma=0^\circ$ **нормальная** сила на передней поверхности $N = P_{zп} = P_z - P_{zh} = P_z - 0 = P_z$ (Н), **касательная** сила (сила трения) на передней поверхности $F = P_{yп} = P_y - P_{yh} = P_y - 420$ (Н).

Таким образом, на задней поверхности будет действовать нормальная сила $N_h = P_{ya=0} = 420$ Н (рис. 3.3.2). Как показали более точные

измерения на задней поверхности имелась очень маленькая фаска длиной $h_f \approx 0,054$ мм.

На задней поверхности будет действовать касательная сила F_h на очень маленькой фаске по задней поверхности длиной $h_f = 0,054$ мм. $F_h = P_{za=0} = 35,4$ Н (рис. 3.3.2). Сила $P_{za=0} = 35,4$ Н в 11,7 раза меньше силы $P_{ya=0} = 420$ Н, т.е. она настолько мала, что только повторные более тщательные измерения показали её наличие, а на графиках рис. 3.3.1 она находится около нуля.

Ширина **контакта стружки** с передней поверхностью $b_{стр}$ принимается равной **ширине** обтачиваемого диска $b = 2,3$ мм. Передний угол $\gamma=0^\circ$, задний угол $\alpha = 8^\circ$.

Из-за небольшой длины контакта стружки с передней поверхностью при обработке титанового сплава ВТ3-1, большой величины нормальных контактных напряжений и температуры в зоне контакта при скорости резания $v = 60$ м/мин (1м/с), **используемой в промышленности** для обработки титанового сплава ВТ3-1, возникают большие сложности при исследовании распределения контактных напряжений методом разрезного резца.

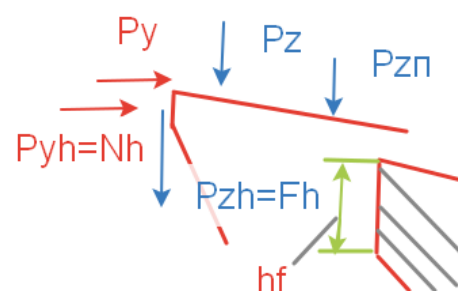


Рисунок. 3.3.2. Схема сил, действующих на передней поверхности и на фаске задней поверхности резца

Т.к. касательная сила на передней поверхности очень мала ($F = 20-70$ Н), то принималось, что распределение касательных контактных напряжений на передней поверхности τ имеет равномерно распределённый характер (рис. 3.3.3). Любая другая форма эпюры τ не позволит её изобразить при такой малой её средней величине: $\tau_{\text{ср}} = q_F = F/(c \times b) = 20/(0,35 \cdot 2,3) \approx 25 \text{ Н/мм}^2 = 25 \text{ МПа}$.

Форма эпюр нормальных напряжений σ на передней поверхности может быть разной из-за достаточно большой величины среднего контактного напряжения $\sigma_{\text{ср}} = q_N = N/(c \times b) = 390/(0,35 \cdot 2,3) \approx 485 \text{ Н/мм}^2 = 485 \text{ МПа}$. При этом предполагаются **три** возможные **формы эпюр σ** , которые позволят рассчитать **наибольшие** контактные напряжения эпюр на передней поверхности (рис. 3.3.3). Для проверки достоверности полученных эпюр может быть применён расчётный метод: нормальная сила по эпюре σ должна быть равна нормальной силе из эксперимента, т.е. $N_{\sigma} \approx N_{\text{эксп}}$.

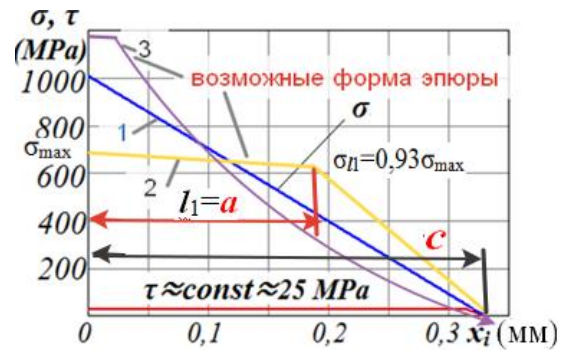


Рисунок. 3.3.3. Возможные формы эпюры нормальных контактных напряжений σ на передней поверхности резца. ВТЗ-1 – ВК6, толщина среза $a = 0,11$ мм, скорость резания $v = 1$ м/с, передний угол $\gamma = 0^\circ$

Промежуточные формы также возможны, но они **существенно не изменяют**, по сравнению с указанными тремя формами, нагружение режущего клина при расчёте его напряжённо-деформированного состояния (НДС) методом конечных элементов (МКЭ).

Расчёт величины наибольших контактных напряжений позволит в какой-то мере оценить достоверность той или иной формы эпюры: если наибольшие контактные напряжения будут нереально большими или малыми, значит такая форма маловероятна. После принятия формы эпюры рассчитываются нормальная и касательная силы на передней поверхности по принятой форме эпюры. Эти силы должны быть приблизительно равны физическим составляющим силам, полученным из эксперимента. Исходя из этого проверочного расчёты и будут определяться наибольшие контактные напряжения.

На результаты расчётов влияет длина контакта стружки с передней поверхностью c (мм), однако из-за непостоянства её длины будут рассмотрены два крайних варианта: 1) $c = 1,1 \times a$; 2) $c = 3 \times a$.

Малая длина контакта стружки c связана с сегментным характером стружки со слабой связью элементов у **прирезцовой** поверхности, а иногда она близка к по характеру с **элементной** (рис. 3.3.4). Тонкий связующий прирезцовый слой образуется из-за высокой температуры поверхности контакта, близкой к температуре плавления титанового сплава ВТЗ-1, и большому давлению в зоне формирования стружки.

Однако на расстоянии от режущей кромки более толщины среза a ($l_1 > a$) (рис. 3.3.4) давление на сформировавшийся и отделённый элемент **со стороны**



Рисунок. 3.3.4.
Изменение длины контакта стружки с передней поверхностью резца в процессе формирования элемента стружки

заготовки в зоне формирования элемента уже практически не оказывается, и поэтому наиболее вероятна модель № 1 ($c = 1,1 \times a$) с **трапецидальной** формой эпюры нормальных контактных напряжений.

На расстоянии $x < l_1 \approx a$ принимается, что распределение нормальных контактных напряжений практически равномерное из-за жёсткости подпора на формируемый элемент со стороны **ещё не срезанного** слоя заготовки, поэтому принимается $\sigma_{II} \approx 0,93 \cdot \sigma_{\max}$.

При толщине среза $a = 0,11$ мм силы $P_z = 390$ Н, $P_y = 440$ Н.

При переднем угле $\gamma = 0^\circ$ нормальная сила на передней поверхности $N = P_z = 390$ Н, касательная сила на передней поверхности $F = P_y - N_p =$
 $= P_y - 420 = 440 - 420 = 20$ Н.

При $a = 0,21$ мм $P_z = 700$ Н, $P_y = 460$ Н. $N = P_z = 700$ Н, $F = P_y - N_p = P_y - 420 =$
 $= 460 - 420 = 40$ Н.

При $a = 0,41$ мм $P_z = 1460$ Н, $P_y = 480$ Н. $N = P_z = 1460$ Н, $F = P_y - N_p = P_y - 420 =$
 $= 480 - 420 = 60$ Н.

При $a = 0,5$ мм $P_z = 1800$ Н, $P_y = 490$ Н. $N = P_z = 1800$ Н, $F = P_y - N_p = P_y - 420 =$
 $= 490 - 420 = 70$ Н.

На основании построенных эпюр σ были построены графики влияния толщины среза a и длины контакта стружки c на величину наибольшего нормального контактного напряжения σ_{\max} (МПа) у режущей кромки при треугольном и трапецидальном характере эпюры σ (рис. 3.3.5 – 3.3.6).

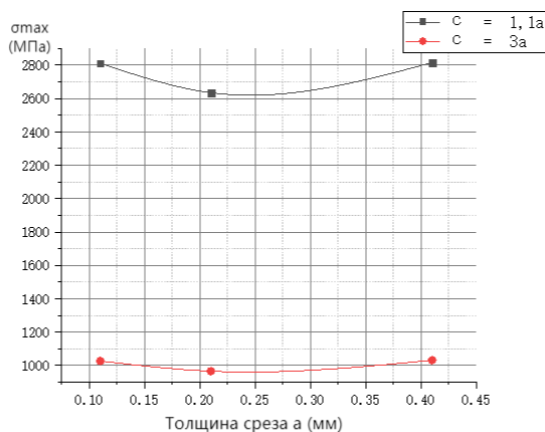


Рис 3.3.5. Влияние толщины среза a и длины контакта стружки c на величину наибольшего нормального контактного напряжения σ_{\max} (МПа) на передней поверхности при обработке титанового сплава. ВТЗ-1—ВК8, $v=60$ м/мин, $\gamma=0^\circ$, $b = 2,3$ мм, **треугольный** характер эпюры σ

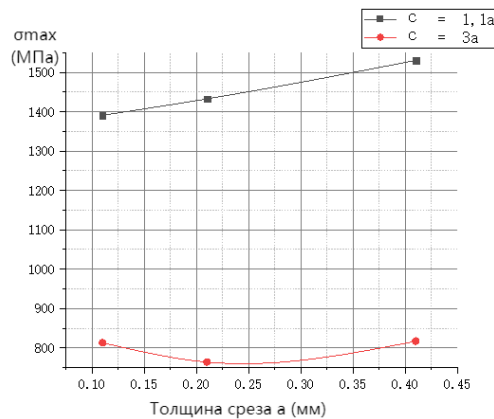


Рис 3.3.6. Влияние толщины среза a и длина контакта стружки c на величину наибольшего нормального контактного напряжения σ_{\max} (МПа) на передней поверхности при обработке титанового сплава. ВТЗ-1—ВК8, $v=60$ м/мин, $\gamma=0^\circ$, $b = 2,3$ мм, **трапецидальный** характер эпюры σ

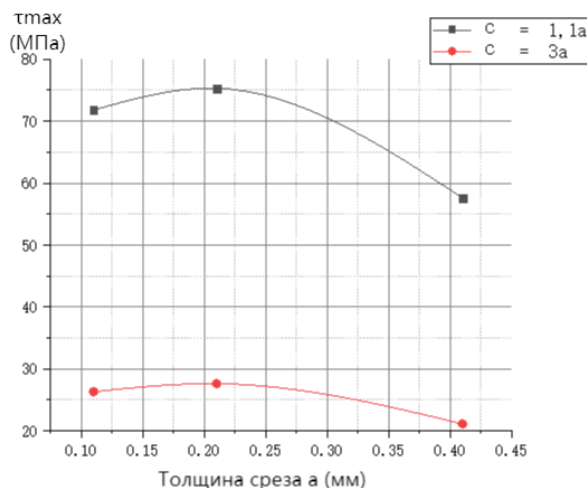


Рис 3.3.7. Влияние толщины среза a и длина контактные стружки c ($c=1.1a$ and $c=3a$) на величину наибольшего касательного контактного напряжения τ_{\max} (МПа) на передней поверхности при обработке титанового сплава. ВТЗ-1—ВК8, $v=120$ м/мин, $\gamma=0^\circ$, $b = 2,3$ мм.

Анализ полученных графиков показал, что величина наибольшего нормального контактного напряжения σ_{\max} существенно зависит от характера эпюры нормальных контактных напряжений σ , длины контакта стружки с передней поверхностью c , но несущественно зависит от толщины среза a .

При **треугольном** характере эпюры нормальных контактных напряжений σ при длине контакта стружки с передней поверхностью $c = 3 \cdot a$ величина наибольшего нормального контактного напряжения σ_{\max} слишком мала ($\sigma_{\max} \approx 1000$ МПа), что не соответствует результатам исследований контактных процессов при обработке различных материалов.

При **треугольном** характере эпюры нормальных контактных напряжений σ при длине контакта стружки с передней поверхностью $c = 1,1 \cdot a$ величина наибольшего нормального контактного напряжения σ_{\max} слишком велика ($\sigma_{\max} = 2600-2800$ МПа), что также не соответствует результатам исследований контактных процессов при обработке различных материалов.

При **трапецидальном** характере эпюры нормальных контактных напряжений σ при длине контакта стружки с передней поверхностью $c = 3 \cdot a$ величина наибольшего нормального контактного напряжения σ_{\max} слишком мала ($\sigma_{\max} \approx 800$ МПа), что не соответствует результатам исследований контактных процессов при обработке различных материалов.

При **трапецидальном** характере эпюры нормальных контактных напряжений σ при длине контакта стружки с передней поверхностью $c = 1,1 \cdot a$ величина наибольшего нормального контактного напряжения $\sigma_{\max} = 1400-1550$ МПа соответствует результатам исследований контактных процессов при обработке различных материалов, поэтому было принято, что на передней поверхности резца действуют нормальные контактные напряжения σ , имеющие **трапецидальный** характер распределения, касательные контактные напряжения τ распределены равномерно, а длина контакта стружки $c = 1,1 \cdot a$.

Наибольшие нормальные контактные напряжения на передней поверхности σ_{\max} не очень большие ($\sigma_{\max} = 1390-1530$ МПа), и чем больше толщина среза, тем больше величина σ .

Было исследовано также влияние скорости резания v . Предыдущие графики были построены на основе измерения составляющих силы резания при скорости резания $v = 60$ м/мин, поэтому были выполнены измерения

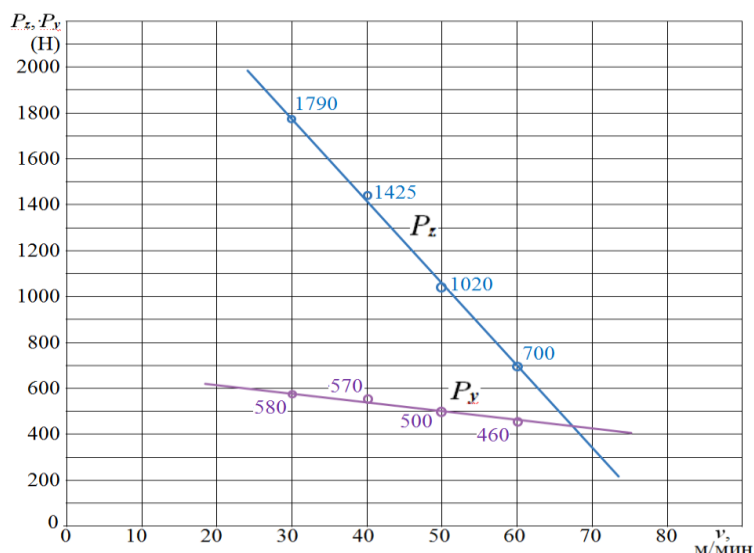


Рисунок. 3.3.8. Влияние скорости резания v (м/мин) на составляющие P_y и P_z (Н) силы резания при обработке неизношенным резцом. ВТЗ-1-ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $b = 2,3$ мм, $\alpha = 10^\circ$, $s = 0,21$ мм/об

сил резания при меньшей скорости резания (рис. 3.3.8), т.к. при $v > 60$ м/мин происходит интенсивный износ и геометрия резца меняется, что не позволяет сравнивать результаты.

Из графиков видно, что составляющие силы резания увеличиваются при уменьшении скорости резания, особенно сила P_z , что связано с уменьшением температуры в зоне стружкообразования и соответствующим увеличением прочности титанового сплава, что приводит к увеличению сопротивления к отделению элементов стружки.

Касательная сила $F = P_y$ при $\gamma = 0^\circ$ изменяется не столь существенно, что объясняется нами достижению предела прочности на сдвиг приконтактного слоя стружки, но и тот немного уменьшается с уменьшением скорости резания, а значит и температуры. Приконтактный слой имеет температуру более высокую, чем остальной объём стружки, из-за нагрева со стороны резца, поэтому и не реагирует так интенсивно на уменьшение скорости резания.

Поскольку требуемая мощность станка зависит только от силы P_z , то выгоднее вести обработку с высокой скоростью резания. Однако интенсивность износа при этом резко увеличивается.

Было исследовано также влияние величины переднего угла γ на силы резания (рис. 3.3.9). С уменьшением переднего угла силы существенно увеличиваются.

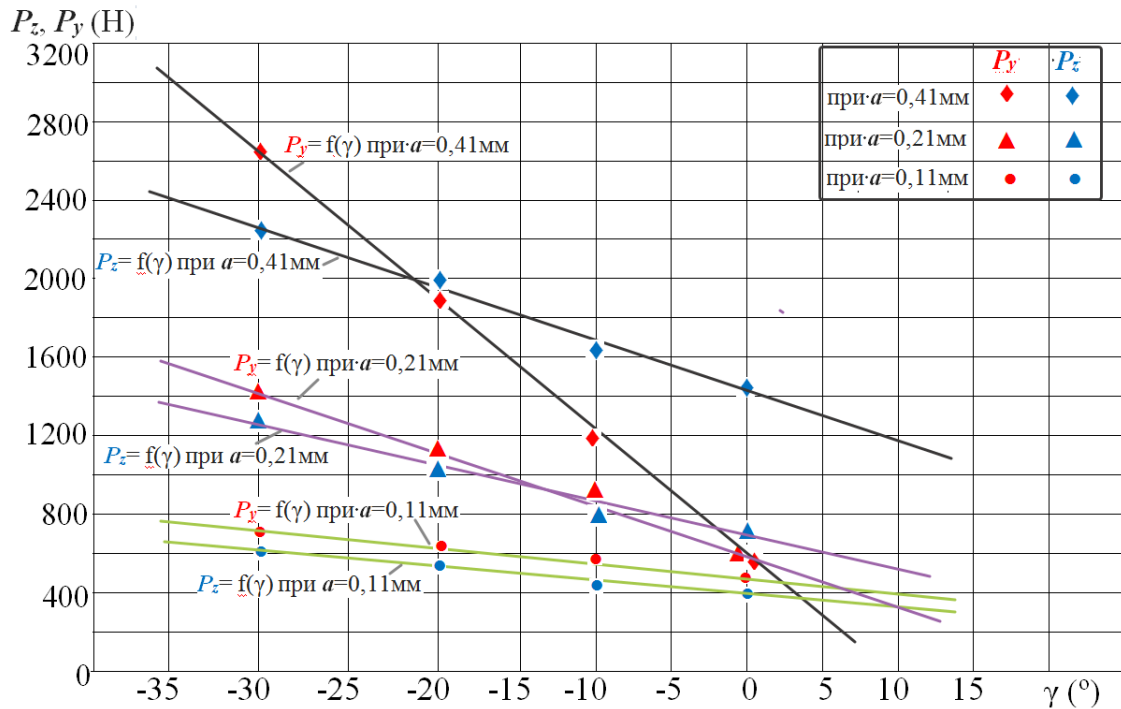


Рисунок. 3.3.9. Влияние величины переднего угла γ (°) на составляющие P_y и P_z (Н) силы резания при обработке неизношенным резцом. ВТЗ-1-ВК8, $b = 2,3$ мм, $\alpha = 10^\circ$: 1 - $s = 0,21$ мм/об; 2 - $s = 0,41$ мм/об.

Было исследовано также влияние величины радиуса округления режущей кромки ρ на силы резания, которое рассмотрено далее.

3.4. Исследования контактных напряжений на фаске износа по задней поверхности при токарной обработке титанового сплава ВТ3-1

Независимо от типа и назначения режущие инструменты изнашиваются прежде всего по задним поверхностям – главной и вспомогательной (рис. 3.4.1). Наиболее интенсивно изнашиваются участки задних поверхностей, прилегающих к главной режущей кромке, где контактные напряжения особенно большие.

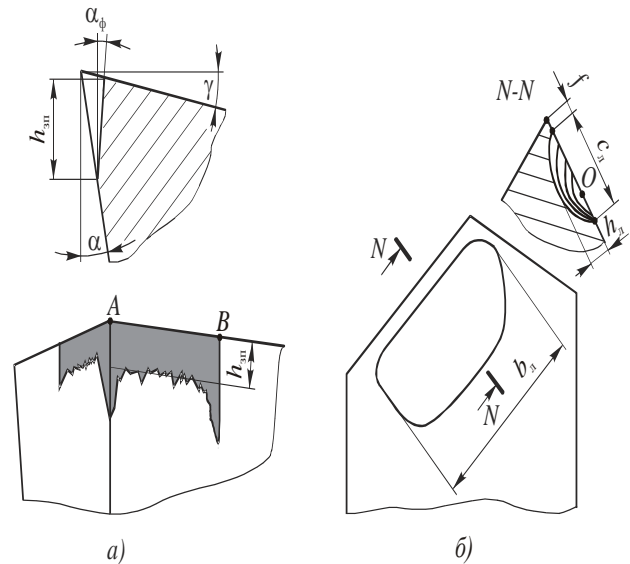


Рис. 3.4.1. Зоны износа токарного резца

В результате этого образуется площадка (фаска) износа $h_{зп}$ (h_f) с нулевым задним углом ($\alpha_{\phi}=0^\circ$ или $\alpha_n=0^\circ$), а в отдельных случаях и с небольшим отрицательным задним углом α_{ϕ} (рис. 3.4.2). При

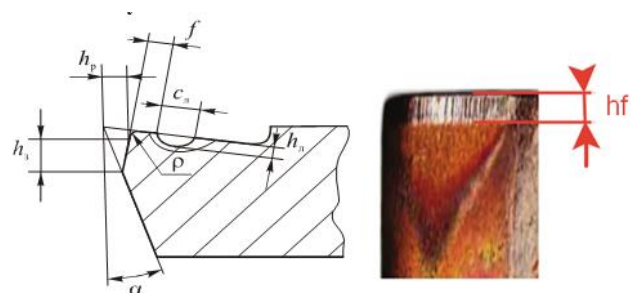


Рис. 3.4.2. Зоны износа токарного резца

несвободном резании длина фаски износа $h_{зп}$ на разных участках режущих кромок неравномерна. Она несколько увеличена на вершине резца (точка A), где высокая температура и условия трения наиболее неблагоприятны. Иногда на краю площадки (точка B) наблюдается локальный износ в виде узкой проточки из-за контакта с упрочненным поверхностным слоем заготовки, загрязнённым твёрдыми окислами и нитридами.

Чтобы иметь стабильные данные при исследовании влияния износа на составляющие силы резания на главной задней поверхности режущей пластины затачивалась фаска длиной $h_3 = 1,2$ мм, измеряемая перпендикулярно главной режущей кромке, с задним углом $\alpha_h = 0^\circ$, моделирующая износ по задней поверхности. Радиус округления режущей кромки $\rho = 0,003$ мм соответствовал естественной заточке инструмента.

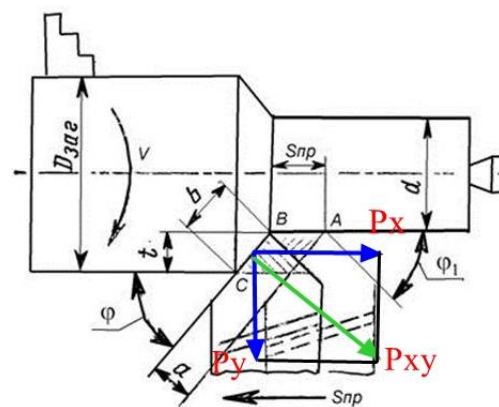


Рисунок. 3.4.3. Элементы резания при продольной токарной обработке

Резец устанавливался в динамометре и выполнялось резания со скоростью резания $v = 60$ м/мин с разной подачей s (мм/об). При косоугольном несвободном резании толщина среза a (мм) рассчитывалась по формуле $a = s \cdot \sin\phi$, где ϕ – главный угол в плане (рис. 3.4.3).

Эксперименты начинались с наибольшей длиной фаски, а уменьшение её выполнялось заточкой по задней поверхности, что гарантировало неизменность заднего угла на фаске $\alpha_h = 0^\circ$. После переточки резца по задней поверхности он устанавливался на динамометр и производилась настройка на прежнюю глубину резания.

Большое внимание было уделено постоянству условий стружкообразования, поэтому, как уже упоминалось ранее, выполнялось точение периферии диска из титанового сплава ВТЗ-1 резцом с радиальной подачей.

Методом экстраполяции на нулевую толщину среза ($a = 0$ мм) были выделены силы, действующие на передней и на задней поверхности. Составляющие силы резания при каждой длине искусственной фаски износа на задней поверхности заносились в таблицу 3.4.1, рассчитывалось расстояние от режущей кромки до середины рассматриваемого участка h_{mi} (колонка № 2). Для этих точек (расстояний) от режущей кромки рассчитывались удельные контактные нагрузки (или напряжения) на фаске.

Таблица 3.4.1 – Влияние длины фаски на задней поверхности h_f на составляющие силы резания. ВТЗ-1 – ВК8, $s_{\text{рад}} = 0,21$ мм/об, т.е. $a = 0,21$ мм, $v = 60$ м/мин, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha_h = 0^\circ$, $\rho = 0,005$ мм

h_f , мм	$h_{m i}$, мм	Δh_f , мм	P_z , Н	$P_{z n}$, Н	$P_{z h} \rightarrow F_h$, Н	$q_{P_z h} = q_{F h}$, Н/мм ² $\rightarrow \tau_h$	P_y , Н	$P_{y n}$, Н	$P_{y h} \rightarrow N_h$, Н	$q_{P_y h} = q_{N h}$, Н/мм ² $\rightarrow \sigma_h$	μ_h
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1,00		0,1	1526	700	826	191	4704	460	4244	874	0,218
0,95	0,95				$\Delta=44$	191			$\Delta=206$	874	0,218
0,9		0,1	1482	700	782	191	4498	460	4038	896	0,213
0,85	0,85				$\Delta=44$	191			$\Delta=224$	909	0,210
0,8		0,1	1438	700	738	191	4274	460	3814	974	0,196
0,75	0,75				$\Delta=44$	191			$\Delta=237$	974	0,196
0,7		0,1	1394	700	694	191	4037	460	3577	1030	0,185
0,65	0,65				$\Delta=44$	191			$\Delta=265$	1091	0,175
0,6		0,1	1350	700	650	191	3772	460	3260	1152	0,166
0,55	0,55				$\Delta=44$	191			$\Delta=368$	1374	0,139
0,5		0,1	1306	700	606	200	3404	460	2944	1600	0,125
0,45	0,45				$\Delta=65$	226			$\Delta=552$	2400	0,094
0,4		0,1	1241	700	541	282	2852	460	2392	2600	0,108
0,35	0,35				$\Delta=78$	339			$\Delta=598$	2600	0,130
0,3		0,1	1163	700	463	417	2254	460	1794	2600	0,160
0,25	0,25				$\Delta=115$	500			$\Delta=598$	2600	0,192
0,2		0,1	1048	700	348	596	1656	460	1196	2600	0,229
0,15	0,15				$\Delta=158$	687			$\Delta=598$	2600	0,264
0,1		0,1	890	700	190	800	1058	460		2600	0,308
0,05	0,025	0,05			$\Delta=190$	826			$\Delta=598$	2600	0,318
0		0,1	700	700	0	850	460	460	0	2600	0,327

Пояснения к таблице 4.3.1: в колонке 8 и 9 при $h_f = 0$ мм $P_{y n} = 460$ Н – это сила на передней поверхности и на радиусном участке режущей кромки ($P_{y n+\rho}$). Всё что больше – за счёт фаски на задней поверхности.

Разница составляющей силы резания при резании с фаской (P_z или P_y) и этой же составляющей силой на передней поверхности ($P_{z n}$ или $P_{y n}$) записывалась в колонку № 6 или 10 как соответствующая технологическая сила на фаске задней поверхности и как касательная F_h или нормальная N_h физическая составляющая сила на фаске ($P_{z h} = F_h$ или $P_{y n} = N_h$).

Разница силы на рассматриваемом участке № i с силой на предыдущем участке № $i-1$ принималась как сила, действующая на участке шириной b , равной ширине диска, и длиной $\Delta h_i = h_i - h_{i-1}$. Необходимо отметить, что при проведении эксперимента при переточке по задней поверхности длина фаски

$h = h_f$ уменьшалась, а значит и уменьшались силы резания. В таблицах длина фаски и эти силы записывались сверху вниз, но расчёт контактных нормальных σ_h и касательных τ_h контактных напряжений на фаске выполнялся снизу вверх, т.е. от острого резца к более изношенному. Поэтому $h_i > h_{i-1}$, а значит и сила $P_{zi} > P_{zi-1}$, а также $P_{yi} > P_{yi-1}$.

Конечно, правильнее говорить «расчёт удельных контактных нагрузок на фаске износа», т.к. изменение длины фаски $\Delta h_i = 0,1$ мм не приближается к нулю. Например, нормальные удельные контактные нагрузки на фаске износа в точке i : $q_{Nhi} = \Delta N_{hi} / \Delta S$, где $\Delta N_{hi} = N_{hi} - N_{hi-1} = P_{yi} - P_{yi-1}$ – это изменение (приращение) нормальных сил на фаске износа; ΔS_{hi} – изменение площади фаски на задней поверхности: $\Delta S_h = \Delta h_i \times b = (h_i - h_{i-1}) \times b$. Касательные удельные контактные нагрузки на фаске износа в точке i :

$$q_{Fhi} = \Delta F_{hi} / \Delta S \text{ (Н/мм}^2\text{) (или МПа, т.к. } 1 \text{ Н/мм}^2 = 1 \text{ МПа)}.$$

Однако, учитывая небольшое изменение длины фаски $\Delta h_i = 0,1$ мм при проведении экспериментов, принимаем, что получаем контактные напряжения, т.е. $q_{Fhi} \approx \tau_{hi}$ и $q_{Nhi} \approx \sigma_{hi}$, которые записываем в колонки 7 и 11 таблиц. Для середины рассматриваемого участка рассчитывается приращение силы на этом участке, которое делится на приращение площади рассматриваемого участка $S_h = \Delta h_i \times b = 0,1 \times 2,3 = 0,23 \text{ мм}^2$. Колонки (графы) 5 и 9 можно убрать, т.к. там нет изменений, но они необходимы для логики расчётов. Колонки 6 и 10 тоже можно убрать, т.к. для расчёта приращения сил можно использовать данные колонок 4 и 8, но они необходимы для логики расчётов, т.к. в них в строках с жёлтой заливкой указаны середины интервалов ($h_{mi} = 0,05; 0,15; 0,25$ и т.п.), а символом Δ указывается величина силы на фаске, приходящейся только на рассматриваемый интервал.

В колонку 12 таблиц записываем величину условного коэффициента трения на рассматриваемом i -том участке фаски задней поверхности: $\mu_{hi} = \tau_{hi} / \sigma_{hi}$. Условным коэффициент трения называется потому, что при резании не происходит трения скольжения в традиционном виде, а имеется пластическая деформация слоёв материала относительно друг друга.

По данным таблицы 3.4.1 были построены графики зависимости технологических сил P_z и P_y от длины искусственной фаски износа по задней поверхности h_f (рис. 3.4.4, б).

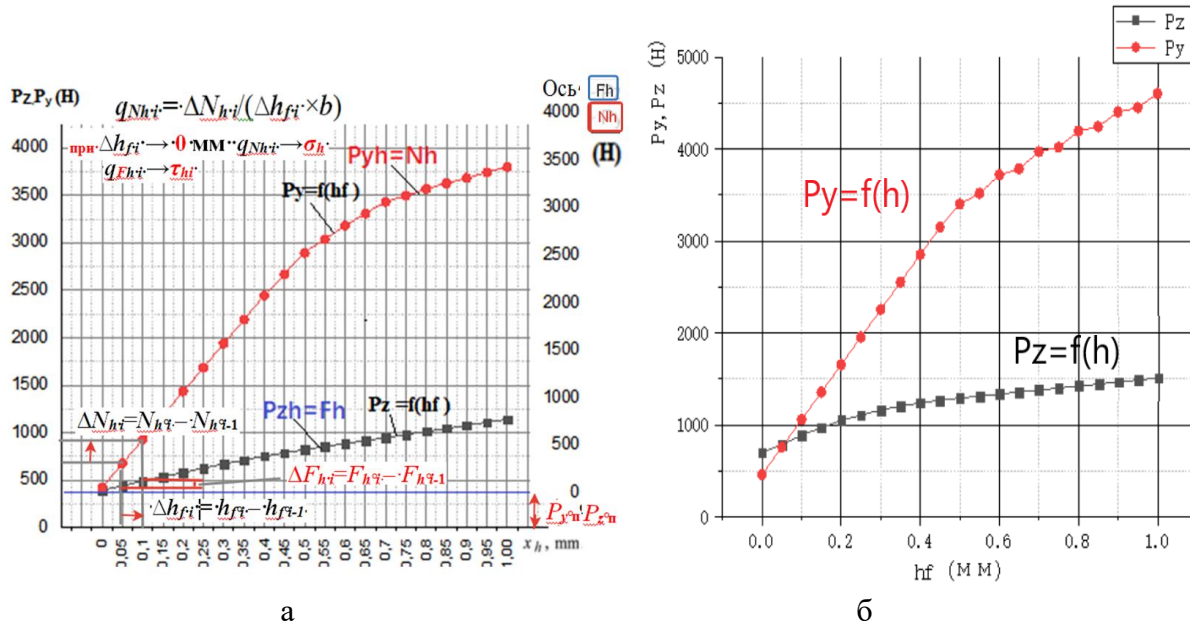


Рисунок. 3.4.4. Зависимость технологических составляющих P_z и P_y силы резания (Н) от длины искусственной фаски износа по задней поверхности h_f (мм). ВТ3-1 – ВК8, $v = 60$ м/мин, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha_h = 0^\circ$, $\rho = 0,005$ мм, $b = 2,3$ мм. а - $s = 0,11$ мм/об ($a = 0,11$ мм); б - $s = 0,21$ мм/об ($a = 0,21$ мм).

ВТ3-1-ВК8, $v = 60$ м/мин, $b = 2,3$ мм, $\gamma = 0^\circ$, $s = 0,21$ мм/об, т.е. $a = 0,21$ мм.

При $h_f = 1,0$ мм $P_{y\text{п}} = P_{y\text{п+на } \rho \text{ уч-ке}} = 480$ Н, т.к. их нет на фаске:

$$N_{h\text{ экс}} = P_{y\text{ h}} = P_{y\text{ общ}} - P_{y\text{ п}} = 4704 - 460 = 4244 \text{ Н.}$$

Силу $P_{y\text{ общ}}$ (по $\sigma_h + P_{y\text{ п} + \rho}$) = 4992 Н **сравниваем** с силой $P_{y\text{ общ экс}} = 4704$ Н.

Рассчитываем относительную погрешность расчёта силы $P_{y\text{ общ}}$ с учётом эпюры нормальных контактных напряжений на фаске задней поверхности σ_h :

$$\delta_{P_y} = (P_{y\text{ общ}} \text{ (по } \sigma_h + P_{y\text{ п}}) - P_{y\text{ общ экс}}) / P_{y\text{ общ экс}} = (4992 - 4704) / 4704 = +0,061 = +6,1\%$$

Силу $P_{z\text{ общ}}$ (по $\tau_h + P_{z\text{ п} + \rho}$) = 1612 Н **сравниваем** с $P_{z\text{ общ экс}} = 1526$ Н.

Рассчитываем относительную погрешность расчёта силы $P_{z\text{ общ}}$ с учётом эпюры касательных контактных напряжений на фаске задней поверхности τ_h :

относительная погрешность расчёта по эпюрам σ_h $\Delta_N \sigma_h$:

$$\delta_{P_z} = (P_{z\text{ общ}} \text{ (по } \sigma_h + P_{y\text{ п}}) - P_{z\text{ общ экс}}) / P_{z\text{ общ экс}} = (1612 - 1526) / 1526 = +0,056 = +5,6\%$$

Выполняем расчёты среднего условного коэффициента трения на фаске задней поверхности по силам на фаске задней поверхности из экспериментов $F_{h \text{ эксп}}$ и $N_{h \text{ эксп}}$, а также по эюрам τ_h и σ_h . При $s=0,21$ мм/об, т.е. $a = 0,21$ мм:

$$\mu_{h \text{ ср эксп}} = F_{h \text{ эксп}} / N_{h \text{ эксп}} = 826/4244 = 0,195;$$

$$\mu_{h \text{ ср эюр}} = F_{h \text{ эюр}} / N_{h \text{ эюр}} = F_{h \tau} / N_{h \sigma} = 940/4502 = 0,209.$$

Выполняем расчёты среднего условного коэффициента трения на передней поверхности при $s=0,21$ мм/об, т.е. $a = 0,21$ мм (см. рис. 3.3.1):

$$\mu_{п \text{ ср эксп}} = F_{п \text{ эксп}} / N_{п \text{ эксп}} = 40/(700-35) = 0,06. \text{ (учитываем силы только на передней поверхности).}$$

Удельная нормальная нагрузка на фаске задней поверхности при $h_f=1,7$ мм: $q_{N h} = 4812 / (2,3 \times 1,7) = 1230 \text{ Н/мм}^2 = 1230 \text{ МПа};$

Удельная касательная нагрузка на фаске задней поверхности при $h_f=1,7$ мм: $q_{F h \tau} = 806 / (2,3 \times 1,7) = 206 \text{ Н/мм}^2 = 206 \text{ МПа}.$

Средний условный коэффициент трения на фаске задней поверхности:
 $\mu_{h \text{ ср } q} = q_{F h \tau} / q_{N h \sigma} = F_{h \tau} / N_{h \sigma} = 206/1230 = 0,167.$

Аналогичные таблицы заполнялись и для других подач (толщин среза). По результатам расчётов контактных напряжений на искусственной фаске по задней поверхности были построены их эюры (рис. 3.4.5 и 3.4.8).

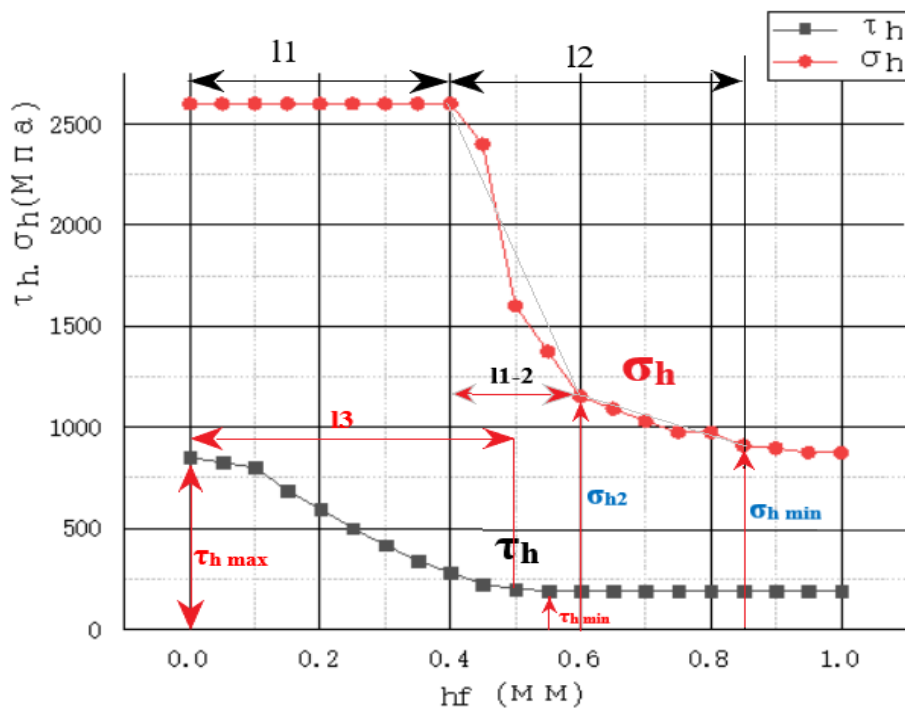


Рисунок 3.4.5. Эпюры нормальных σ_h и касательных τ_h контактных напряжений на искусственной фаске износа по задней поверхности и основные параметры этих эпюр. ВТЗ-1 – ВК8, $s = 0,21$ мм/об, $v = 60$ м/мин, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha_h = 0^\circ$, $\rho = 0,005$ мм.

По эпюрам контактных напряжений на искусственной фаске по задней поверхности были построены графики изменения условного коэффициента трения на фаске $\mu_{hi} = \tau_{hi} / \sigma_{hi}$ вдоль фаски по задней поверхности (рис. 3.4.6). Уменьшение условного коэффициента трения при отдалении от режущей кромки объясняется нами уменьшением предела прочности на сдвиг (на срез) слоя титанового сплава, непосредственно контактирующего с фаской задней поверхности. Увеличение температуры приводит к уменьшению предела прочности с некоторым замедлением при высокой скорости деформаций [12].

Дальнейшее увеличение условного коэффициента трения при ещё большем отдалении от режущей кромки объясняется нами увеличением предела прочности на сдвиг из-за уменьшения температуры приконтактного слоя заготовки, т.к. тепло более интенсивно отводится в тело инструмента из-за отдаления от основного источника (зоны первичных пластических деформаций, и увеличения поперечного сечения тела режущего клина.

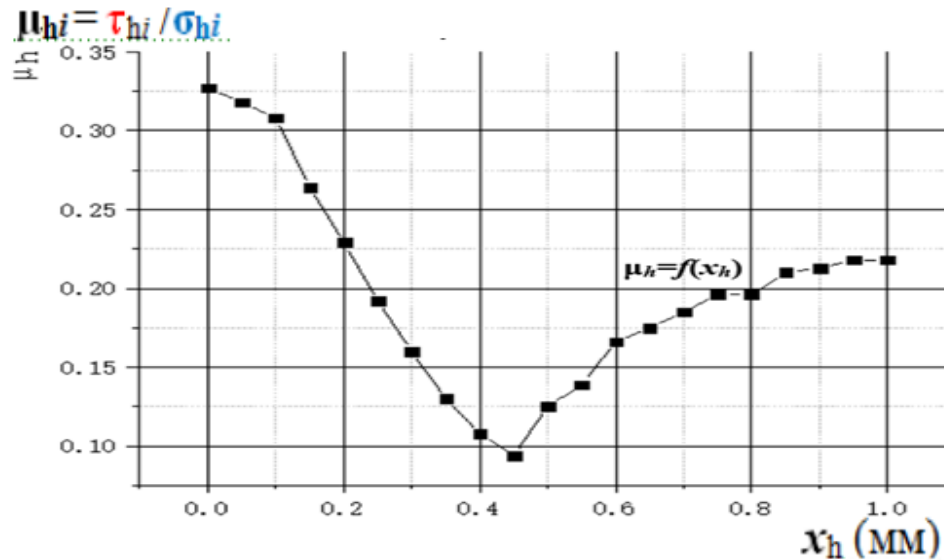


Рисунок. 3.4.6. Изменение условного коэффициента трения на фаске задней поверхности $\mu_{hi} = \tau_{hi} / \sigma_{hi}$ вдоль фаски

График влияния толщины среза a на величину условного коэффициента трения на фаске у **режущей кромки** μ_h показывает, что с уменьшением толщины среза средний условный коэффициент трения на фаске уменьшается. Это объясняется нами увеличением температура из-за ухудшения теплоотвода в тонкую стружку и концентрацией тепла в верхнем слое заготовки, что приводит к уменьшению предела прочности на сдвиг приконтактного слоя заготовки.

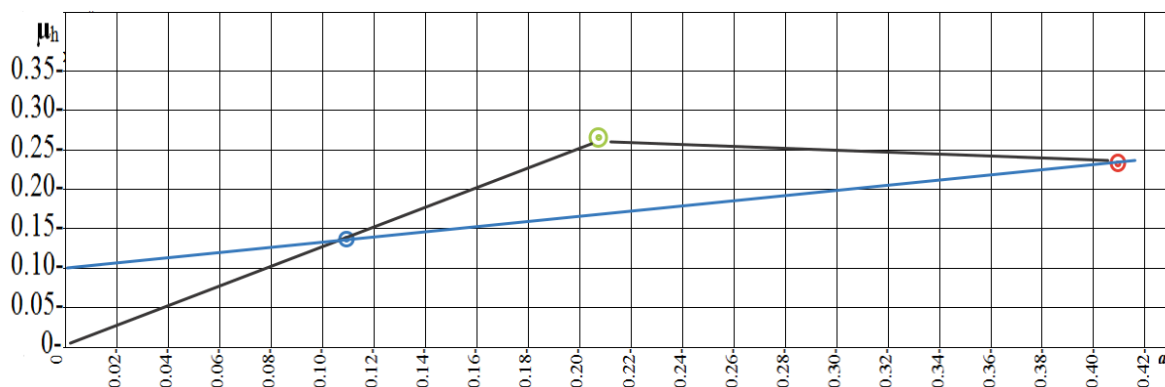


Рисунок 3.4.7. Зависимость коэффициента трения μ_h у **режущей кромки** от толщины среза a (мм). Два возможных варианта графика $\mu_{h,р.кр} = f(a)$.

Касательные контактные напряжения на **передней** поверхности τ очень малы ($\tau = 57,6-71,8$ МПа) в зависимости от толщины среза a , что связано с большой температурой на поверхностях режущего инструмента при обработке титанового сплава ВТЗ-1 с большой скоростью резания $v = 60$ м/мин. Высокая температура приконтактного слоя поверхности стружки приводит к уменьшению его предела прочности на сдвиг, а значит и к уменьшению τ на участке пластического контакта стружки. Чем больше толщина среза, тем меньше величина τ , что подтверждает наше предположение, т.к. увеличение толщины среза приводит к увеличению температуры резания.

На искусственной фаске износа по задней поверхности очень большая величина **нормальных** контактных напряжений у режущей кромки $\sigma_{h \max} = 3400$ МПа при $a = 0,41$ мм.

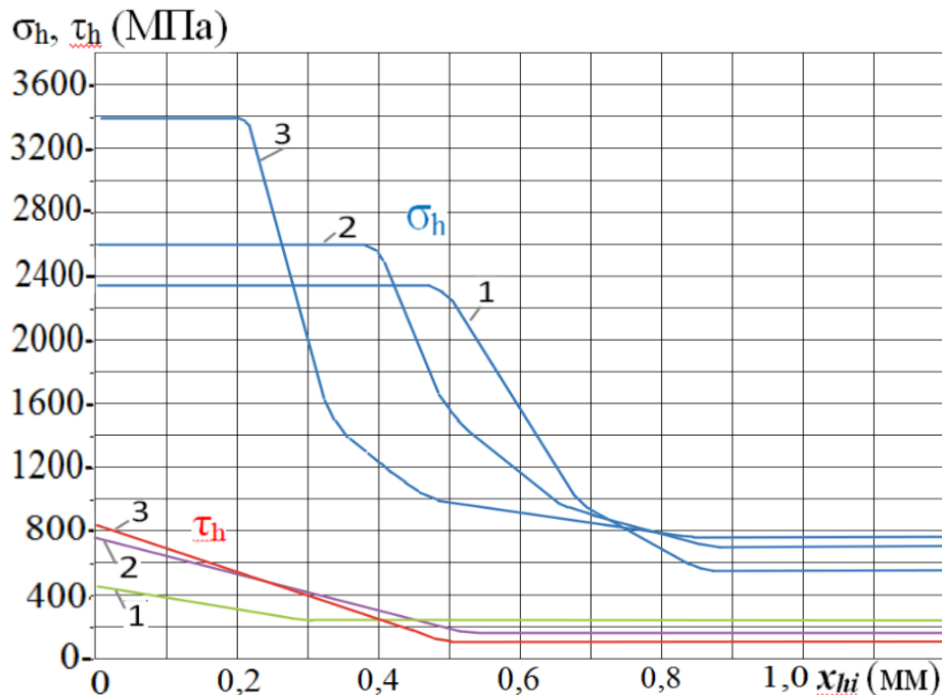


Рисунок 3.4.8. Распределение **нормальных** σ_h и **касательных** τ_h контактных напряжений (МПа) на искусственной **фаске износа** по задней поверхности инструмента при обработке **титанового сплава** ВТЗ-1. 1 – $a = 0,11$ мм; 2 – $a = 0,21$ мм; 3 – $a = 0,41$ мм. Абсцисса – расстояние от режущей кромки вдоль длины фаски на задней поверхности x_{hi} (мм)

Быстрое уменьшение нормальных контактных напряжений σ_h при отдалении от режущей кромки более 0,2-0,5 мм объясняется нами уменьшением прочности при повышении температуры и объясняет работоспособность сильно изношенных по задней поверхности режущих инструментов при обработке титановых сплавов.

Сравнительно небольшая величина касательных контактных напряжений $\tau_{h \max} = 420-820$ МПа объясняется уменьшением предела прочности на сдвиг на участке контакта заготовки с фаской износа из-за большой температуры резания, что также вызывает их дальнейшее уменьшение до 100-200 МПа.

Сравнение эпюр контактных напряжений на фаске износа по задней поверхности при обработке титанового сплава (рис. 3.4.8) и стали (рис. 3.4.9) показывает противоположный характер изменения контактных напряжений на фаске при отдалении от режущей кромки.

Это связано с разным характером стружкообразования: при обработке стали образуется

сливная стружка, поэтому на передней поверхности будет постоянно действовать радиальная составляющая сила P_{yn} , под действием которой поверхность резания в зоне первичных пластических деформаций немного проседает на величину U_h (рис. 3.4.3, б, верхний кадр фотографии) из-за упругой деформации материала заготовки в этой области (красная

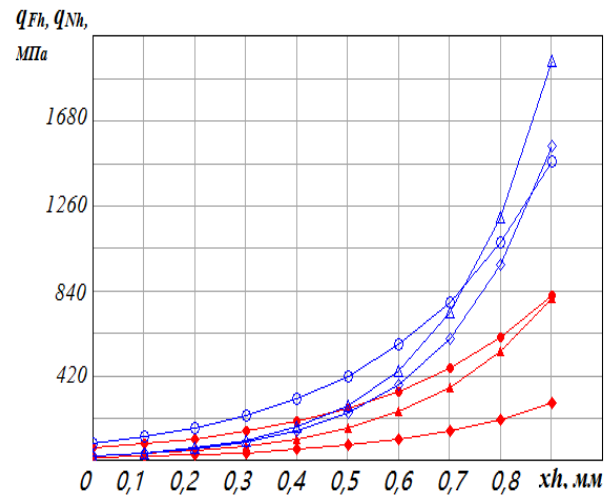


Рисунок 3.4.9. Распределение нормальных q_{Nh} (\diamond , Δ , \circ) и касательных q_{Fh} (\blacklozenge , \blacktriangle , \bullet) удельных контактных нагрузок (МПа) на фаске задней поверхности резца при обработке стали 40X, образующую сливную стружку. $\varphi = 45^\circ$, $v = 120$ м/мин, $t = 2$ мм.
 \diamond , \blacklozenge - $s=0,34$ мм/об; Δ , \blacktriangle - $s = 0,23$ мм/об;
 \circ , \bullet - $s = 0,11$ мм/об. Абсцисса – расстояние от режущей кромки вдоль фаски задней поверхности x_{hi} (мм).

горизонтальная линия по отношению к горизонтальными зелёной и фиолетовой) (рис. 3.4.10, а).

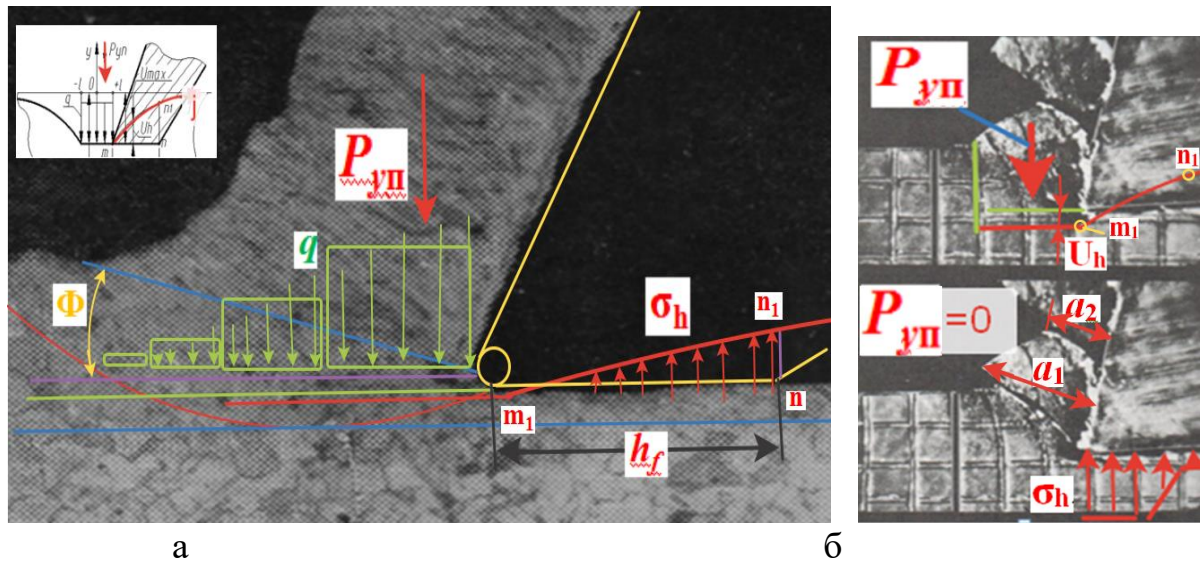


Рисунок 3.4.10. Прогиб поверхности резания m_1n_1 как результат упругого восстановления поверхности резания после упругой деформации материала заготовки в области стружкообразования под действием радиальной составляющей силы на передней поверхности $P_{уп}$ при **сливном** стружкообразовании (а) и упругое восстановление поверхности резания после отделения сформировавшегося элемента стружки при **элементном** стружкообразовании (б). Пример указан для строгания, но то же происходит и главной секущей плоскости при точении.

Упруго восстанавливающаяся поверхность резания m_1n_1 после прохождения режущей кромки (правее её на рис. 3.4.10, б) давит на фаску износа по задней поверхности длиной h_f , что приводит к появлению нормальных контактных напряжений на этой фаске σ_h . Чем больше расстояние упруго восстанавливающейся поверхности резания m_1n_1 от поверхности фаски износа, тем больше будет текущая величина σ_{hi} . Поэтому контактные напряжения на фаске износа по задней поверхности увеличиваются при отдалении от режущей кромки при образовании **сливной** стружки, как на рис. 3.4.9 при резании стали 40Х.

При обработке титановых сплавов происходит образование **элементной** или суставчатой стружки, близкой к элементной из-за слабой связи элементов

стружки только по тонкому прирезцовому слою из-за её сплавления в приконтактном слое стружки (рис. 3.4.10, б). При формировании стружки радиальная составляющая сила $P_{yп}$ давит на поверхность среза (резания), в результате чего поверхность резания в зоне первичных пластических деформаций немного проседает на величину U_n из-за упругой деформации материала заготовки в этой области (красная горизонтальная линия) (рис. 3.4.10, б). При отделении сформировавшегося элемента стружки сила резко уменьшается практически до нуля, что приводит к упругому восстановлению поверхности резания и она давит на поверхность фаски износа по задней поверхности. Это приводит к появлению больших нормальных контактных напряжений на этой фаске σ_n вблизи режущей кромки, как это наблюдается при обработке титанового сплава ВТЗ-1 на рис. 3.4.8.

Чем больше толщина среза a , тем больше радиальная составляющая $P_{yп}$, тем больше упругая деформация материала заготовки в области формирования стружки, тем больше будет последующее упругое восстановление поверхности резания (среза), а значит и больше нормальное контактное напряжение σ_n на фаске износа по задней поверхности вблизи режущей кромки (см. рис. 3.4.1).

При **уменьшении** модуля упругости первого рода E (модуля Юнга), величина упругого восстановления **увеличивается**, поэтому и большая величина нормальных контактных напряжений σ_n на фаске износа по задней поверхности вблизи режущей кромки при обработке титановых сплавов, у которых модуль упругости E почти в 2 раза меньше, чем у стали.

Модуль упругости Юнга $E = \sigma / \varepsilon$ (Н/мм²) или МПа, σ – напряжение в образце (Н/мм²) при относительной деформации $\varepsilon = \Delta l / l$, где Δl – разница длины образца l_1 после приложении силы растяжения P (Н), создающей напряжение растяжения $\sigma = \sigma_{\text{раст}}$ и первоначальной длиной образца l до приложения силы P : $\Delta l = l_1 - l$ (мм).

Доказательством влияния характера стружкообразования являются результаты исследования сплошности стружки K_{a2} – отношения расстояния от точки контакта элементов стружки до прирезцово́й поверхности стружки a_2 к толщине стружки a_1 , т.е. $K_{a2} = a_2 / a_1$ (см. рис. 3.4.10, б). На рис. 3.4.11 .

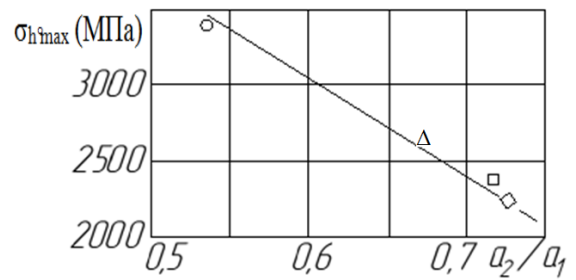


Рисунок 3.4.11. Влияние коэффициента сплошности стружки $K_{a2} = a_2/a_1$ на величину наибольшего нормального контактного напряжения на фаске задней поверхности $\sigma_{h\max}$ (МПа) при обработке титанового сплава ВТ3-1. ВТ-3-ВК8, $\gamma=0^\circ$, $v=60$ м/мин, $\alpha_\phi = \alpha_h = 0^\circ$: о - $a=0,41$ мм; Δ - $a=0,21$ мм/об; \diamond - $a=0,11$ мм; \square - $a=0,21$ мм/об, $v=30$ м/мин.

3.5. Исследование процесса фрезерования торцовой фрезой

При встречном фрезеровании торцовой фрезой зуб фрезы (СМП) начинает резать с нулевой толщиной среза, т.е. $a=0$ мм. Поэтому обрабатываемый материал вдавливается по режущую кромку, которая всегда имеет округление радиусом r (мм), зависящим от степени износа, а у неизношенного зуба или СМП зависит от зернистости инструментального материала, переднего и заднего угла, наличия износостойкого покрытия, которое существенно увеличивает радиус округления [4, 5].

Наличие фаски износа по задней поверхности существенно увеличивает технологические силы при врезании, особенно радиальную составляющую (рис. 3.5.1, а), т.к. в момент контакта фаска давит на поверхность заготовки и достаточно долгое время не даёт режущей кромки внедриться в заготовку. В это время нет образования стружки, а только давление и трение по фаске.

В начальный момент все составляющие резко увеличиваются, а после появления стружки быстро уменьшаются, но не до нуля. При дальнейшем повороте фрезы силы начинают увеличиваться, т.к. увеличивается толщина среза a_i (мм). К моменту выхода зуба из контакта с заготовкой силы имеют

большую величину, но при большом износе по задней поверхности они могут быть всё же меньше, чем при врезании (рис. 3.5.1, а).

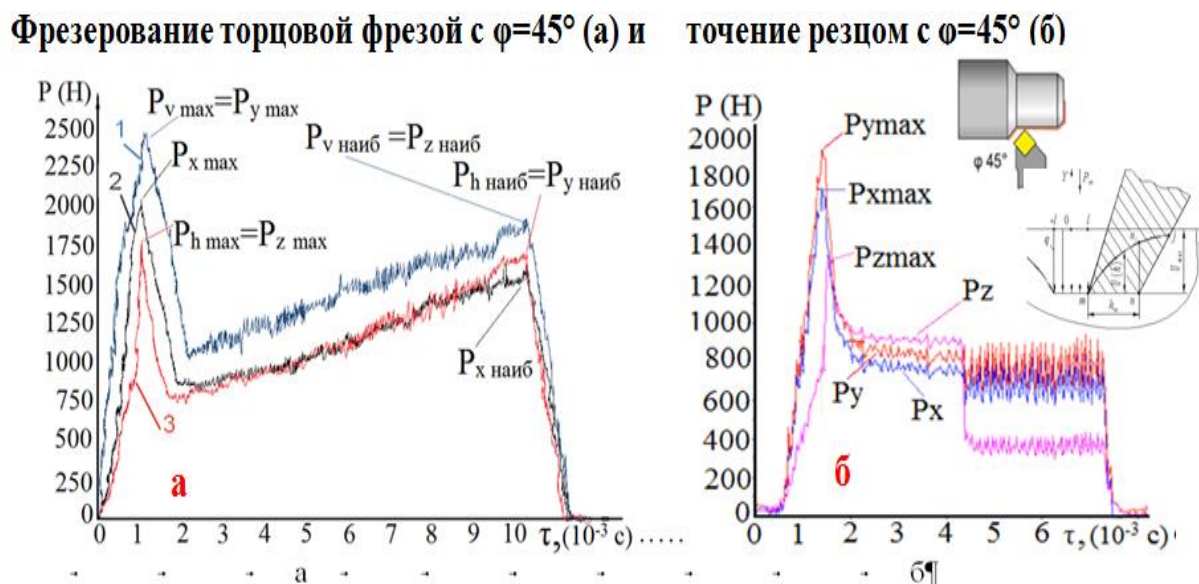


Рисунок 3.5.1. Графики изменения технологических составляющих силы резания при встречном фрезеровании торцовой фрезой с одним зубом с $\phi = 45^\circ$ (1 – P_v , 2 – P_x , 3 – P_h) (а) и при точении заготовки с врезанием резца с $\phi = 45^\circ$ в коническую поверхность, оставшуюся от предыдущего эксперимента (б). Сталь 40Х – Т15К6, $s = 0,07$ мм/об, $v = 120$ м/мин, $t = 1,8$ мм. Ордината – составляющие силы резания (Н), абсцисса – время обработки τ (с).

При фрезеровании с использованием динамометра можно измерить только силу в направлении минутной подачи $s_{\text{мин}}$ (мм/мин), т.е. P_h ; силу в поперечном направлении подачи, т.е. P_v , и осевую силу P_x , действующую вдоль оси вращения торцовой фрезы. Для расчёта зуба фрезы или СМП на прочность нам необходимо определить наибольшие силы: это или в момент врезания, или в момент выхода зуба из контакта с заготовкой.

Для расчёта зуба на прочность нам необходимо знать распределение контактных напряжений на передней поверхности и на фаске износа по задней поверхности. Для этого необходимо рассчитать физические составляющие силы резания: нормальную силу N и касательную силу F . Но для их расчёта требуется знать силы P_z , P_y и P_x . Сила P_x совпадает с осевой силой P_x , которая всегда имеет неизменное направление – вдоль оси вращения фрезы и нет проблем по её измерению динамометром.

Силы P_z и P_y измерить практически невозможно из-за вращения фрезы и изменения их направления. Эти силы можно измерить только в двух положениях зуба фрезы: при врезании зуба и при выходе из контакта, если ширина заготовки $B_{\text{заг}}$ будет равна половине диаметра фрезы $d_{\text{фр}}$, т.е. $B_{\text{заг}} = 0,5 \cdot d_{\text{фр}}$. В этом случае сила P_z будет направлена поперёк направления подачи, т.е. как сила P_v . Поэтому $P_z = P_v$ при выходе зуба из контакта при **встречном** фрезеровании. Сила P_y будет направлена вдоль направления подачи, т.е. как сила P_h . Поэтому $P_y = P_h$ при выходе зуба из контакта при **встречном** фрезеровании. Эти условия реализованы на рис. 3.5.1, а, и дополнительно пояснены схемой фрезерования на рис. 3.5.2 с указанием зелёной стрелкой.

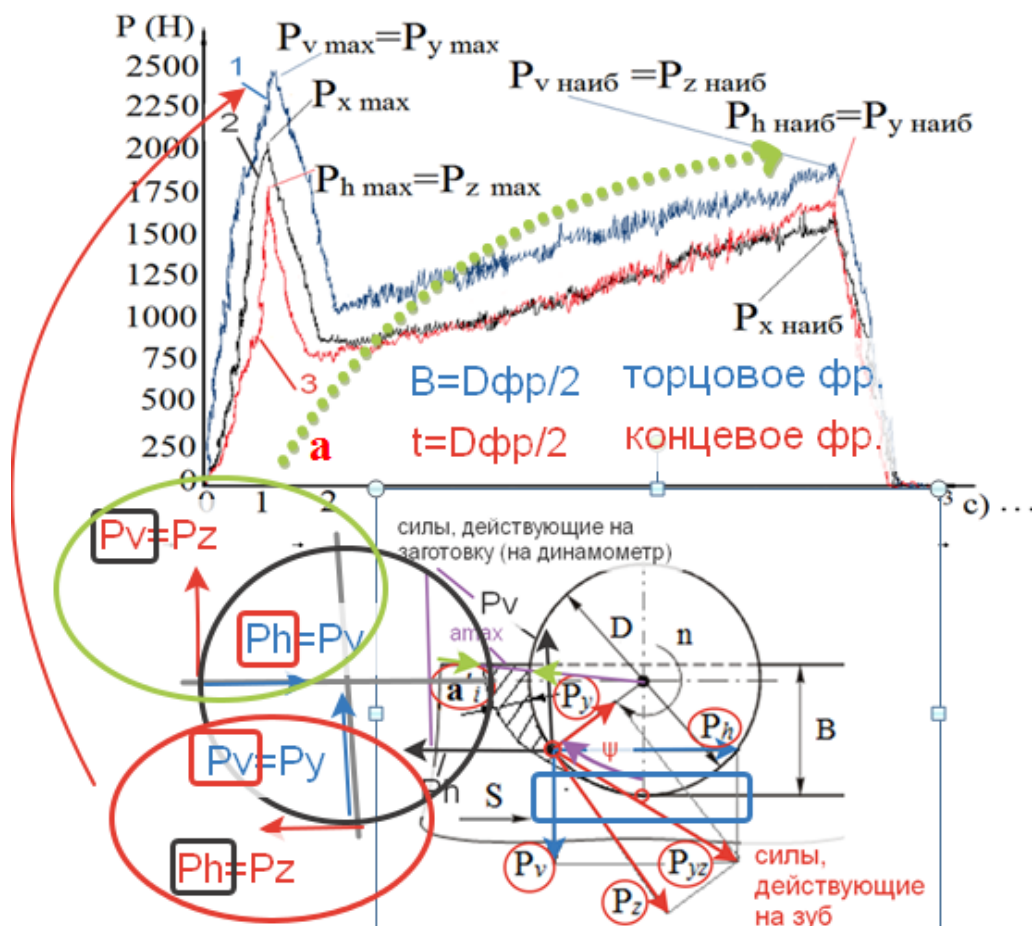


Рисунок 3.5.2. Графики изменения сил и схема направления сил при врезании и при выходе зуба фрезы из контакта при встречном фрезеровании, если $B_{\text{заг}} = d_{\text{фр}}/2$. Фрезерование торцовой фрезой с $\varphi=45^\circ$.

При врезании зуба сила P_z будет направлена вдоль направления подачи, т.е. как сила P_h . Поэтому $P_z = P_h$ при врезании зуба при **встречном** фрезеровании. Сила P_y будет направлена поперёк направления подачи, т.е. как сила P_v . Поэтому $P_y = P_v$ при врезании зуба при **встречном** фрезеровании. Эти условия реализованы на рис. 3.5.1, а, и дополнительно пояснены схемой фрезерования на рис. 3.5.2 с указанием красной стрелкой.

Зная наибольшие силы $P_{z \text{ наиб}}$ и $P_{y \text{ наиб}}$ у неизношенного зуба можно рассчитать физические силы, действующие на передней поверхности в момент входа зуба из контакта, т.к. было установлено, что на задней поверхности неизношенного зуба силы практически отсутствуют, по крайней мере, изменение заднего угла α от 5 до 18° не выявило изменений сил резания.

Если рассматривать врезание неизношенного зуба, то резкого увеличения, а затем уменьшения сил не наблюдалось, поэтому НДС неизношенного зуба при врезании не представляет интереса с точки зрения его прочности.

При работе зуба, изношенного по задней поверхности, пик сил при врезании зависит от длины фаски износа по задней поверхности: чем она больше, тем больше силы. При нагрузке 3D модели зуба нагрузка будет только на фаске износа, т.к. нет стружки, а значит, и нет сил на передней поверхности. Распределение контактных напряжений будет, наверное, равномерное, как при внедрении штампа в полупространство.

При выходе изношенного по задней поверхности зуба из контакта рассчитываются силы на фаске задней поверхности как разница сил при износе и у неизношенного зуба: $P_{z \text{ h}} = P_{z \text{ наиб}} - P_{z \text{ наиб острого}}$; $P_{y \text{ h}} = P_{y \text{ наиб}} - P_{y \text{ наиб острого}}$. Нормальная сила на фаске износа $N_h = P_{y \text{ h}}$, а касательная $F_h = P_{z \text{ h}}$.

Построение эпюр на фаске износа по задней поверхности и на передней поверхности выполняются как и при точении при соответствующей толщине среза $a = a_{\text{max}}$. Толщина среза при выходе зуба из контакта при концевом

фрезеровании концевой фрезой или торцевой с главным углом в плане $\varphi = 90^\circ$

$a_{\max} = s_z \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{t}{d} - \frac{t^2}{d^2}} \approx s_z \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{t}{d}}$, где s_z – подача на зуб (мм/зуб), t – глубина

резания; d – диаметр фрезы. При $\varphi < 90^\circ$ необходимо учесть этот угол:

$$a_{\max} \approx \sin \varphi \times s_z \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{t}{d}}.$$

На рис. 3.5.3 представлена схема действия составляющих силы резания при попутном фрезеровании концевой фрезой.

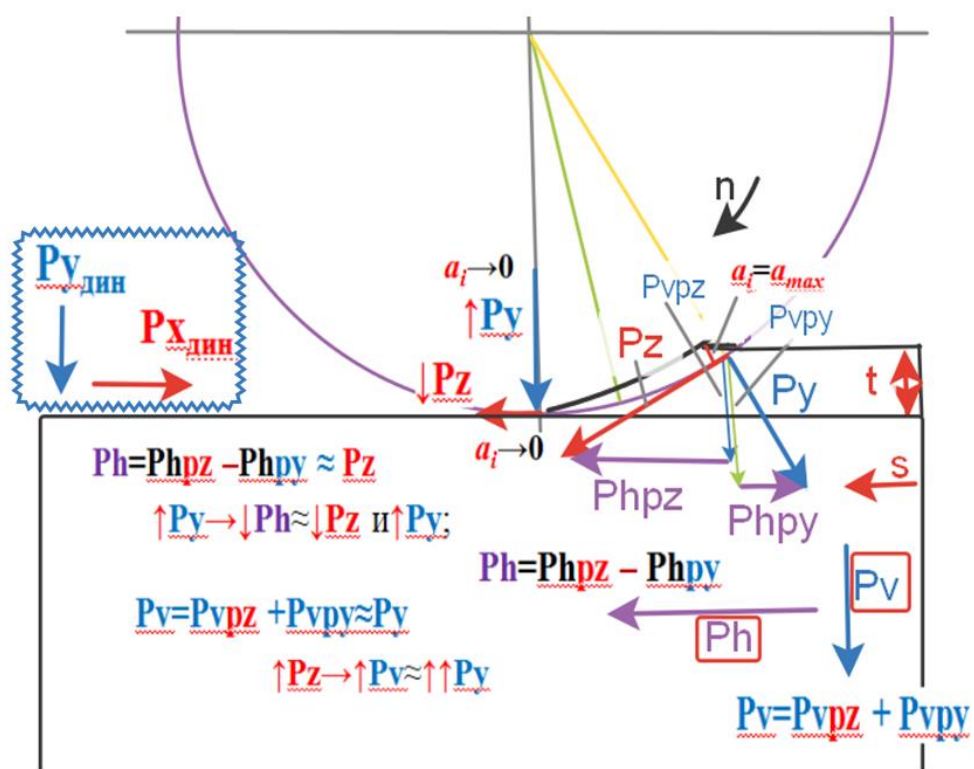


Рисунок 3.5.3. Схема изменения сил при врезании и при выходе зуба фрезы из контакта при попутном фрезеровании концевой фрезой с $\varphi = 90^\circ$. Волнистой линией обведены символы сил и их направление, указываемые на мониторе динамометра Kistler.

Для измерения составляющих P_z и P_y силы резания при врезании и установившемся резании выполнялось резание заготовки с продольной подачей s (мм/об) резцом с различной длиной искусственной фаски износа по задней поверхности с врезанием в коническую поверхность заготовки, оставшуюся после предыдущего резания. По графикам определялись составляющие силы резания для соответствующей толщины среза a , рассчитываемой по формуле $a = s \cdot \sin \varphi$ (мм) при врезании и при установившемся резанием (рис. 3.5.1, б).

3.6. Влияние радиуса округления режущей кромки на составляющие силы резания

Износ инструмента при резании титановых сплавов сопровождается округлением режущей кромки. При этом обычно повышаются и силы резания (рис. 3.6.1). В случае резания инструментом с округленной режущей кромкой следует разделять силы, действующие на радиусном участке передней поверхности, на радиусном участке задней поверхности и на плоском участке фаски задней поверхности.

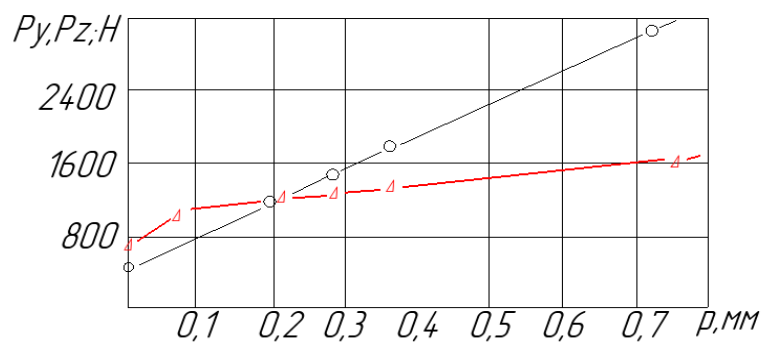


Рисунок. 3.6.1. Зависимость составляющих силы резания на передней поверхности P_z и P_y (Н) от радиуса округления режущей кромки ρ (мм). ВТЗ-1-ВК8, $\gamma=0^\circ$, $v = 60$ м/мин, $s = 0,21$ мм/об ($a = 0,21$ мм). ○ - P_y ; △ - P_z .

Но, даже зная силы на радиусном участке (как разница сил, полученных методами экстраполяции на нулевую толщину среза и на нулевую фаску износа [5]), трудно разделить её на составляющие, действующие на участках передней и задней поверхности. Достоверно неизвестно и расположение линии пересечения фактической поверхности среза с поверхностью радиусного участка.

Поэтому в данном разделе ограничимся изучением распределения контактных нагрузок на плоском участке фаски задней поверхности. При этом силы на передней поверхности и всем радиусном участке определялись методом экстраполяции на нулевую длину плоского участка фаски задней поверхности.

Увеличение радиуса округления режущей кромки приводит к смещению указанной линии пересечения в сторону передней поверхности (вверх) и, как следствие, к увеличению объема обрабатываемого материала, вдавливаемого под заднюю поверхность. Однако, количество материала, уходящего под заднюю поверхность, ограничено упругими свойствами обрабатываемого материала. Имеется три основных пути, по которым возможно увеличение этого объема. Во-первых, за счет увеличения скорости слоя обрабатываемого материала, проходящего под фаской задней поверхности, v_h . В этом случае увеличение объема вдавливаемого материала прямо пропорционально отношению скорости v_h и скорости резания v (v_h/v). Во-вторых, за счет увеличения упругой деформации материала заготовки под режущей кромкой $U_{h\ max}$. В этом случае объем вдавливаемого материала увеличится на столько, на сколько увеличится и $U_{h\ max}$.

И в первом, и во втором случаях будет пластическое поднятие поверхности резания, которое может быть зафиксировано приборами [5].

В-третьих, может происходить выдавливание обрабатываемого материала до бокам диска. В этом случае можно оценить его объём по увеличению объема заусенцев, снимаемых боковыми калибрующими резцами. Основная сложность заключается в точности определения

количества выдавленного материала, поскольку увеличение слоя под фаской задней поверхности даже на несколько микрон способно существенно увеличить силы на этой поверхности вследствие высокой жесткости контакта инструмента и заготовки.

По третьему пункту надо отметить, что в случае выдавливания контактные нагрузки будут оставаться на прежнем уровне (как и при отсутствии округления режущей кромки) либо будет наблюдаться их незначительное увеличение. И только при значительном увеличении температуры приконтактного слоя может произойти уменьшение контактных нагрузок вследствие выдавливания значительных объемов обрабатываемого материала, находящегося в очень пластичном состоянии. При этом должно наблюдаться и уменьшение длины плоского участка фаски задней поверхности, на котором происходит контакт инструмента с криволинейной обработанной поверхностью (при обработке диска). Однако возможно это, как уже отмечалось выше, только в том случае, если температура приконтактного слоя обрабатываемого материала существенно больше, чем при резании инструментом без округления режущей кромки.

Увеличение толщины слоя, подминаемого под режущую кромку, сопровождается увеличением напряжения, нормального к поверхности резания. При этом увеличение толщины вдавливаемого слоя будет прямо пропорционально увеличению нормального напряжения в зоне стружкообразования, а значит и силы $P_{уп}$ на передней поверхности. При этом должен происходить и рост нормальных контактных нагрузок на плоском участке фаски задней поверхности, и длины этого участка, на котором происходит взаимодействие инструмента с заготовкой.

При увеличении скорости перемещения обрабатываемого материала под фаской задней поверхности (по сравнению со скоростью резания), на фотоснимках шлифов корней стружек должен наблюдаться слой со структурой, отличной от основного материала. Толщина этого слоя должна быть порядка нескольких микрометров, т.к. при меньших его размерах

описываемый эффект будет иметь ничтожное значение. При этом пластичном состоянии материала в контактном слое под задней поверхностью коэффициент трения должен иметь очень малое значение.

Влияние радиуса округления может быть заметным только при отсутствии нароста. С увеличением радиуса округления увеличивается и вероятность образования нароста [4, 5].

Появление нароста или застойной зоны приводит, как правило, к уменьшению толщины слоя обрабатываемого материала, уходящего под заднюю поверхность. Линия раздела смещается вниз, от передней поверхности к задней. При этом должно наблюдаться уменьшение нормальных контактных нагрузок и протяженность плоского участка фаски задней поверхности, взаимодействующего с обработанной поверхностью.

На рис 3.6.2 представлены эпюры контактных нагрузок на плоском участке фаски задней поверхности при резании титанового сплава ВТ3-1 резцами с различными радиусами округления ρ (мм).

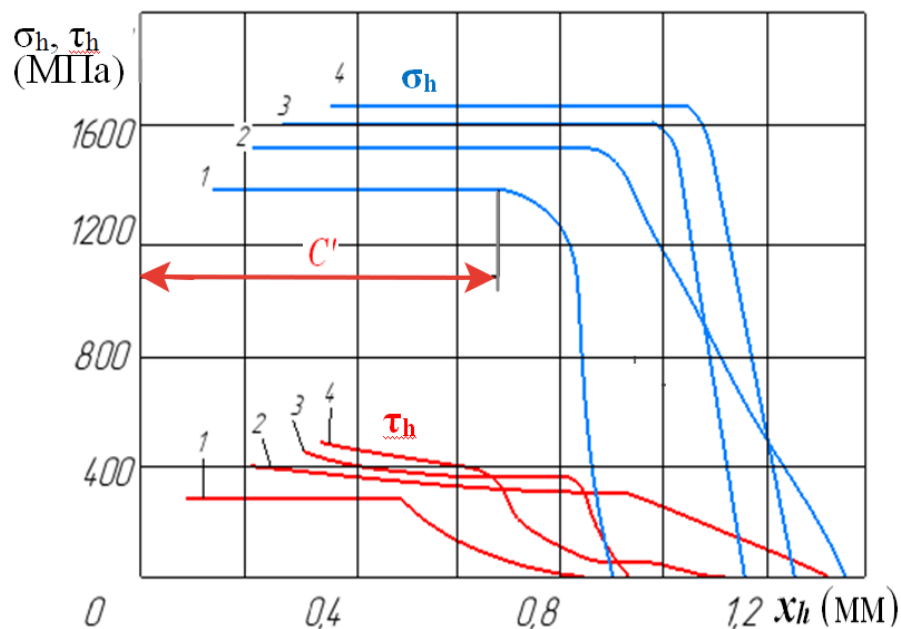


Рисунок 3.6.2. Влияние радиуса округления режущей кромки ρ (мм) на распределение контактных напряжений на искусственной фаске износа по задней поверхности. ВТ-3-ВК8, $v = 60$ м/мин, $s = 0,21$ мм/об, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 18^\circ$. 1 — $\rho = 0,07$ мм; 2 — $\rho = 0,2$ мм; 3 — $\rho = 0,28$ мм; 4 — $\rho = 0,35$ мм.

В целом величина наибольших нормальных контактных нагрузок уменьшается в 2 раза при появлении округления режущей кромки. Величина наибольших контактных нагрузок $\sigma_{h \max}$, $\tau_{h \max}$ и длина горизонтального участка эпюры σ_h c' прямо пропорциональны радиусу округления ρ (рис. 3.6.3, что объясняется увеличением объёма материала, вдавливаемого под режущую кромку. Происходит это за счёт увеличения упругой деформации материала заготовки в области стружкообразования, что косвенно подтверждается прямо пропорциональной зависимостью силы P_{ym} на передней поверхности инструмента от радиуса округления (рис. 3.6.3). При этом предполагается, что угол наклона условной плоскости сдвига изменяется незначительно, а значит и среднее напряжение, нормальное к поверхности резания в области стружкообразования, будет увеличиваться.

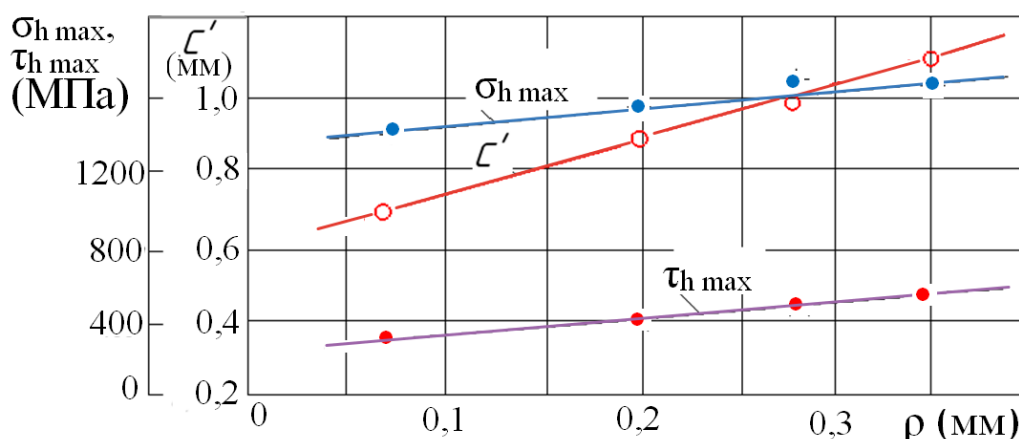


Рис. 3.6.3. Зависимость величины наибольших нормальных $\sigma_{h \max}$ и касательных $\tau_{h \max}$ контактных напряжений (МПа) и длины горизонтального участка c' (мм) эпюры нормальных контактных напряжений σ_h от радиуса округления режущей кромки ρ (мм)

Поскольку при проведении опытов не наблюдалось увеличения объема заусенцев, снимаемых боковыми калибрующими резцами, то уменьшение нормальных контактных нагрузок при округлении режущей кромки нельзя объяснить выдавливанием обрабатываемого материала по бокам диска.

Уменьшение уровня нормальных нагрузок обусловлено, на наш взгляд, появлением застойной зоны в области округленной режущей кромки, о чем

свидетельствует и сохранение на радиусном участке резца рисок, оставленных при заточке шлифовальным крутом. Увеличение составляющих силы резания на передней поверхности при округлении режущей кромки объясняется небольшими размерами застойной зоны, не позволяющими компенсировать рост сопротивления стружкообразованию со стороны передней поверхности. Для изменения же нормальных контактных нагрузок на фаске достаточно даже незначительных изменений застойной зоны в связи с жесткостью контакта по задней поверхности.

Сходные условия создаются, на наш взгляд, и при резании с большим отрицательным передним углом. Так, при резании ВТЗ-1 с передним углом $\gamma = -30^\circ$, радиальная составляющая силы резания на передней поверхности $P_{yп} = 1400$ Н, что больше в 3 раза, чем при резании с передним углом $\gamma = 0^\circ$ ($P_{yп} = 440$ Н). В то же время уровень нормальных контактных нагрузок вдвое меньше. Обращает на себя внимание примерное равенство нормальных контактных нагрузок на фаске при резании инструментом с большим отрицательным передним углом ($\gamma = -30^\circ$, $\sigma_h = 1300$ МПа) и с округленной режущей кромкой ($\rho = 0,07...0,35$ мм, $\sigma_h = 1370...1650$ МПа) при одинаковых режимах обработки.

Постоянство коэффициента трения на плоском участке фаски у режущей кромки $\mu_h \approx 0,25$ свидетельствует об одинаковом изменении нормальных и касательных контактных напряжений на фаске износа, тем более увеличиваются они незначительно при существенном увеличении радиуса округления. Но примерно такая же величина и у среднего коэффициента трения на фаске износа при резании инструментом без округления режущей кромки с нулевым передним углом $\gamma = 0^\circ$ ($\mu_{h\text{ ср}} = 0,26...0,28$).

Уменьшение касательных нагрузок при постоянном значении величины нормальной нагрузки при удалении от режущей кромки в случае радиуса округления (см. рис. 3.6.2) говорит о пластическом характере контакта на конечном участке фаски. Эти изменения объясняются нами разупрочнением приконтактного слоя под действием высокой температуры.

3.7. Распределение температуры в инструменте при резании титанового сплава

Расчет контактной температуры на передней и задней поверхности при резании титанового сплава ВТЗ-1 был произведен по методике А.Н. Резникова [4]. Исходные данные были взяты из эксперимента при резании титанового сплава ВТЗ-1 инструментом из твёрдого сплава ВК8 ($\gamma = 0^\circ$) с подачей $s = 0,41$ мм/об. Длина контакта стружки с передней поверхностью была определена экспериментально: $c = 0,52-0,45$ мм. Распределение контактных нагрузок на передней поверхности было принято в соответствии с нашими исследованиями при известных силах на передней поверхности: нормальной силе $N = 1460$ Н, касательной силе $F = 60$ Н при ширине обрабатываемого диска 2,3 мм.

Коэффициент теплопроводности инструментального и обрабатываемого материалов соответственно ($\lambda_{\text{ВК8}} = 0,13$ кал/см·с·°С и $\lambda_{\text{ВТЗ-1}} = 0,031$ кал/см·с·°С) были взяты при ориентировочной температуре резания 800°C [4, 5].

Распределение контактных нагрузок на фаске задней поверхности инструмента при $h_3 = 0,19$ мм было определено экспериментально (см. рис. 3.4.8).

Расчеты показали, что средняя температура резания равна 900°C , средняя температура контакта по передней поверхности 840°C , а на фаске 1400°C .

Высокое значение расчетной температуры на фаске вызвало сомнения, поэтому была сделана тарировка естественной термопары ВК8 – ВТЗ-1 (рис. 3.9.1).

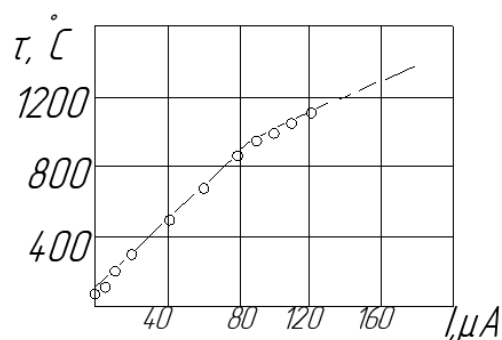


Рис. 3.7.1. Тарировочный график термопары ВК8- ВТЗ-1

Учитывая, что при резании значение силы тока, измеренное методом естественной ТЭДС, составляло 175 μA , то средняя температура резания должна составлять 1300 $^{\circ}\text{C}$.

В ходе экспериментов было исследовано распределение температуры в режущем клине инструмента методом термочувствительных покрытий [1, 6]. Описанный в работе [6] состав позволяет фиксировать температуру в диапазоне от 500 $^{\circ}\text{C}$ до 1000 $^{\circ}\text{C}$ через каждые 100 $^{\circ}\text{C}$ точностью измерения $\pm 25^{\circ}\text{C}$.

После приготовления покрытия производилась проверка изменения цветов в области фиксируемых температур (500, 600, 700, 800, 900, 1000 $^{\circ}\text{C}$). Для этого состав наносился на твердосплавные пластины из ВК8, которые затем выдерживались в печи при различных температурах. Таким образом уточнялись температуры, при которых происходит изменение цвета покрытия. Расхождение составляли не более 30 $^{\circ}\text{C}$.

По окончании температурного тарирования состав наносился на боковую поверхность рабочей пластины из ВК8. В торец к ней на специальной державке, установленной на динамометре, закреплялась вторая пластина с точно такими же размерами и геометрией и предварительно притертая боковой поверхностью с первой пластиной. Благодаря высокой дисперсности термочувствительного покрытия и малой его толщине нарушение теплопередачи было незначительно. Прямоугольное свободное резание осуществлялось точением диска вблизи стыка (0,1...0,2 мм от него). Высокая клейкость не давала обсыпаться нанесенному покрытию

Резанию осуществлялось 15 секунд для установления температурного поля. Важным качеством используемого покрытия является отсутствие влияния длительности теплового воздействия на температуру изменения цвета состава. Поэтому полученные данные по температурным переходам совпадают с результатами температурного тарирования.

По окончании резания рабочая пластина снималась и определялись линии температурных переходов: при изменении температуры через каждые

100 °С изменялась окраска покрытия. Координаты границ цветовых переходов определялись по точкам на большом инструментальном микроскопе при общем увеличении в 10 раз. В среднем определялось 5...10 точек для каждой линии.

Картины температурных полей на пластинах из ВК8 при резании титанового сплава ВТЗ-1 с подачей 0,21 мм/об и скоростью резания 60 м/мин представлены на рис. 3.9.2. По горизонтальной оси отложено расстояние от режущей кромки по передней поверхности, а вертикальная ось направлена вдоль фаски износа по задней поверхности.

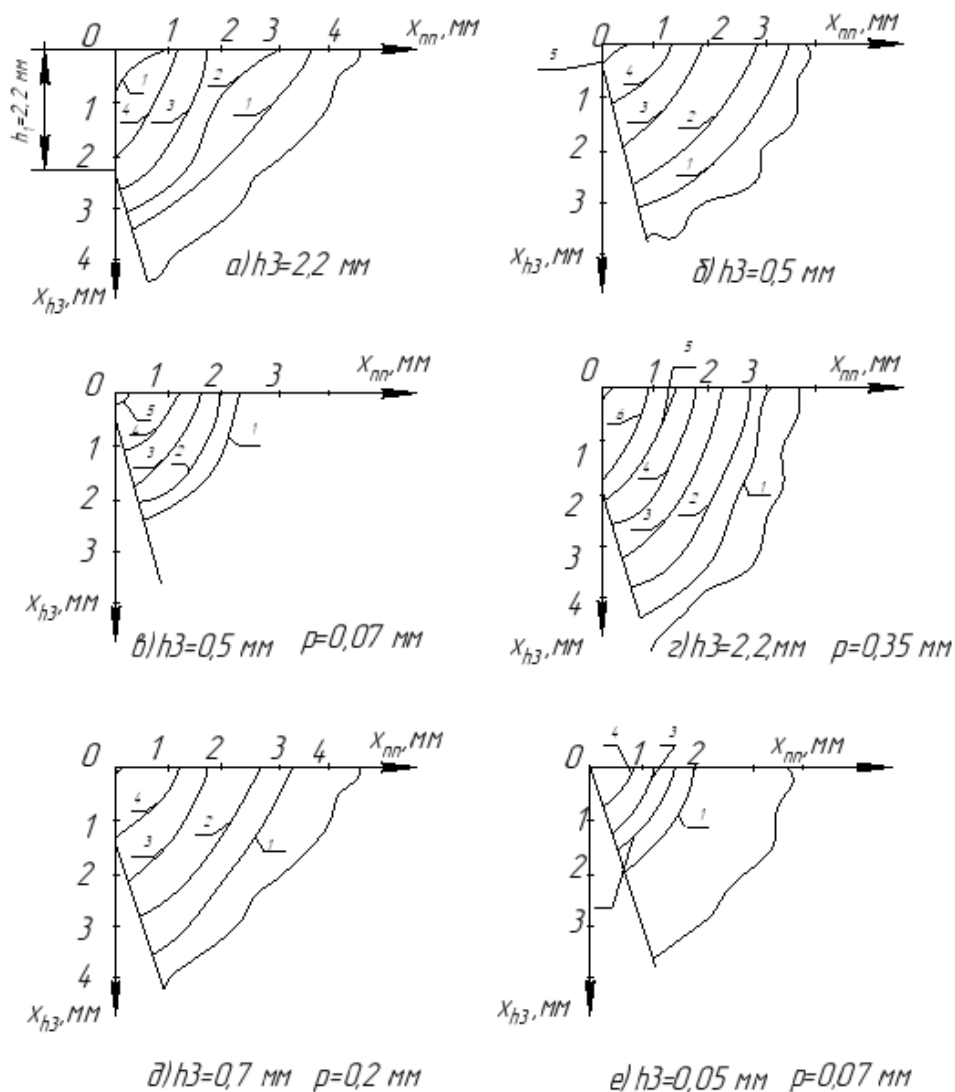


Рисунок. 3.7.2. Распределение температуры в режущем клине. ВТЗ-1- ВК8, $\gamma = 0^\circ$ $\alpha = 18^\circ$, $v = 60$ м/мин, $s = 0,21$ мм/об, 1 - 500°С, 2 - 600°С, 3 - 700°С, 4 - 800°С, 5 - 900°С, 6 - 1000°С.

Непосредственно у режущей кромки температура достигает 900 °С. С увеличением длины фаски по задней поверхности до 2,2 мм эта область увеличивается до 0,2 мм. Зона температур от 800 °С до 900 °С занимает область 1,2 мм по передней поверхности, а по задней поверхности равна ширине фаски. При округлении режущей кромки до 0,2 мм эти зоны изменяются незначительно, а при округлении более 0,35 мм температура вблизи режущей кромки достигает 1000 °С.

Несмотря на трудность сопоставления данных о величине температуры резания, полученных различными методами, можно с уверенностью сказать, что температура в зоне контакта инструмента с титановым сплавом ВТЗ-І не менее 800 °С, что существенно уменьшает предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала.

С увеличением радиуса округления более 0,2 мм существенно увеличивается температура контактных поверхностей, поэтому с увеличением r касательные контактные нагрузки на фаске уменьшаются быстрее по мере удаления от режущей кромки. Особенно это заметно при учете контакта только по плоской фаске (исключая радиусный участок) (см. рис. 3.6.2).

Увеличение касательных нагрузок у режущей кромки по мере увеличения радиуса округления (с учетом гипотезы пластического контакта) объясняется нами большим упрочнением приконтактного слоя обрабатываемого материала при подмятии под радиусный участок. Как показывают исследования, титановые сплавы имеют повышенную склонность к упрочнению, а при быстром нагреве медленнее теряют прочность [12].

3.8 Расчёт физических составляющих сил резания

Для построения эпюр контактных напряжений на передней поверхности режущего инструмента необходимо знать физические составляющие силы резания. Для всех подачи рассчитываются нормальная N и касательная F физические составляющие силы резания по измеренным технологическим составляющим $P_{zп}$ и $P_{yп}$, действующим на передней поверхности реза при прямоугольном свободном течении периферии диска при разном переднем угле по формулам.

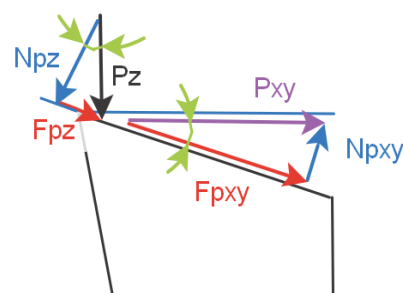


Рисунок 3.8.1. Схема действия составляющих силы резания в главной секущей плоскости при $\gamma > 0^\circ$

1. При переднем угле $\gamma > 0^\circ$ (рис. 3.8.1):

$$\vec{P}_z = \vec{N}_{Pz} + \vec{F}_{Pz}; \quad \vec{P}_{xy} = \vec{F}_{Pxy} + \vec{N}_{Pxy};$$

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

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

2. При переднем угле $\gamma = 0^\circ$ физические составляющие силы резания N и F равны технологическим составляющим $P_{zп}$ и $P_{yп}$ (P_{xy} при косоугольном резании), действующими на передней поверхности реза

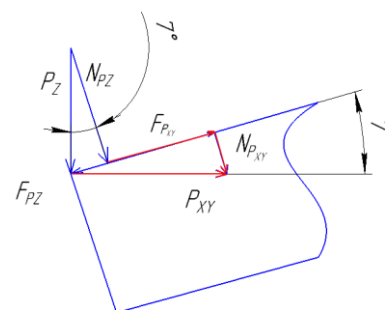


Рисунок 3.8.2. Схема действия составляющих силы резания в главной секущей плоскости при $\gamma < 0^\circ$

3. При переднем угле $\gamma < 0^\circ$ (рис. 3.8.2):

$$\vec{P}_z = \vec{N}_{Pz} + \vec{F}_{Pz}; \quad \vec{P}_{xy} = \vec{F}_{Pxy} + \vec{N}_{Pxy};$$

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

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

Технологические составляющие P_{xy} и P_z силы резания можно рассчитать, зная удельную силу резания, т.е. силу резания, приходящуюся на 1 мм^2 площади среза $S = s \times t = a \times b$ (мм^2). Наши ранее выполненные исследования показали, что глубина резания t или ширина среза b практически не влияет на распределение контактных напряжений и их величину, что даёт возможность строить эпюры после расчёта технологических составляющих силы резания.

По удельной силе $q_{P_{xy}}$ и q_{P_z} можно рассчитать составляющие P_{xy} и P_z при любой подаче s (или толщине среза a), при любой глубине резания t (или длине среза b , или длине контакта главной режущей кромки с поверхностью резания) практически независимо от величины главного угла в плане ϕ . Это позволяет сократить количество экспериментов по измерению сил резания при разных глубинах резания, но сначала надо построить зависимость этих удельных сил резания от толщины среза a по экспериментальным данным.

Длина контакта режущей кромки с поверхностью резания b рассчитывается по формуле $b = t/\sin\phi$. Составляющие силы резания рассчитываются по формулам:

$$P_{xy} = q_{P_{xy}} \times s \times t = q_{P_{xy}} \times a \times b \text{ (Н)}; \quad P_z = q_{P_z} \times s \times t = q_{P_z} \times a \times b \text{ (Н)}.$$

$$q_{P_{xy}} = P_{xy} / (a \times b) \text{ (Н/мм}^2\text{) или (МПа)}; \quad q_{P_z} = P_z / (a \times b) \text{ (Н/мм}^2\text{) или (МПа)}.$$

Расчёт удельной силы резания при различной длине фаски износа h_f и толщине среза a .

1. Расчёт удельной силы резания при $h_f = 0,2$ мм.

1.1. Рассчитываем удельную силу резания при $s = 0,41$ мм/об и длине фаски износа $h_f = 0,2$ мм. Длина фаски износа $h_f = 0,2$ мм была выбрана потому, что это соответствует предельно допустимому износу при получистовой обработке, а также по причине очень быстрого износа инструмента по задней поверхности до этой величине при обработке титановых сплавов, поэтому трудно найти инструмент с меньшим износом, т.е. это как бы ещё острый инструмент.

Эксперименты выполнялись при прямоугольном свободном резании с радиальной подачей резца $s_{\text{рад}}$. При этом измерялись составляющие P_y и P_z силы резания. При $s = 0,41$ мм/об и длине фаски износа $h_f = 0,2$ мм:

$$q_{P_z h=0,2} = P_{z h=0,2} / (a \times b) = 1798 / (2,3 \times 0,41) = 1906,68 \text{ Н/мм}^2 = \mathbf{1906} \text{ МПа} ;$$

$$q_{P_y h=0,2} = P_{y h=0,2} / (a \times b) = 2044 / (2,3 \times 0,41) = 2167,5 \text{ Н/мм}^2 = \mathbf{2167} \text{ МПа}.$$

Указываем их на поле рис. 3.8.3.

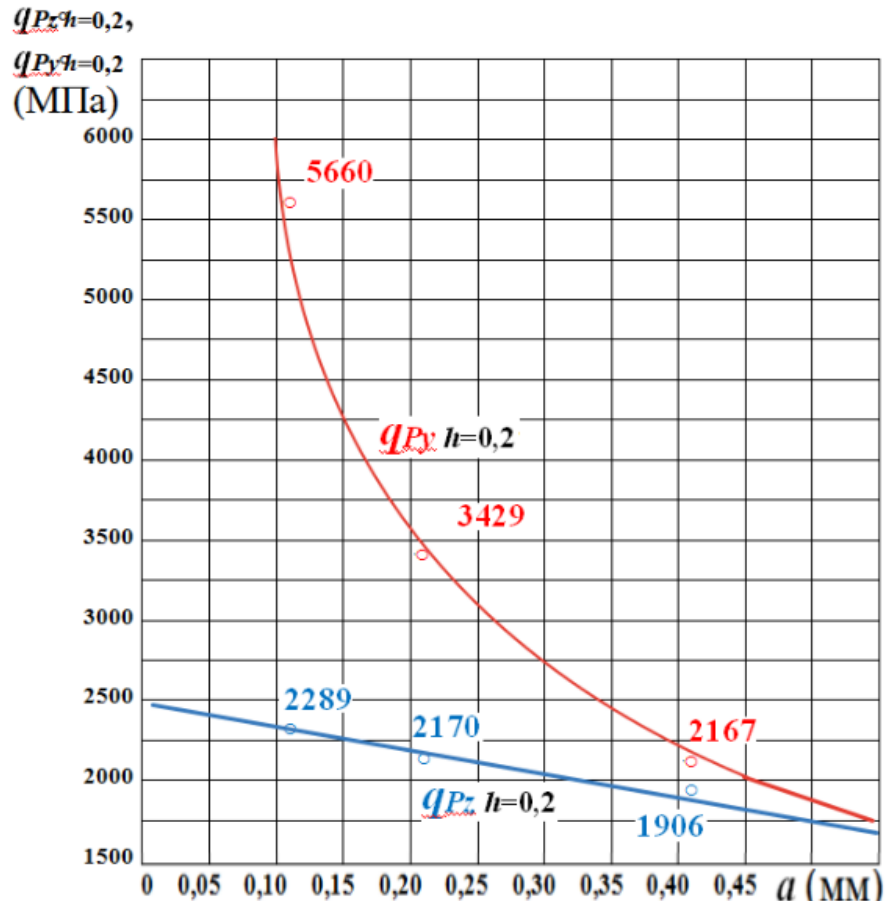


Рисунок. 3.8.3. Влияние толщины среза a (мм) на удельные силы резания $q_{P_z h=0,2}$ и $q_{P_y h=0,2}$ (МПа) при длине фаски износа $h_f = 0,2$ мм при точении титанового сплава. ВТЗ-1 – ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $v = 60$ м/мин, $b = 2,3$ мм, $h_f = 0,2$ мм

1.2. Удельная сила резания при $s = 0,21$ мм/об и длине фаски износа $h_f = 0,2$ мм:

$$q_{P_z h=0,2} = 1048 / (2,3 \cdot 0,21) = 2169,7 \text{ Н/мм}^2 = \mathbf{2170} \text{ МПа} ;$$

$$q_{P_y h=0,2} = 1656 / (2,3 \cdot 0,21) = 3428,5 \text{ Н/мм}^2 = \mathbf{3429} \text{ МПа}.$$

1.3. Удельная сила резания при $s = 0,11$ мм/об и длине фаски износа $h_f = 0,2$ мм:

$$q_{P_z h=0,2} = 579 / (2,3 \cdot 0,11) = 2288,5 \text{ Н/мм}^2 = \mathbf{2289} \text{ МПа} ;$$

$$q_{P_y h=0,2} = 1432 / (2,3 \cdot 0,11) = 5660 \text{ Н/мм}^2 = \mathbf{5660} \text{ МПа}.$$

Из рис. 3.8.3 видно, что удельная сила резания q_{py} существенно увеличивается при уменьшении толщины среза, в то время как q_{pz} при уменьшении толщины среза увеличивается незначительно и прямолинейно.

2. Расчёт удельной силы резания при $h_f = 0,4$ мм.

2.1. Рассчитываем удельную силу резания при длине фаски износа $h_f = 0,4$ мм: (рис. 3.8.4).

При $s = 0,41$ мм/об:

$$q_{pz\ h=0,4} = 1957 / (2,3 \cdot 0,41) = 2075,2 \text{ Н/мм}^2 = 2075 \text{ МПа} ;$$

$$q_{py\ h=0,4} = 3077 / (2,3 \cdot 0,41) = 3262,9 \text{ Н/мм}^2 = 3262,9 \text{ МПа}.$$

2.2. Удельная сила резания при $s = 0,21$ мм/об и длине фаски износа $h_f = 0,4$ мм:

$$q_{pz\ h=0,4} = 1241 / (2,3 \cdot 0,21) = 2569,3 \text{ Н/мм}^2 = 2569 \text{ МПа} ;$$

$$q_{py\ h=0,4} = 2852 / (2,3 \cdot 0,21) = 5904,7 \text{ Н/мм}^2 = 5904 \text{ МПа}.$$

2.3. Удельная сила резания

при $s = 0,11$ мм/об и длине фаски износа $h_f = 0,4$ мм:

$$q_{pz\ h=0,4} = 750 / (2,3 \cdot 0,11) \cdot 0,253 = 2964,4 \text{ Н/мм}^2 = 2964 \text{ МПа};$$

$$q_{py\ h=0,4} = 2444 / (2,3 \cdot 0,11) = 9660 \text{ Н/мм}^2 = 9660 \text{ МПа}.$$

3. Расчёт удельной силы резания при $h_f = 0,6$ мм.

3.1. Рассчитываем удельную силу резания при длине фаски износа $h_f = 0,6$ мм (рис. 3.8.5). При $s = 0,41$ мм/об:

$$q_{pz\ h=0,6} = 2013 / (2,3 \cdot 0,41) = 2134,6 \text{ Н/мм}^2 = 2134 \text{ МПа} ;$$

$$q_{py\ h=0,6} = 3537 / (2,3 \cdot 0,41) = 3537 \text{ Н/мм}^2 = 3537 \text{ МПа}.$$

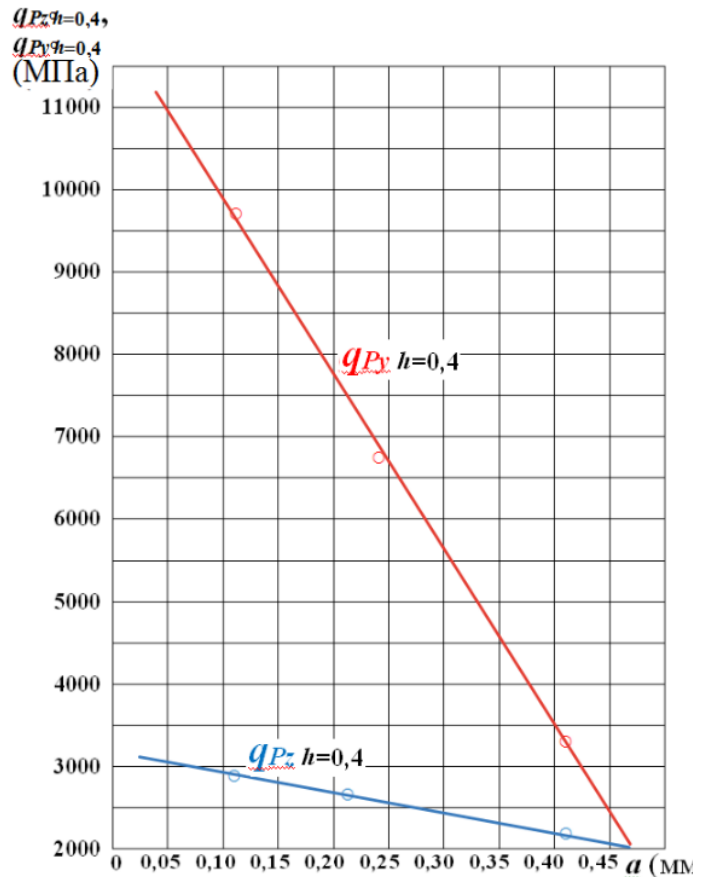


Рисунок. 3.8.4. Влияние толщины среза a (мм) на удельные силы резания $q_{pz\ h=0,4}$ и $q_{py\ h=0,4}$ (МПа) при $h_s = 0,4$ мм при точении титанового сплава ВТ3-1. ВТ3-1 – ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $v = 1$ м/с, $b = 2,3$ мм, $h_s = 0,4$ мм

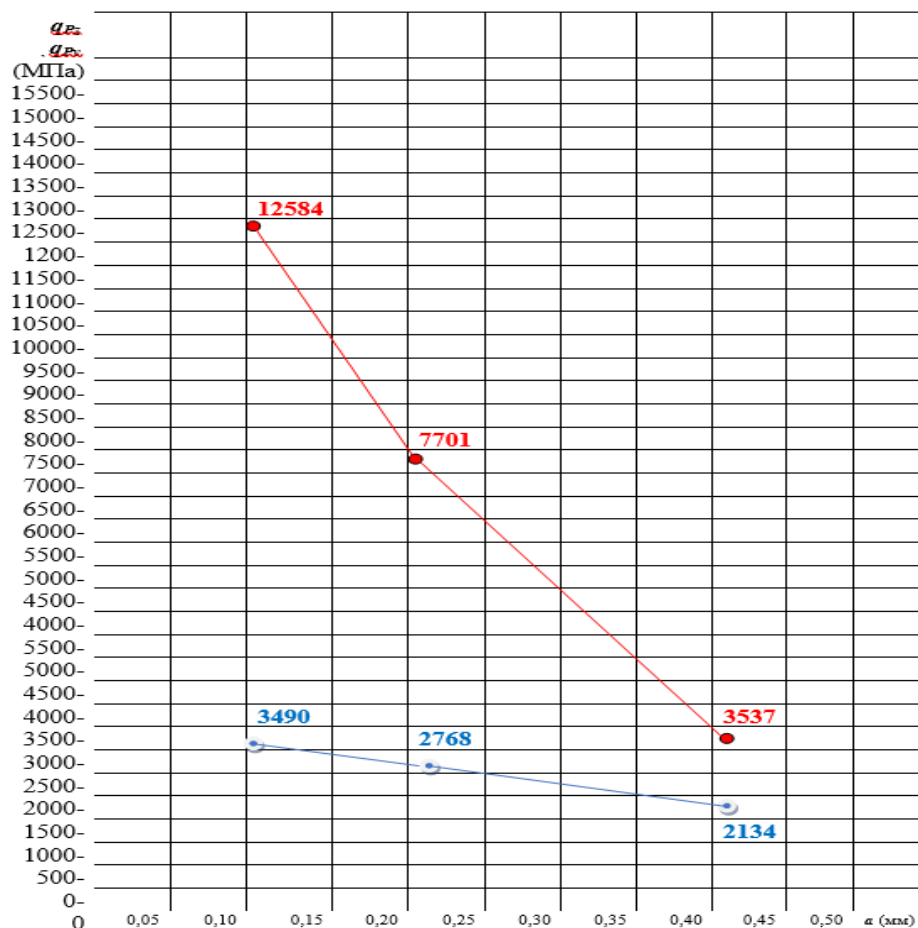


Рисунок 3.8.5. Влияние толщины среза a (мм) на удельные силы резания $q_{Pz h=0,6}$ и $q_{Py h=0,6}$ (МПа) при $h_s=0,6$ мм при точении титанового сплава ВТ3-1.

ВТ3-1 – ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $v = 1$ м/с, $b = 2,3$ мм, $h_s = 0,6$ мм

3.2. Удельная сила резания при $s = 0,21$ мм/об и $h_f = 0,6$ мм:

$$q_{Pz h=0,6} = 1337 / (2,3 \cdot 0,21) = 2768 \text{ Н/мм}^2 = 2768 \text{ МПа} ;$$

$$q_{Py h=0,6} = 3720 / (2,3 \cdot 0,21) = 7701 \text{ Н/мм}^2 = 7701 \text{ МПа}.$$

3.3. Удельная сила резания при $s = 0,11$ мм/об и $h_f = 0,6$ мм:

$$q_{Pz h=0,6} = 883 / (2,3 \cdot 0,11) = 3490 \text{ Н/мм}^2 = 3490 \text{ МПа} ;$$

$$q_{Py h=0,6} = 3184 / (2,3 \cdot 0,11) = 12584 \text{ Н/мм}^2 = 12584 \text{ МПа}.$$

4. Расчёт удельной силы резания при $h_f = 0,8$ мм.

4.1. Рассчитываем удельную силу резания при длине фаски износ $h_f = 0,8$ мм (рис. 3.8.6). При $s = 0,41$ мм/об:

$$q_{Pz h=0,8} = 2059 / (2,3 \cdot 0,41) = 1144,2 \text{ Н/мм}^2 = 1144 \text{ МПа} ;$$

$$q_{Py h=0,8} = 3877 / (2,3 \cdot 0,41) = 4111 \text{ Н/мм}^2 = 4111 \text{ МПа}.$$

4.2. Удельная сила резания при $s = 0,21$ мм/об и $h_f = 0,8$ мм:

$$q_{Pz h=0,8} = 1425 / (2,3 \cdot 0,21) \cdot 0,483 = 2950 \text{ Н/мм}^2 = 2950 \text{ МПа} ;$$

$$q_{Py h=0,8} = 4195 / (2,3 \cdot 0,21) = 8685,3 \text{ Н/мм}^2 = 8685 \text{ МПа}.$$

4.3. Удельная сила резания при $s = 0,11$ мм/об и $h_f = 0,8$ мм:

$$q_{Pz h=0,8} = 883 / (2,3 \cdot 0,11) = 3490,1 \text{ Н/мм}^2 = 3490 \text{ МПа} ;$$

$$q_{Py h=0,8} = 3569 / (2,3 \cdot 0,11) = 14106,7 \text{ Н/мм}^2 = 14107 \text{ МПа}.$$



Рисунок 3.8.6. Влияние толщины среза a (мм) на удельные силы резания $q_{Pz h=0,6}$ и $q_{Py h=0,6}$ (МПа) при $h_s = 0,8$ мм при точении титанового сплава ВТЗ-1. ВТЗ-1 – ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $v = 1$ м/с, $b = 2,3$ мм, $h_s = 0,8$ мм

5. Расчёт удельной силы резания при $h_f = 1,0$ мм.

5.1. Рассчитываем удельную силу резания при длине фаски износ $h_f = 1,0$ мм:

(рис. 3.8.7). При $s = 0,41$ мм/об:

$$q_{Pz h=1,0} = 2105 / (2,3 \times 0,41) \cdot 0,983 = 2141,4 \text{ Н/мм}^2 = 2145 \text{ МПа} ;$$

$$q_{Py h=1,0} = 4193 / (2,3 \times 0,41) = 4265,5 \text{ Н/мм}^2 = 4266 \text{ МПа}.$$

5.2. Удельная сила резания при $s = 0,21$ мм/об при $h_f = 1$ мм:

$$q_{Pz h=1,0} = 1513 / (2,3 \times 0,21) 0,483 = 3132,5 \text{ Н/мм}^2 = 3133 \text{ МПа} ;$$

$$q_{Py h=1,0} = 4605 / (2,3 \times 0,21) = 9534 \text{ Н/мм}^2 = 9534 \text{ МПа}.$$

5.3. Удельная сила резания при $s = 0,11$ мм/об при $h_f = 1$ мм:

$$q_{Pz h=1,0} = 1139 / (2,3 \times 0,11) 0,253 = 4501,9 \text{ Н/мм}^2 = 4502 \text{ МПа} ;$$

$$q_{Py h=1,0} = 3803 / (2,3 \times 0,11) = 15031,6 \text{ Н/мм}^2 = 15032 \text{ МПа}.$$



Рисунок 3.8.7. Влияние толщины среза a (мм) на удельные силы резания $q_{Pz h=1}$ и $q_{Py h=1}$ (МПа) при $h_3 = 1$ мм при точении титанового сплава BT3-1. BT3-1 – BK8, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $v = 1$ м/с, $b = 2,3$ мм, $h_3 = 1$ мм.

Анализ рис. 3.8.3 – 3.8.7 показывает, что при уменьшении толщины среза удельная сила резания q_{Py} существенно увеличивается при любой длине фаски износа по задней поверхности, но чем больше длина фаски износа, тем существенно больше её величина. Увеличение удельная сила резания q_{Py} связано с большой величиной нормальных контактных напряжений на

фаске износа, следовательно, она влияет на упругую деформацию системы СПИД, а не на мощность резания $N_{рез} = P_z \cdot v$.

На мощность резания влияет удельная сила резания q_{Pz} , которая увеличивается не так существенно, как q_{Py} , но тоже ощутимо: при $h_f = 1$ мм и толщине среза $a = 0,41$ мм q_{Pz} увеличивается по сравнению с $a = 0,11$ мм в 2,1 раза ($4502/2145 = 2,1$).

Влияние длины фаски износа по задней поверхности на q_{Pz} небольшое: при $a = 0,41$ мм увеличение длины фаски с 0,2 мм до 1 мм приводит к увеличению q_{Pz} в 1,1 раза ($2145/1906 = 1,13$), но влияние длины h_f на q_{Py} более существенное – почти в 2 раза ($4266/2167 = 1,97$).

Влияние толщины среза на величину q_{Py} более существенное при бóльшей длине фаски износа: при $h_f = 1$ мм уменьшение толщины среза с 0,41 до 0,11 мм приводит к увеличению q_{Py} в 3,5 раза ($15032/4266 = 3,52$), а при $h_f = 0,2$ мм уменьшение толщины среза с 0,41 до 0,11 мм приводит к увеличению q_{Py} в 2,6 раза ($5660/2167 = 2,61$).

4. Расчет НДС режущего инструмента

4.1. Подготовка к расчёту НДС

Для исследования напряжённо-деформированного состояния (НДС) режущих пластин создаём 3D модели с различными передними углами γ и с задним углом $\alpha = 8^\circ$. При расчёте НДС режущего инструмента при косоугольном резании принимаем, что в главной секущей плоскости картины распределения напряжений и деформаций будут незначительно отличаться от картин НДС резца, обрабатывающего периферию диска с радиальной подачей, т.е. при реализации прямоугольного свободного резания. Ранее рассмотренные силовые зависимости были получены этим методом, поэтому будем рассматривать НДС такого резца. Ширину 3D модели резца принимаем на 0,1 мм больше ширины диска, чтобы получаемые картины НДС на боковой поверхности можно было анализировать как картины НДС в главной секущей плоскости без необходимости выполнения сечения инструмента (рис. 4.1.1).

Задаются направление осей действия сил и закрепления 3D модели.

Для расчёта НДС использовалась программа ANSYS, отличающаяся высокой разрешающей способностью при рассмотрении объектов небольшого размера, т.к. область анализа немного больше длины контакта титановой стружки с инструментом, т.е. около 5-10 мм.

Для создания 3D модели использовали программное обеспечение Solidworks 2020 (рис. 4.6.1). Передний угол: $\gamma=0^\circ$; главный задний угол: $\alpha=8^\circ$; ширина клина $b=2,3$ мм; толщина среза переменная $a=0,11 \dots 0,41$ мм.

К 3D модели прилагаем внешнюю нагрузку с реальным распределением контактных напряжений на передней поверхности и на фаске износа по задней поверхности (при расчёте

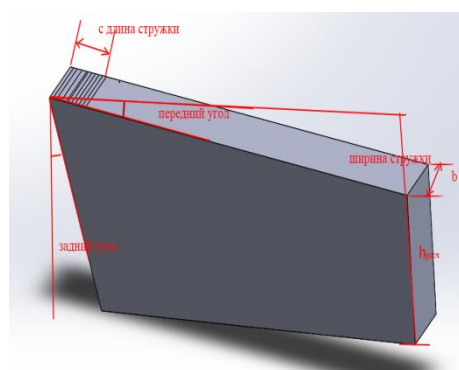


Рисунок. 4.1.1. Геометрические параметры режущего клина пластины

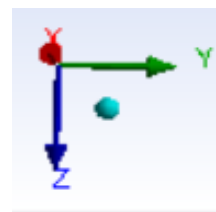


Рисунок. 4.1.2. Направление осей

НДС изношенного инструмента) (рис. 4.1.4). При приложении контактных напряжений касательное напряжение действует касательно к передней поверхности, а нормальное напряжение перпендикулярно передней поверхности.

Перед расчётом НДС необходимо задать свойства материала модели резца (рис. 4.1.3), задать (приложить) внешние нагрузки (рис. 4.1.4).

В программе ANSYS задаются силы, направленные вдоль осей OZ, OY

Properties of Outline Row 3: BK8				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	14.8	g cm ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
12	Strain-Life Parameters			
20	S-N Curve	Tabular		
24	Tensile Yield Strength	700	MPa	
25	Compressive Yield Strength	2400	MPa	
26	Tensile Ultimate Strength	2800	MPa	
27	Compressive Ultimate Strength	3400	MPa	

Рисунок. 4.1.3. Свойства сплава BK8 при задании инструментального материала в ANSYS

и OX (или OY). Будем рассчитывать эквивалентные и нормальные напряжения по осям Z и Y (будет по оси XY для косоугольного резания), деформации по осям Z и Y.

При приложении контактных напряжений в ANSYS требуется указывать не касательное и нормальное контактные напряжения, а к напряжению параллельно оси Y

и по оси Z, т.е. перпендикулярно к плоскости OXY. При переднем угле $\gamma = 0^\circ$ проблем не будет, т.к. ось OY направлена по касательной к передней поверхности, поэтому по направлению контактное напряжение τ совпадает с OY. Аналогично и для нормального напряжения σ – оно совпадает с осью OZ.

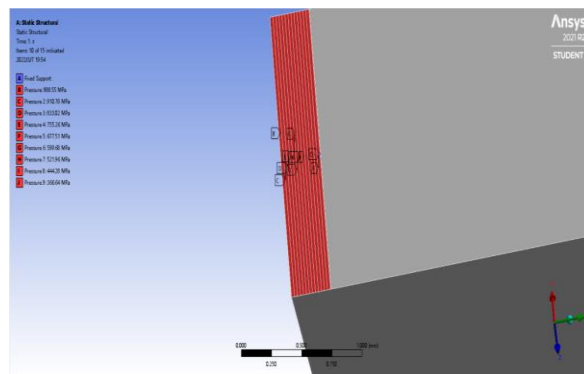


Рисунок. 4.1.4. Приложение внешних нагрузок на резец, работающим при прямоугольном свободном резании

Если передний угол $\gamma \neq 0^\circ$, то необходимо рассчитывать напряжения вдоль осей OZ и OY с учётом переднего угла.

Задание внешней нагрузки на неизношенном инструменте выполняется в три этапа.

Первый этап: уточняем распределение контактных напряжений на передней поверхности, т.е. принимаем эпюры контактных напряжений в зависимости от толщины среза и переднего угла.

Второй этап: рассчитываем средние контактные напряжения на каждом i -том участке контакта стружки с передней поверхностью по их эпюрам. Т.к. эпюры **нормальных** контактных напряжений σ имеют сложный (неравномерный) характер, то разбиваем участок контакта стружки на небольшие участки шириной равной ширине стружки $b_{стр}$ (принимаем её равной ширине диска b_d или ширине среза b) и длиной $L_{pi} = 0,1$ мм. В пределах каждого участка принимаем равномерное распределение контактных напряжений: $\sigma_i = \sigma_{ср\ i}$, $\tau_i = \tau_{ср\ i}$.

Третий этап: рассчитываем контактные напряжения, действующие в направлении осей OZ и OY, т.к. по программе ANSYS необходимо задавать нагрузки в направлении этих осей, а не касательно (τ) или перпендикулярно (σ) передней поверхности, эпюры которых были получены ранее.

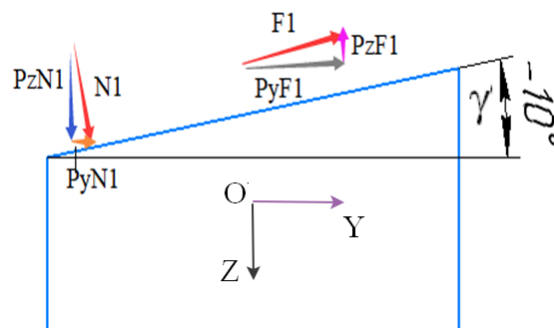


Рис. 4.1.5 – Составляющие контактные нагрузки, действующие вдоль осей OZ (q_{zi}) и OY (q_{yi}) при отрицательном переднем угле γ

Поэтому выполняем пересчёт с учётом знака и величины переднего угла γ (рис. 4.1.5). На схеме рис. 4.1.5 указаны силы, действующие на каждом i -том участке контакта стружки с передней поверхностью (показаны индексы для участка № 1). Аналогичная схема будет и при использовании средних контактных напряжений в направлении осей Z или Y.

при отрицательном переднем угле γ (рис. 4.1.5, б):

$$q_{zi} = q_{z\sigma i} - q_{z\tau i} = \sigma_i \times \cos \gamma - \tau_i \times \sin \gamma \text{ (МПа);}$$

$$q_{yi} = q_{y\tau i} + q_{y\sigma i} = \tau_i \times \cos \gamma + \sigma_i \times \sin \gamma \text{ (МПа).}$$

Результаты расчётов записываются в таблицу 4.1.1

Табл. 4.1.1 – Составляющие контактные нагрузки, действующие вдоль осей OZ ($q_{\sum zi}$) и OY ($q_{\sum yi}$) при расчёте НДС режущего клина шириной $b = 2,3$ мм. ВТЗ-1 – ВК8, $v = 60$ м/мин), $\gamma = -30^\circ$, толщина среза $a = 0,41$ мм, длина контакта стружки $c = 0,29$ мм, 5 участков (см. рис. 4.4.2)

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	$\sigma_{cp i}$ МПа	$q_{z\sigma i} = \sigma_i \cos \gamma$ МПа	$q_{y\sigma i} = \sigma_i \sin \gamma$ МПа	$\tau_{cp i}$ МПа	$q_{z\tau i} = \tau_i \sin \gamma$ МПа	$q_{y\tau i} = \tau_i \cos \gamma$ МПа	$q_{z\sum i} = q_{z\sigma i} + q_{z\tau i}$ МПа	$q_{y\sum i} = q_{y\sigma i} + q_{y\tau i}$ МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0-0,1	1909,5	1654	955	1788	894	1548	2518	593
2	0,1-0,2	1876,6	1625	812,5	1788	894	1548	2519	735,5
3	0,2-0,3	1843,7	1597	798,5	1788	894	1548	2491	749,5
4	0,3-0,4	1810,8	1568	784	1788	894	1548	2462	764
5	0,4-0,53	597	517	258,5	1788	894	1548	1411	1289,5

Аналогично выполняется и для других условий резания.

При задании внешней нагрузки при расчёте НДС изношенного по задней поверхности резца разбиваем эпюры на фаске задней поверхности и дополнительно оформляем таблицу. Т.к. задний угол на искусственной фаске износа по задней поверхности равен нулю ($\alpha_h = 0^\circ$), то $q_{y hi} = \sigma_{hi}$, а $q_{z hi} = \tau_{hi}$, поэтому понадобятся только графы **1, 2, 3** и **6**.

4.2. Исследования влияния величины заднего угла α на наибольшие эквивалентные напряжения

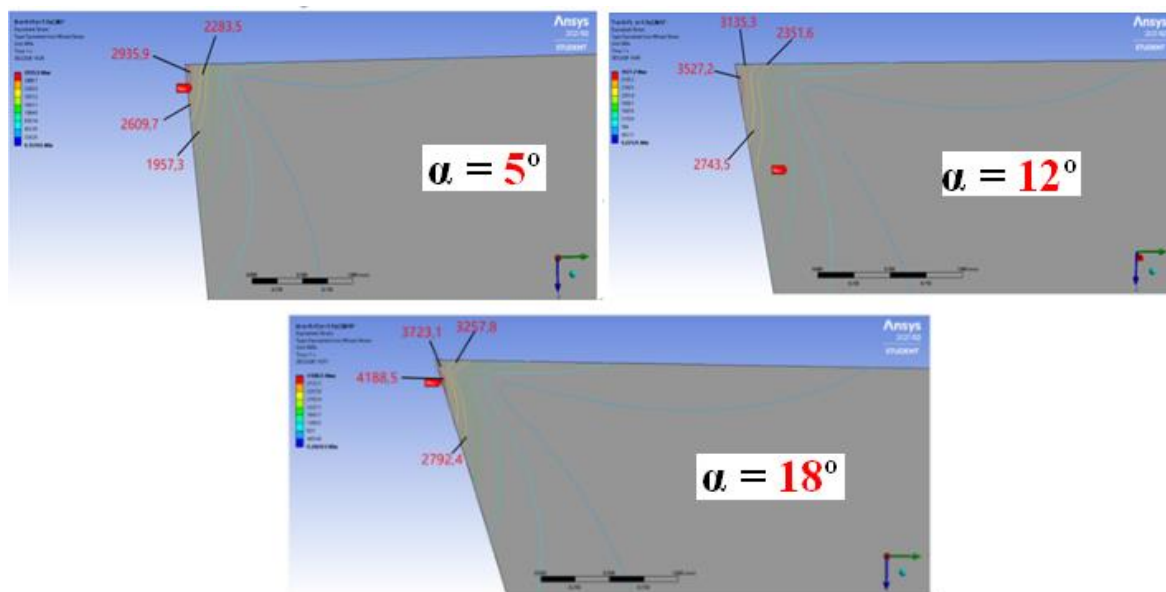


Рис. 4.2.1. Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа) при различных задних углах резца. ВТЗ-1 – ВК8, $v=60$ м/мин, $\gamma = 0^\circ$, $a=0,41$ мм, $c = 1,1 \times a$, треугольная форма эюры σ

Таблица. 4.2.1 – **Наибольшие** деформации и напряжения при обработке титанового сплава. ВТЗ-1—ВК8, $v = 60$ м/мин, $\gamma=0^\circ$, $b = 2,3$ мм, $a = 0,41$ мм, $c = 1,1 \times a$, **треугольный** характер эюры σ

№ порядковый и название параметра	$\alpha=5^\circ$	$\alpha=8^\circ$	$\alpha=12^\circ$	$\alpha=18^\circ$
1 - наибольшие эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв max}}$ (МПа)	3000	3206,4	3785,3	4020,7
2 - наибольшие нормальные напряжения по оси OY $\sigma_y \text{ max}$ (МПа)	1179	1428,1	1653,3	1800,3
3 - наибольшие нормальные напряжения по оси OZ $\sigma_z \text{ max}$ (МПа)	20	25,135	31,874	51,923
4 - наибольшие деформация ϵ_{max} (мм)	0,008697	0,012020	0,014971	0,019805
5 - наибольшие касательные напряжения в плоскости YOZ $\tau_{yz \text{ max}}$ (МПа)	111	100	113,6	170,39
6 - наибольшие касательные напряжения в плоскости XOZ $\tau_{xz \text{ max}}$ (МПа)	168	200	236	321

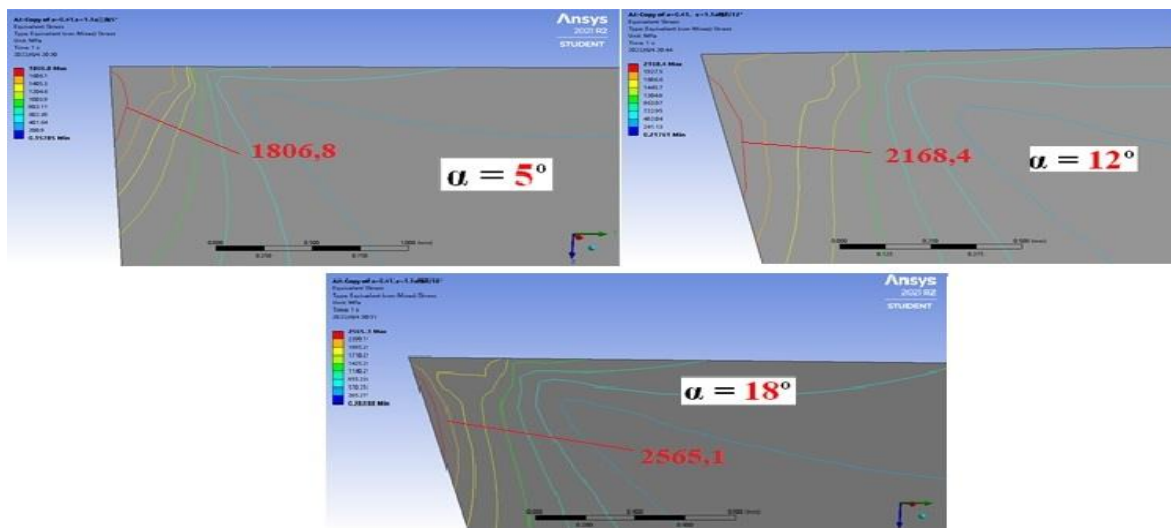


Рис. 4.2.2. Распределение эквивалентных напряжений в режущем клине при прямоугольном резании диска. ВТ3-1-ВК8, $\gamma=0^\circ$, толщина среза $a = 0,41$ мм, $c = 1,1a = 0,121$ мм, $b = 2,3$ мм, трапецидальная форма эюры σ , 5 участков: а) $\alpha = 5^\circ$; б) $\alpha = 12^\circ$; в) $\alpha = 18^\circ$.

Табл. 4.2.2 — Наибольшие напряжения и деформация при обработке титанового сплава. ВТ3-1 - ВК8, $v = 60$ м/мин, $\gamma=0^\circ$, $b = 2,3$ мм, $a=0,41$, $c = 1,1 \cdot a$, Трапецидальной форма эюры σ

Название параметра	$\alpha=5^\circ$	$\alpha=8^\circ$	$\alpha=12^\circ$	$\alpha=18^\circ$
1 - наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$ (МПа)	1806,8	1948,4	2168,4	2565,1
2 - наибольшее нормальное напряжение по оси OY $\sigma_y \text{ max}$ (МПа)	990,71	1117,1	1309,5	1666,7
3 - наибольшее нормальное напряжение по оси OZ $\sigma_z \text{ max}$ (МПа)	65,01	61,962	58,357	53,167
4 - наибольшая деформация ϵ_{max} (мм)	0,0084608	0,009645	0,011564	0,015415
5 - наибольшее касательное напряжение в плоскости YOZ $\tau_{yz \text{ max}}$ (МПа)	112,79	110,64	103,28	111,94
6 - наибольшее касательное напряжение в плоскости XOZ $\tau_{xz \text{ max}}$ (МПа)	161,6	189,58	232,72	315,36

На рис. 4.2.2 представлены картины распределения эквивалентных напряжений в режущем клине при толщине среза $a = 0,41$ мм при $c = 1,1 \times a$ при одинаковой нагрузке на передней поверхности (при трапецидальной форме эюры σ), но с различной величиной заднего угла α .

На рис. 4.23 представлены графики влияния заднего угла α на величину наибольшего эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экв max}}$ при трапецидальной (1) и треугольной (2) форме эпюры σ .

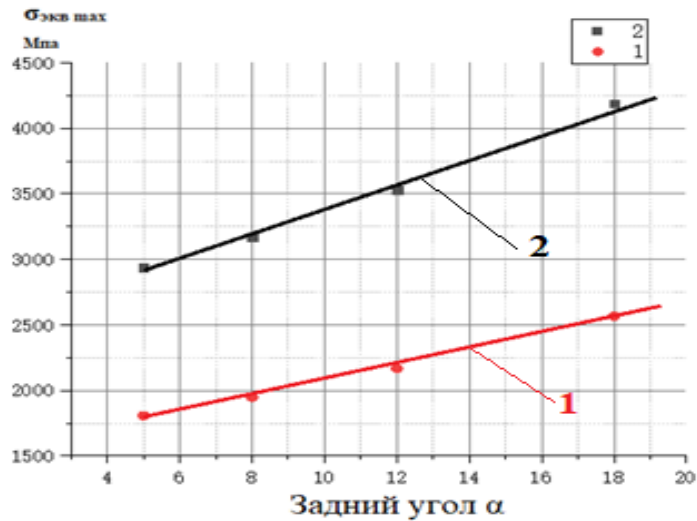


Рисунок 4.2.3. Влияние величины заднего угла α на наибольшие эквивалентные напряжения. при 5 участках. ВТЗ-1—ВК8, $v=60$ м/мин, $\gamma=0^\circ$, $b = 2,3$ мм, $a = 0,41$, $c = 1,1 \times l$. 1- трапецидальный характер эпюры σ ; 2 - треугольный характер эпюры σ .

Увеличение заднего угла α с 5 до 18° приводит к увеличению максимального эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экв max}}$ в 1,5 раза. Однако использование режущих инструментов с задним углом менее 8 градусов приводит к более интенсивному увеличению фаски износа по задней поверхности при износе по задней поверхности, поэтому оптимальный задний угол при обработке титанового сплава рекомендуется 8° .

4.3. Исследование НДС изношенного режущего клина

На рис. 4.3.1 представлены примеры распределения эквивалентных напряжений в режущем клине при прямоугольном резании диска из титанового сплава ВТ3-1 при различной длине фаски износа по задней поверхности h_f .

В таблице 4.3.1 приведены наибольшие величины основных параметров НДС, полученные при их расчёте для $a = 0,41$ мм.

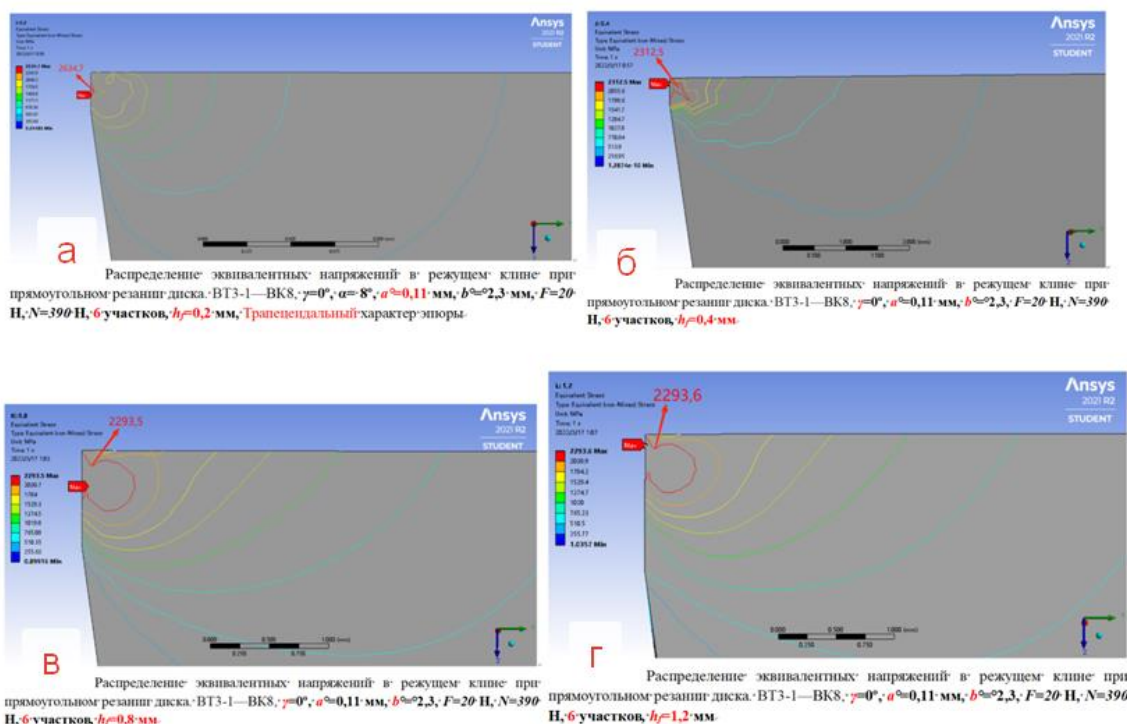


Рисунок 4.3.1. Распределение эквивалентных напряжений в режущем клине при прямоугольном резании диска при различной длине фаски износа по задней поверхности h_f . ВТ3-1—ВК8, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=8^\circ$, $a=0,11$ мм, $b=2,3$, трапецидальный характер эпюры σ , 6 участков. а – $h_f = 0,2$ мм; б – $h_f = 0,4$ мм; в – $h_f = 0,8$ мм; г – $h_f = 1,2$ мм;

Табл. 4.3.1. — Наибольшие деформации и напряжения на фаске износа по задней поверхности при обработке титанового сплава. ВТЗ-1—ВК8, $v=120$ м/мин, $\gamma=0^\circ$, $b = 2,3$ мм, $a = 0,41$, $\alpha=8^\circ$.

№ п/п	Название параметра	Символ параметра	Длина на фаске износа по задней поверхности				
			$h_f=0$ мм	$h_f=0,2$ мм	$h_f=0,4$ мм	$h_f=0,8$ мм	$h_f=1,2$ мм
1	Наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$ (МПа)	$\sigma_{\text{экв max}}$	1980,5	3888,3	3403,4	3551,2	3600,9
2	Наибольшие нормальные напряжения по оси OY $\sigma_y \text{ max}$ (МПа)	$\sigma_y \text{ max}$	1120,3	165,29	98,8	208,34	289,98
3	Наибольшие нормальные напряжения по оси OZ $\sigma_z \text{ max}$ (МПа)	$\sigma_z \text{ max}$	58,268	60,586	250,78	560,35	846,40
4	Наибольшие общая деформация ε_{max} (мм)	$\varepsilon_{\text{общ max}}$	0,0090354	0,0070639	0,010014	0,011565	0,014291
5	Наибольшие касательные напряжения в плоскости YOZ $\tau_{yz \text{ max}}$ (МПа)	$\tau_{yz \text{ max}}$	115,46	150,48	128,57	120,25	118,93
6	Наибольшие касательные напряжения в плоскости XOZ $\tau_{xz \text{ max}}$ (МПа)	$\tau_{xz \text{ max}}$	185,85	245,15	280,60	210,15	210,35

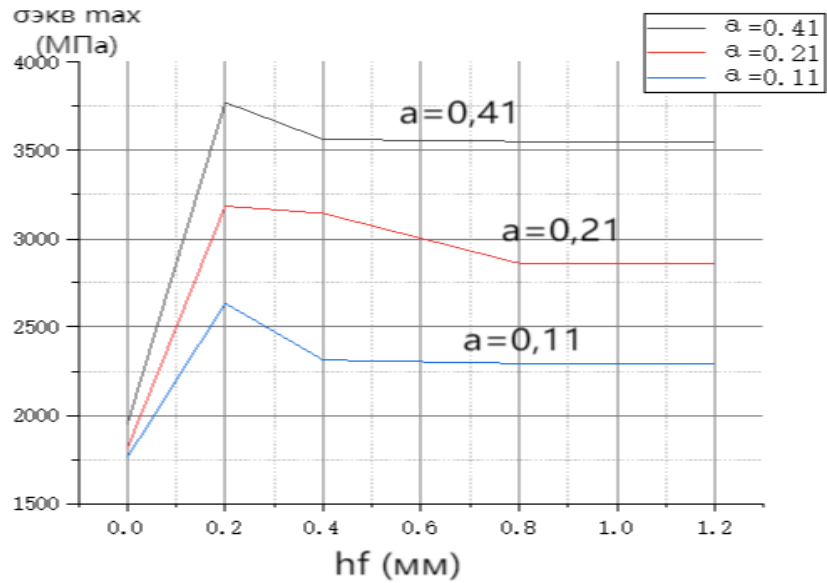


Рис. 4.3.2. Влияние длины фаски износа по задней поверхности h_f (мм) и толщины среза a (мм) на наибольшие эквивалентные напряжения при обработке титанового сплава. ВТ3-1—ВК8, $v = 60$ м/мин, $\gamma = 0^\circ$, $b = 2,3$ мм, трапецидальный характер эпюры σ

Из рисунка 4.3.2 видно, что наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{ЭКВ max}}$ существенно зависят от характера эпюры нормальных контактных напряжений σ и длины контакта стружки с передней поверхностью s .

Рассчитываем коэффициент увеличения $\sigma_{\text{ЭКВ max}}$ при увеличении длины фаски износа по задней поверхности с нуля до 0,2 мм и с 0,2 до 1,2 мм при $a = 0,11$ мм:

$$K_{\sigma_{\text{ЭКВ max}}} = \sigma_{\text{ЭКВ max } h=0,2} / \sigma_{\text{ЭКВ max } h=0} = 2645,8 / 1758,43 = 1,50 ;$$

$$K_{\sigma_{\text{ЭКВ max}}} = \sigma_{\text{ЭКВ max } h=0,2} / \sigma_{\text{ЭКВ max } h=1,2} = 2645,8 / 2285,3 = 1,16$$

при $a = 0,21$ мм :

$$K_{\sigma_{\text{ЭКВ max}}} = \sigma_{\text{ЭКВ max } h=0,2} / \sigma_{\text{ЭКВ max } h=0} = 3190,5 / 1815,3 = 1,75 ;$$

$$K_{\sigma_{\text{ЭКВ max}}} = \sigma_{\text{ЭКВ max } h=0,2} / \sigma_{\text{ЭКВ max } h=1,2} = 3190,5 / 2880,1 = 1,10$$

при $a = 0,41$ мм :

$$K_{\sigma_{\text{ЭКВ max}}} = \sigma_{\text{ЭКВ max } h=0,2} / \sigma_{\text{ЭКВ max } h=0} = 3888,3 / 1980,5 = 1,96 \approx 2;$$

$$K_{\sigma_{\text{ЭКВ max}}} = \sigma_{\text{ЭКВ max } h=0,2} / \sigma_{\text{ЭКВ max } h=1,2} = 3888,3 / 3600,9 = 1,079$$

4.4. Распределения контактных напряжений при отрицательном переднем угле

По измеренным технологическим составляющим P_z и P_y силы резания рассчитываем физические составляющие силы резания при обработке титанового сплава ВТ3-1 резцом с отрицательным передним углом $\gamma = -30^\circ$, которые необходимы для построения эпюр контактных напряжений на передней поверхности резца (рис. 4.4.1 – 4.4.2).

Табл. 4.4.1— Технологические и физические составляющие силы резания, полученные из экспериментов при $\gamma = -30^\circ$. ВТ3-1-ВК8, $v = 60$ м/мин.

Толщина среза a , мм	Технологические составляющие силы резания		Физические составляющие силы резания	
	P_y , Н	P_z , Н	N , Н	F , Н
0,21	1400	1220	1220	980
0,41	2600	2000	2000	2180

Табл. 4.4.2— Наибольшие нормальные σ_{\max} и касательные τ_{\max} контактные напряжения (МПа) при обработке титанового сплава с передним углом $\gamma = -30^\circ$. ВТ3-1-ВК8, $v = 60$ м/мин.

Параметр	$a = 0,21$ мм, $c = 0,293$ мм	$a = 0,41$ мм, $c = 0,53$ мм
σ_{\max} (МПа)	2170	1926
τ_{\max} (МПа)	713	1788
μ_{\min}	0,328	0,938

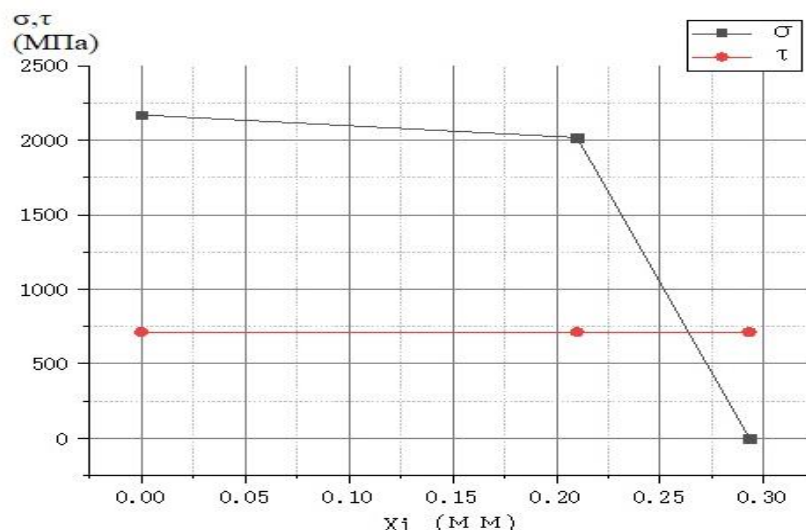


Рис. 4.4.1. Эпюры нормальных σ и касательных τ контактных напряжений (МПа) при обработке титанового сплава при толщине среза $a=0,21$ мм. ВТЗ-1-ВК8, $v = 60$ м/мин, $\gamma = -30^\circ$.

Таблица 4.4.3 – Величины средних контактных напряжений на рассматриваемых участках передней поверхности при расчёте НДС резца с шириной $b=2,3$ мм при малом количестве участков. ВТЗ-1-ВК8, $\gamma = -30^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $a = 0,21$ мм, $c = 0,293$ мм, трапецидальный характер эпюры σ

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	$\sigma_{cp\ i}$, МПа	$\tau_{cp\ i}$, МПа
1	0-0,05	2151	713
2	0,05-0,10	2115	713
3	0,10-0,15	2079	713
4	0,15-0,20	2043	713
5	0,20-0,29	1653	713
6	0,25-0,293	522	713

Таблица 4.4.4 – Величины средних контактных напряжений на рассматриваемых участках передней поверхности при расчёте НДС резца с шириной $b=2,3$ мм при малом количестве участков. ВТЗ-1-ВК8, $\gamma = -30^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $a = 0,41$ мм, $c = 0,53$ мм, трапецидальный характер эпюры σ

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	$\sigma_{cp\ i}$, МПа	$\tau_{cp\ i}$, МПа
1	0-0,1	1909,5	1788
2	0,1-0,2	1876,6	1788
3	0,2-0,3	1843,7	1788
4	0,3-0,4	1810,8	1788
5	0,4-0,53	597	1788

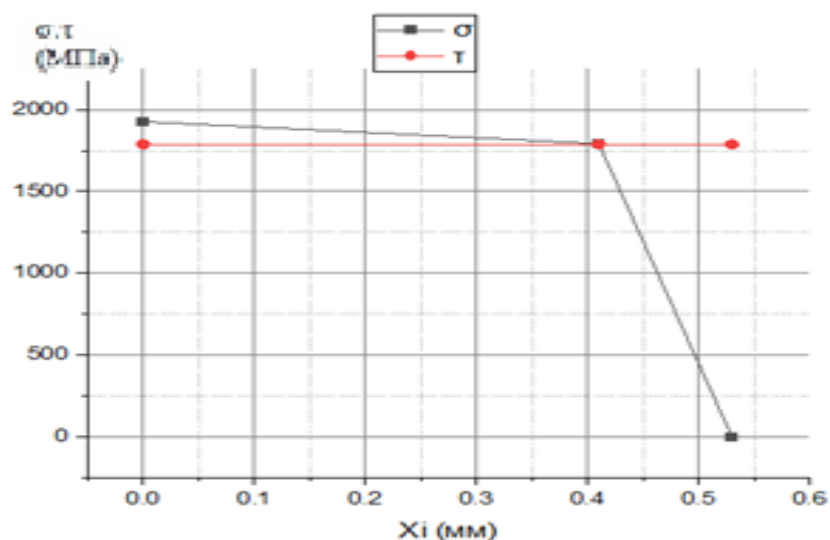


Рис. 4.4.2. Эпюры нормальных σ и касательных τ контактных напряжений (МПа) при обработке титанового сплава при толщине среза $a=0,41$ мм. ВТЗ-1-ВК8, $v = 60$ м/мин, $\gamma = -30^\circ$.

На фаске задней поверхности при отрицательном переднем угле $\gamma = -30^\circ$ действуют равномерно распределённые контактные напряжения (рис. 4.4.3) подобно распределению при округлении режущей кромки и нормальные контактные напряжения на плоском участке фаске примерно такой же величины ($\sigma_h = 1350-1650$ МПа, $\tau_h = 350-480$ МПа) (см. рис. 3.6.2).

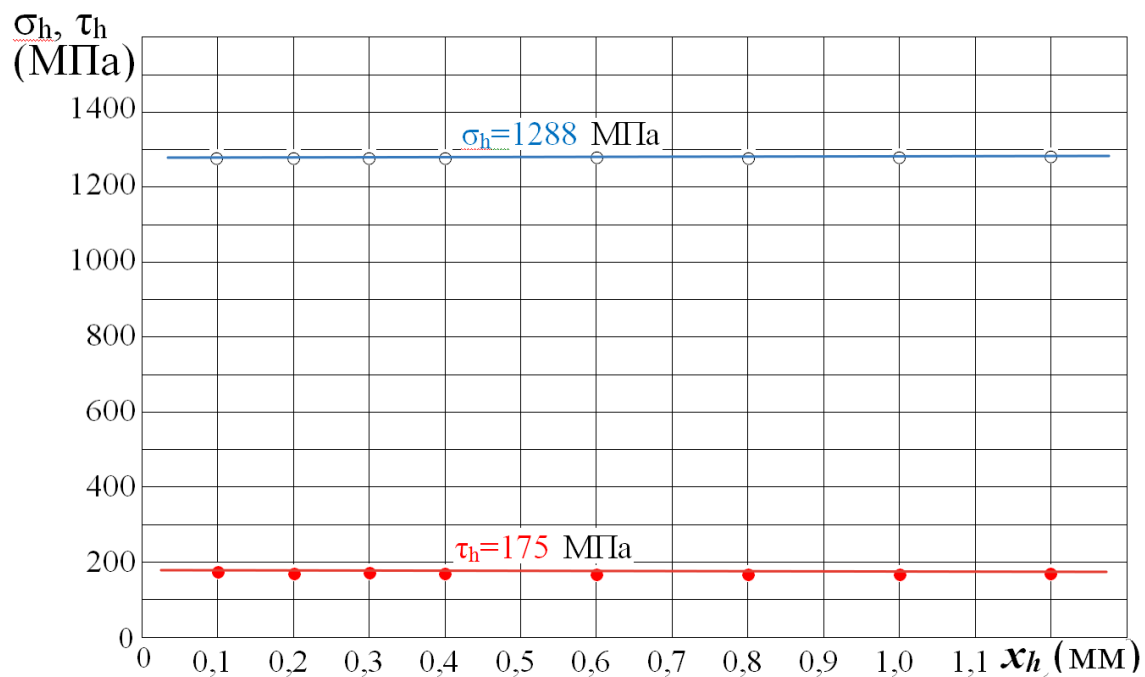


Рис. 4.4.3. Распределение нормальных σ_h и касательных τ_h контактных напряжений на фаске износа по задней поверхности при отрицательном переднем угле γ при обработке титанового сплава. ВТЗ-1 – ВК8, $v = 60$ м/мин, $\gamma = -30^\circ$, $a = 0,21$ мм

4.5. Расчёт НДС режущего клина при отрицательном переднем угле

Расчёт НДС режущего клина при отрицательном переднем угле выполняем после создания его 3D модели (рис. 4.5.3), выбора сетки конечных элементов, задания направления осей, закрепления модели и приложения внешней нагрузки в виде равномерно распределённых контактных напряжений на небольших участках с направлением по осям OZ и OY.

Результаты расчёта эквивалентных напряжений в режущем клине представлены на рис. 4.5.3 и 4.5.4.

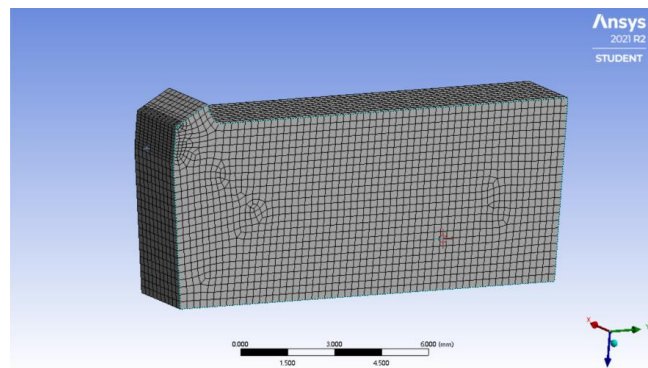


Рисунок 4.5.3. 3D модель реза после задания сетки конечных элементов и назначения направления осей OZ, OY и OX, по которым будут направлены пересчитанные контактные напряжения.

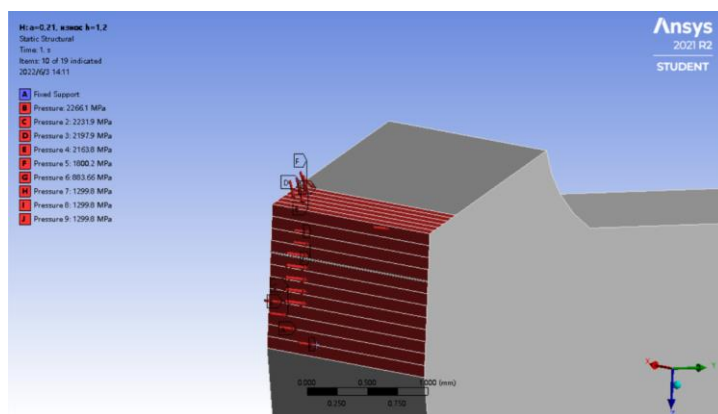
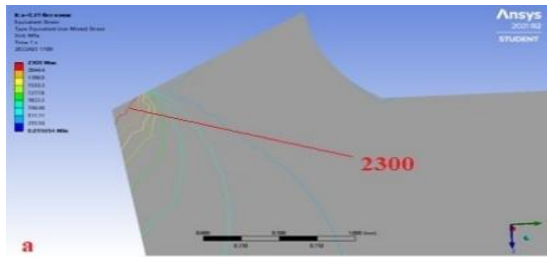
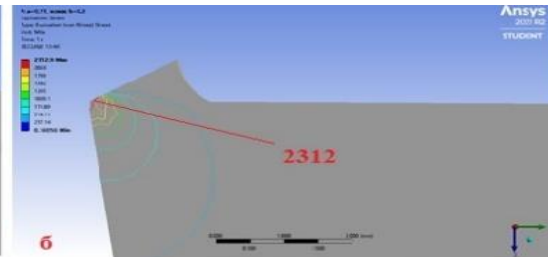


Рисунок 4.5.2. Приложение внешней нагрузки на передней поверхности и на фаске износа по задней поверхности.



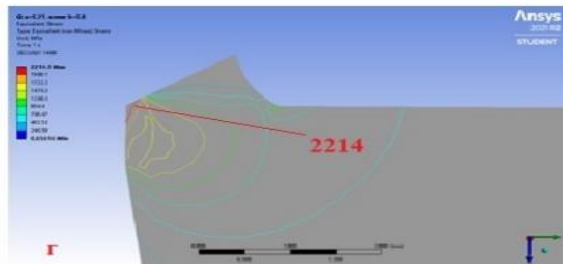
Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв max}}$ в режущем клине при прямоугольном резании диска и титанового сплава. ВТ3-1-ВК8, $\gamma = -30^\circ$, $b = 2,3 \text{ мм}$. a – толщина среза $a = 0,21 \text{ мм}$, $c = 0,293 \text{ мм}$, трапецидальная форма эпюры σ , 6 участков (без износа)



Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв max}}$ в режущем клине при прямоугольном резании диска и титанового сплава. ВТ3-1-ВК8, $\gamma = -30^\circ$, $b = 2,3 \text{ мм}$. a – толщина среза $a = 0,21 \text{ мм}$, $c = 0,293 \text{ мм}$, трапецидальная форма эпюры σ , 6 участков (износ $h = 0,2$)

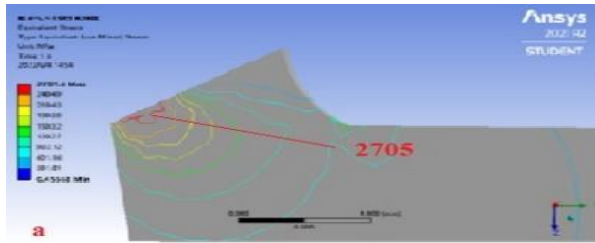


Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв max}}$ в режущем клине при прямоугольном резании диска и титанового сплава. ВТ3-1-ВК8, $\gamma = -30^\circ$, $b = 2,3 \text{ мм}$. a – толщина среза $a = 0,21 \text{ мм}$, $c = 0,293 \text{ мм}$, трапецидальная форма эпюры σ , 6 участков (износ $h = 0,8$)

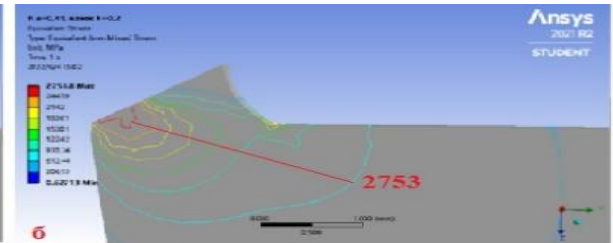


Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв max}}$ в режущем клине при прямоугольном резании диска и титанового сплава. ВТ3-1-ВК8, $\gamma = -30^\circ$, $b = 2,3 \text{ мм}$. a – толщина среза $a = 0,21 \text{ мм}$, $c = 0,293 \text{ мм}$, трапецидальная форма эпюры σ , 6 участков (износ $h = 1,2$)

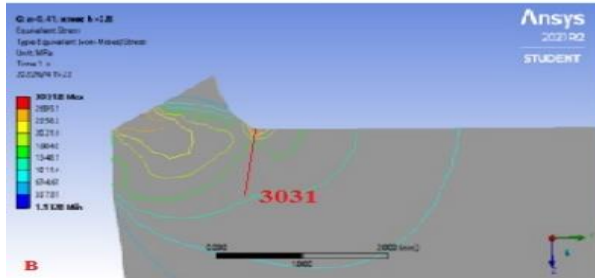
Рисунок 4.5.3. Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа) в режущем клине при различной длине фаски износа по задней поверхности h_f (мм). ВТ3-1 – ВК8, $v = 60 \text{ м/мин}$, $\gamma = -30^\circ$, $a = 0,21 \text{ мм}$



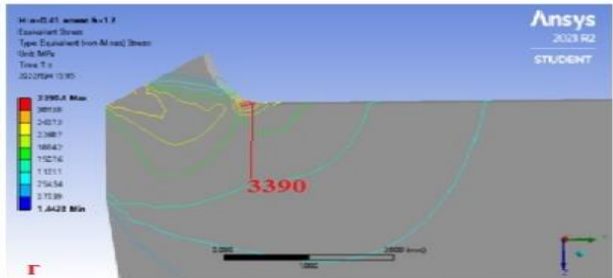
Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв max}}$ в режущем клине при прямоугольном резании диска и титанового сплава ВТ3-1-ВК8, $\gamma = -30^\circ$, $b = 2,3 \text{ мм}$. a – толщина среза $a = 0,41 \text{ мм}$, $c = 0,53 \text{ мм}$, трапецидальная форма эпоры σ , 6 участков (без износ)



Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв max}}$ в режущем клине при прямоугольном резании диска и титанового сплава ВТ3-1-ВК8, $\gamma = -30^\circ$, $b = 2,3 \text{ мм}$. a – толщина среза $a = 0,41 \text{ мм}$, $c = 0,53 \text{ мм}$, трапецидальная форма эпоры σ , 6 участков (износ $h = 0,2$)



Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв max}}$ в режущем клине при прямоугольном резании диска и титанового сплава ВТ3-1-ВК8, $\gamma = -30^\circ$, $b = 2,3 \text{ мм}$. a – толщина среза $a = 0,41 \text{ мм}$, $c = 0,53 \text{ мм}$, трапецидальная форма эпоры σ , 6 участков (износ $h = 0,8$)



Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв max}}$ в режущем клине при прямоугольном резании диска и титанового сплава ВТ3-1-ВК8, $\gamma = -30^\circ$, $b = 2,3 \text{ мм}$. a – толщина среза $a = 0,41 \text{ мм}$, $c = 0,53 \text{ мм}$, трапецидальная форма эпоры σ , 6 участков (износ $h = 1,2$)

Рисунок 4.5.4. Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа) в режущем клине при различной длине фаски износа по задней поверхности h_f (мм). ВТ3-1 – ВК8, $v = 60 \text{ м/мин}$, $\gamma = -30^\circ$, $a = 0,41 \text{ мм}$

По картинам НДС режущего клина определяем **наибольшие деформации** и напряжения в режущем клине.

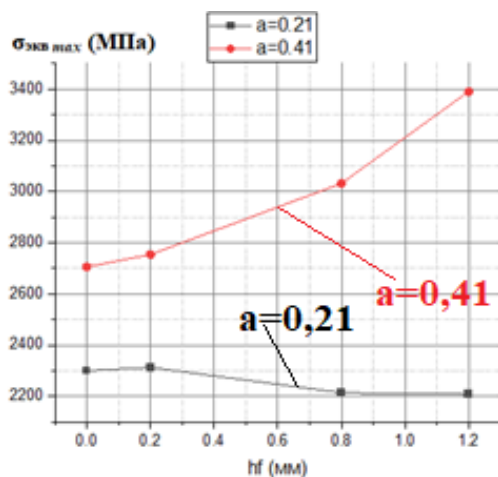
Табл. 4.5.1. – Наибольшие деформации и напряжения при **малом** и **большом** количестве участников при обработки титанового сплава. ВТ3-1—ВК8, $v = 60 \text{ м/мин}$, $\gamma = -30^\circ$, $b = 2,3 \text{ мм}$, $\alpha = 8^\circ$.

№ порядковый и название параметра	Толщина среза a (мм)	Без износа	$h_f = 0,2 \text{ мм}$	$h_f = 0,8 \text{ мм}$	$h_f = 1,2 \text{ мм}$
1	2	3	4	5	6
1 - наибольшие эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв max}}$ (МПа)	$a = 0,21$ ($c = 0,293$)	2300	2312,9	2214,1	2208,3
	$a = 0,41$ ($c = 0,53$)	2705,4	2753,8	3031,8	3390,4
2 - наибольшие нормальные напряжения по оси OY $\sigma_y \text{ max}$ (МПа)	$a = 0,21$	635,21	325,49	300,82	382,98
	$a = 0,41$	183,72	144,14	405,3	570,8

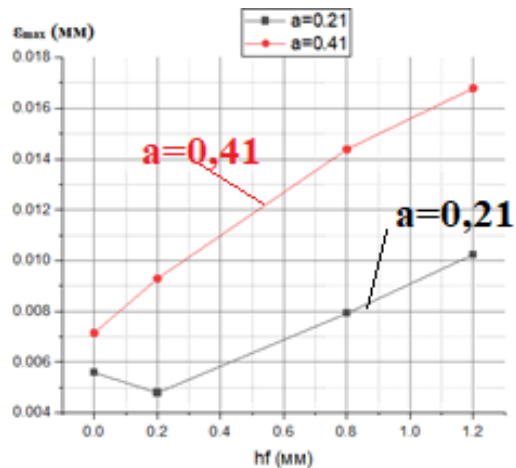
Продолжение таблицы 4.5.1

№ порядковый и название параметра	Толщина среза a (мм)	Без износа	$h_f = 0,2$ мм	$h_f = 0,8$ мм	$h_f = 1,2$ мм
1	2	3	4	5	6
3 - наибольшие нормальные напряжения по оси OZ σ_z max (МПа)	$a = 0,21$	188,17	74,047	602,77	1066,4
	$a = 0,41$	194	390,03	1139,3	1606,2
4 - наибольшие деформация ε_{max} (мм)	$a = 0,21$	0,00558	0,00479	0,0079191	0,010235
	$a = 0,41$	0,00715	0,009285	0,014383	0,016786
5 - наибольшие касательные напряжения в плоскости YOZ τ_{yz} max (МПа)	$a = 0,21$	166,38	59,447	155,77	146,58
	$a = 0,41$	335,42	390,03	374,9	326,04
6 - наибольшие касательные напряжения в плоскости XOZ τ_{xz} max (МПа)	$a = 0,21$	102,69	139,27	206,82	262,73
	$a = 0,41$	118,78	197,43	281,66	396,38

Сравнение результатов расчётов НДС режущего клина при разной длине фаски износа по задней поверхности и толщине среза показывает, что при небольшой толщине среза $a = 0,21$ мм увеличение длины фаски приводит к небольшому уменьшению величины наибольшего эквивалентного напряжения (с 2300 до 2208 МПа), а при большой толщине среза $a = 0,41$ мм увеличение длины фаски приводит к увеличению величины наибольшего эквивалентного напряжения (с 2705 до 3390 МПа) (см. рис. 4.5.5).



а



б

Рисунок. 4.5.5. Влияние длины искусственной фаски износа по задней поверхности h_f (мм) и толщины среза a (мм) на наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$ (МПа) (а) и на наибольшую деформацию в простом режущем клине ε_{max} (мм) (б). ВТЗ-1—ВК8, $\gamma = -30^\circ$,

Анализ графиков рис. 4.5.5 показывает, что при увеличении длины фаски при $a = 0,41$ мм начинается очень интенсивный рост величины наибольшего эквивалентного напряжения из-за большой величины контактных напряжений на фаске износа у режущей кромки – 3400 МПа (см. рис. 3.4.8). Величина наибольшей деформации при большой толщине среза $a = 0,41$ мм увеличивается более интенсивно, чем при небольшой толщине среза. Необходимо отметить, что несмотря на уменьшение величины наибольшего эквивалентного напряжения при увеличении длины фаски при $a = 0,21$ мм, график наибольшей деформации показывает её существенное увеличение.

Когда длина фаски износа задней поверхности h_f становится больше 1,1 мм, наибольшее эквивалентное напряжение при $a = 0,41$ мм становится больше предельно допустимого, что приведёт к сколу режущей части и это подтверждается практикой обработки резанием.

Заключение

1. Уменьшение глубины резания t позволяет увеличить скорость резания v при сохранении стойкости T .
2. Врезание по дуге позволяет уменьшить интенсивность износа фрезы за счёт более плавного роста нагрузки на зуб при его входе в контакт и уменьшения толщины стружки на выходе зуба фрезы. Современные системы CAD / CAM позволяют создавать траекторию инструмента с практически постоянным углом зацепления, что уменьшает тепловую нагрузку на зуб фрезы.
3. Подача охлаждающей жидкости под высоким давлением значительно повышает эффективность фрезерования, однако применение СОЖ часто не допустимо из-за загрязнения дорогой стружки и невозможности её вторичной переработки.
4. Разная ширина резания B при фрезеровании в несколько проходов снижает интенсивное образование проточин и влияние негативных факторов.
5. Фрезерование с большой подачей (HFM) позволяет увеличить производительности обработки, необходимо использовать фрезы с большим количеством зубьев и малым углом в плане, большие подачи на зуб.
6. Измерение технологических составляющих P_z и P_y силы резания, действующих на зуб фрезы, трудно реализуемо из-за изменения

направления действия сил. Можно лишь моделировать их изменение или фрезеровать с глубиной резания t , равной половине диаметра фрезы при **концевом** фрезеровании (или при ширине фрезерования B , равной половине диаметра фрезы при **торцовом** фрезеровании).

7. Изменение величины составляющих силы резания при попутном фрезеровании однозубой концевой фрезой изменяются волнообразно, при этом нет совпадения по фазе сил P_z и P_y .

8. Скорость резания v мало влияет на величину наибольшей радиальной составляющей P_y силы резания при фрезеровании уступа.

9. Глубина резания t имеет большее влияние на силу резания, чем скорость подачи. По результатам исследования установлено, что глубина резания 0,75 мм при **концевом** фрезеровании предпочтительнее.

10. Износ по задней поверхности $h_f = 1,1$ мм принимается как предельно допустимый при черновой обработке ВТЗ-1.

13. При увеличении толщины среза увеличивается наибольшее нормальное контактное напряжение как на передней поверхности, так и на фаске износа по задней поверхности.

14. При $\gamma = 0^\circ$ $\sigma_{\text{экв max}}$ существенно зависят от характера эпюры нормальных контактных напряжений σ и длины контакта стружки с передней поверхностью s .

15. При отрицательном переднем угле $\gamma = -30^\circ$ и округлении режущей кромки на фаске задней поверхности действуют равномерно

распределённые контактные напряжения. При резании ВТЗ-1 с передним углом $\gamma = -30^\circ$, радиальная составляющая силы резания на передней поверхности $P_{y_n} = 1400$ Н, что больше в 3 раза чем при резании с передним углом $\gamma = 0^\circ$ ($P_{y_n} = 440$ Н). В то же время уровень нормальных контактных напряжений на фаске износа вдвое меньше, что объясняет работоспособность режущих инструментов даже при большом износе при обработке титановых сплавов.

16. Имеется примерное равенство нормальных контактных нагрузок на фаске при резании инструментом с большим отрицательным передним углом $\gamma = -30^\circ$, $\sigma_h = 1300$ МПа) и с округленной режущей кромкой ($\rho = 0,07...0,35$ мм, $\sigma_h = 1370...1650$ МПа) при одинаковых режимах обработки.

17. Наибольшее эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв max}}$ у изношенного инструмента при $\gamma = -30^\circ$ будет меньше чем при $\gamma = 0^\circ$ (2754 МПа против 3750 МПа при $h_f = 0,2$ мм и $a = 0,41$ мм), поэтому черновую обработку титановых сплавов необходимо выполнять с отрицательным передним углом.

Список литературы

1. Справочное руководство ISCAR Обработка титана [Электронный ресурс]. – Электрон. версия печ. публ. – Режим доступа: https://www.iscar.ru/Catalogs/publication-2019/machining_titanium_rus_metric.pdf, свободный. – Загл. с тит. экрана (дата обращения: 02.04.2022).
2. Геометрический анализ конструкций сборных торцевых фрез с СМП/ Никулин Е.В. Москва: Машиностроение, 2010.-389 с
3. Che-Haron, C.H. Tool life and surface integrity in turning titanium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 118 (1-3) (2001) 231-237.
4. Развитие науки о резании металлов /В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев и др. – Москва: Машиностроение, 1967. – 416 с.
5. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента/Полетика М.Ф. – Москва: Машиностроение, 1969. – 148 с.
6. Методика измерения контактных напряжений на поверхностях резца [Электронный ресурс] / В. Н. Козлов [и др.]; науч. рук. В. Н. Козлов // Молодежь и современные информационные технологии : сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 7-11 ноября 2016 г.в 2 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Институт кибернетики (ИК) ; под ред. В. С. Аврамчук [и др.]. — Томск: Изд-во ТПУ,

2016. — Т. 2. — [С. 350-352]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети Интернет.

7. Филиппов А.В., Проскоков А.В. Исследование процесса стружкообразования при резании металлов методом цифровой корреляционной спекл-интерферометрии. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2014, № 2, с. 100–113.

8. Полетика М.Ф., Утешев М.Х. Исследование процесса резания поляризационно-оптическим методом. — Известия Томского политехнического института. 1964. т. 114. С. 21-32.

9. Чэнь Юэчжоу. Расчёт эпюр контактных напряжений при обработке стали / Чэнь Юэчжоу, Чжан Цзяюй, В. Н. Козлов; науч. рук. В. Н. Козлов // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов сборник докладов X Всероссийской научно-практической конференции, Томск, 22-24 апреля 2020 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) . — Томск : Изд-во ТПУ , 2020 . — [С. 243-250] .

10. Kozlov Victor Nicolaevich, Zhang Jiayu, Guo Yingbin, Sabavath Sai Kiran. Contact loads on surfaces of worn out cutter in steel machining [Electronic resource] / Zhang Jiayu [et al.]; sci. adv. V. N. Kozlov // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов : сборник докладов VIII Всероссийской научно-практической конференции, Томск, 16-18 мая 2018 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2018. — [С. 39-45].

11. Особенности фрезерования титановых сплавов / В. Н. Козлов, А. Даурембеков, М. Ци // Современные проблемы машиностроения сборник трудов XIV Международной научно-технической конференции, г. Томск, 25-30 октября 2021 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ); под ред. Е. Н. Пашкова. – Томск: Томский политехнический университет, 2021 . – с. 86-87.
12. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М.: Справочник. - 2-е изд. доп. М.: Металлургия, 1983. - 352 с: ил.
11. Кожевников Д.В., Гречишников В.А., Кирсанов С.В., Григорьев С.Н., Схиртладзе А.Г. Режущий инструмент: учебник для вузов / Под общ. ред. С.В. Кирсанова. М. : Машиностроение, 2014, 520 с.
12. Кожевников Д.В., Кирсанов С.В. Резание материалов. –М.: Машиностроение, 2012. –304 с.
13. Развитие науки о резании металлов /В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев и др. – Москва: Машиностроение, 1967. – 416 с.
14. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента/Полетика М.Ф. – Москва: Машиностроение, 1969. – 148с.
15. Чжан Ц., Козлов В.Н. Влияние вида нагружения на расчёт внутренних напряжений в режущем клине // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 8: в 2 ч. Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. С. 352-356.

16. Возможности использования динамометра Kistler для испытания металлорежущих станков. Утенков В.М., Быков П.А. / 77-48211/492011, № 10 октябрь 2012 г, Инженерный вестник, №10, 2012
17. Филиппов А.В., Проскоков А.В. Исследование процесса стружкообразования при резании металлов методом цифровой корреляционной спекл-интерферометрии. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2014, № 2, с. 100–113.
18. Каталог инструментов. Твёрдосплавный инструмент российского производства. АО «Кировоградский завод твёрдых сплавов» 2019, открытый доступ www.kzts.ru.
19. Зубарев Ю.М., Современные инструментальные материалы: учебник/ 2-е изд., испр. и доп. — СПб.:Издательство «Лань», 2014, 304с.
20. Бобров В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов. М.: Машгиз, 1962. 152 с.
21. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344с.
22. Справочник конструктора-инструментальщика. / под ред. В.А. Гречишникова, С.В. Кирсанова. М.: Машиностроение, 2006, 542 с.
23. Полетика М.Ф., Собанин А.Л., Кужларов В.Н. Силы и деформации на различных участках задней поверхности резца // Вопросы оптимального резания металлов. – Уфа, Изд-во УФАИ, 1976. – С. 76-78.

24. [ГОСТ 22615-77](#). Система «человек-машина». Выключатели переключатели типа «Тумблер». Общие эргономические требования.
25. [ГОСТ 22902-78](#). Система «человек-машина». Отсчетные устройства индикаторов визуальных. Общие эргономические требования.
26. [ГОСТ EN 894-3-2012](#). Безопасность машин. Эргономические требования к оформлению индикаторов и органов управления. Часть 3. Органы управления.
27. [ГОСТ Р ИСО 14738-2007](#). Безопасность машин. Антропометрические требования при проектировании рабочих мест машин.
28. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие / О.Б. Назаренко, Ю.А. Амелькович. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. — 178 с.
29. Методические указания по разработке раздела «Социальная ответственность» ВКР магистра и специалиста всех направлений (специальностей) и форм обучения ТПУ/Е.Н. Пашков, А.И. Сечин, И.Л. Мезенцева – Томск: Изд-во ТПУ, 2019. – 24 с.
30. Методические указания по разработке раздела «Социальная ответственность» ВКР бакалавра всех направлений (специальностей) и форм обучения ТПУ/Сост. Е.Н. Пашков, А.И. Сечин, И.Л. Мезенцева – Томск: Изд-во ТПУ, 2019. – 24 с.

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

Студенту:

Группа	ФИО
4АМ01	Даурембеков Асылбек Муратович

Школа	ИШНПТ	Отделение Школа	Материаловедение
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.01 Машиностроение

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

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
Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование
Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды 30 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

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

Перечень графического материала

Оценка конкурентоспособности ИП; Матрица SWOT; Диаграмма Ганта; Бюджет НИ; Основные показатели эффективности НИ.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	14.03.22
---	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН	Гасанов Магеррам Али Оглы	д.э.н.		14.03.22

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ01	Даурембеков Асылбек Муратович.		14.03.22

5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.

Введение

Основная цель данного раздела – оценить перспективность развития и планировать финансовую и коммерческую ценность конечного продукта, представленного в рамках исследовательской работы. 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 Исследование влияния геометрических параметров фрез и их СМП, износа и режима резания на прочность СМП при черновой обработке титановых сплавов

**5.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности
проведения исследований с позиции ресурсоэффективности 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 титанового сплава
- 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			Конкуренто-способность		
		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 установления	0,05	4	5	3	0,2	0,25	0,15
4. Специальное оборудование(динамометра)	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
5. Стабильность соединения с державкой	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

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкуренто-способность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
3. Финансирование научного исследования	0,08	5	4	4	0,4	0,32	0,32
Итого	1	46	43	36	4,66	4,33	3,65

Расчет конкурентоспособности, на примере актуальность исследования второго конкурента, определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i = 0,1 \cdot 3 = 0,3$$

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, в этой работе проведен SWOT-анализ с детальной оценкой сильных и слабых сторон исследовательского проекта, а также его возможностей и угроз.

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 5.1.2.1:

Таблица 5.1.2.1 – Матрица SWOT-анализа

Сильные стороны	Слабые стороны
С1. Низкая цена исходного сырья.	Сл1. Отсутствие разных СМП для проведения испытания.
С2. Более точные экспериментальные результаты с использующим новым оборудованием.	Сл2. Долгое время подготовки к моделированию при проведении научного исследования.
С3. Более свежая информация, которая была использована для разработки проекта.	Сл3. Высокие требования к экспериментальному оборудованию.
С4. Перспективный способ для обработки данных.	Сл4. Эксперименты имеют большие погрешности и неопределенности.
С5. Квалифицированный персонал.	Сл5. Высокие требования к постановке внутренних настройки в программу ANSYS.
Возможности	Угрозы
В1. Использование оборудования ИНШПТ ТПУ	У1. Отсутствие спроса на новые результаты исследования в частных предприятиях.
В2. Появление потенциального спроса на новые геометрии СМП.	У2. Появление зарубежных аналогов и более ранний их выход на рынок.
В3. Повышение точности.	У3. Развитая конкуренция технологий производства.
В4. Уменьшение стоимости конкурентных разработок.	У4. Возникновение новых технологических производств.
В5. Привлечение других информационных технологий для решения вопросов машиностроения.	У5. Текущие компьютерные программы ANSYS возможно не допущены к применению в дальнейшей обстановке.

На втором этапе на основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надёжность его реализации. Соотношения параметров представлены в таблицах 5.1.2.2–5.1.2.3:

Таблица 5.1.2.2 – «Возможности проекта и сильные стороны».

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

Таблица 5.1.2.3– «Возможности проекта и слабые стороны».

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

Таблица 5.1.2.4 – «Угрозы проекта и сильные стороны».

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

Таблица 5.1.2.5 –«Угрозы проекта и слабые стороны».

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

Результаты анализа представлены в итоговую таблицу 5.1.2.6.

Таблица 5.1.2.6 – Итоговая таблица SWOT-анализа.

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта</p> <p>С1. Низкая цена исходного сырья. С2. Более точные экспериментальные результаты. С3. Более свежая информация, которая была использована для разработки проекта. С4. Перспективный способ для обработки данных. С5. Квалифицированный персонал.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта</p> <p>Сл1. Отсутствие разных СМП для проведения испытания. 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..</p>
<p>Возможности В1. Использование оборудования ИНШПТ ТПУ В2. Появление потенциального спроса на новые геометрии СМП. В3. Повышение точности . В4. Уменьшение стоимости конкурентных разработок. В5. Привлечение других информационных технологий для решения вопросов машиностроения.</p>	<p>Направления развития</p> <p>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.</p>	<p>Сдерживающие факторы</p> <p>В1Сл3Сл4. Эксперименты имеют большие погрешности и неопределенности с использованием оборудования ИНШПТ ТПУ.</p>
<p>Угрозы</p>	<p>Угрозы развития</p>	<p>Уязвимости:</p>

<p>У1. Отсутствие спроса на новые результаты исследования в частных предприятиях.</p> <p>У2. Появление зарубежных аналогов и более ранний их выход на рынок.</p> <p>У3. Развитая конкуренция технологий производства.</p> <p>У4. Возникновение новых технологических производств.</p> <p>У5. Текущие компьютерные программы ANSYS возможно не допущены к применению в дальнейшей обстановке.</p>	<p>У1С4. Несмотря на отсутствие спроса на новые результаты исследования в частных предприятиях, наши исследования обладают высокой перспективностью в данной сфере.</p> <p>У2С2С3. Более точные результаты исследования по сравнению с другими технологиями и более свежие результаты по сравнению с зарубежными аналогами.</p> <p>У5С5. Квалифицированный персонал даёт возможность преодолеть проблемы с возможным отсутствием правила использования программы ANSYS.</p>	<p>У2Сл4. Появление зарубежных аналогов и более ранний их выход на рынок угрожает полученным результатам исследования за счёт их погрешности и неопределенности в некоторых случаях.</p> <p>У4Сл1 Возникновение новых технологических производств, например технология 3D печати может заменить традиционную технологию.</p>
--	---	--

В результате SWOT-анализа показано, что высокие точные напряженно-деформированное состояние (НДС) СМП 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 5.2.1.1:

Таблица 5.2.1.1 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей.

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка темы диссертации	1	Составление и утверждение темя диссертации, утверждение плана-графика.	Научный руководитель
	2	Календарное планирование выполнения диссертации.	Инженер, научный руководитель
Теоретические исследования	3	Изучение литературы по токарной обработке	Инженер
	4	Метод разрезного реза	Инженер
Экспериментальные исследования	5	Создать 3D модели СМП, Измерить длину контакта стружки, Расчёт эпюр контактных напряжений и их параметров на передней поверхности.	Инженер
	6	Исследование НДС СМП 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	10	Составление пояснительной записки.	Инженер
--------------------------	----	------------------------------------	---------

5.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения.

При проведении научных исследований основную часть стоимости разработки составляют трудовые затраты, поэтому определение трудоемкости проводимых работ является важным этапом составления бюджета.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости использована следующая формула:

$$t_{ожi} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5} \quad (5,2)$$

Где:

$t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, человеко-дни;

t_{mini} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни;

t_{maxi} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни;

Зная величину ожидаемой трудоемкости, можно определить продолжительность каждой i -ой работы в рабочих днях T_{ri} , при этом учитывается параллельность выполнения работ разными исполнителями. Данный расчёт позволяет определить величину заработной платы.

$$T_{Pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i} \quad (5,3)$$

Где:

T_{Pi} – продолжительность одной работы, рабочие дни;

$t_{ожi}$ – 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:

$$T_{ki} = T_{Pi} \times k \quad (5,4)$$

Где:

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

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

k – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{праз}} = \frac{365}{365 - 89 - 29} = 1,48 \quad (5,5)$$

Где:

$T_{кал}$ – общее количество календарных дней в году;

$T_{вых}$ – общее количество выходных дней в году;

$T_{праз}$ – общее количество праздничных дней в году;

Расчеты временных показателей проведения научного исследования

представляются в таблице 5.2.2.1:

Таблица 5.2.2.1 – Временные показатели проведения научного исследования.

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{Pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{mini} , чел-дни		t_{maxi} , чел-дни		$t_{ожи}$, 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 тема 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 токарной обработке.	-	40	-	50	-	44	44	65
4. Метод разрезного реза.	-	50	-	60	-	54	54	80
5. Создать 3D моделей СМП, Измерить длины контакта стружки, Расчёт эпюр контактных напряжений и их параметров на передней поверхности.	-	10	-	15	-	12	12	18
6. Исследование НДС СМП с помощью программы ANSYS	30	50	40	60	34	54	54	63
7. Проведение компьютерного эксперимента.	-	5	-	8	-	6,2	6,2	9
8. Обработка полученных данных.	-	8	-	12	-	9,6	9,6	14
9. Оценка правильности полученных результатов.	5	8	6	10	5,4	8,8	8,8	10
10. Составление пояснительной записки.	-	20	-	40	-	28	28	41
Итого:	37	193	50	258	42,2	219	220.4	305

Примечание:

Исп.1 – научный руководитель; Исп.2 – инженер;

На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 5.2.2.2).

Таблица 5.2.2.2 – Диаграмма Ганта.

№	Виды работ	Исп	T_{ki} , кал. дн.	Продолжительность работ													
				январь - март			апрель - июнь			Июль - сентябрь			Октябрь - декабрь			январь	
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	
1	Составление и утверждение темы диссертации, утверждение плана-графика.	Исп 1	2	█													
2	Календарное планирование выполнения диссертации.	Исп 1 Исп 2	3	█													
3	Изучение литературы по токарной обработке.	Исп 2	65	█	█	█											
4	Метод разрезного реза.	Исп 2	80			█	█	█									
5	Создать 3D моделей СМП, Измерить длины контакта стружки, Расчёт эпюр контактных напряжений и их параметров на передней поверхности	Исп 2	18						█								
6	Исследование НДС СМП с помощью программы ANSYS	Исп 1 Исп 2	63						█	█	█	█	█				
7	Проведение компьютерного эксперимента.	Исп 2	9														
8	Обработка полученных данных.	Исп 2	14										█				
9	Оценка правильности полученных результатов.	Исп 1 Исп 2	10										█	█			
10	Составление пояснительной записки.	Исп 2	41												█	█	█

Примечание:



– Исп. 1 (научный руководитель);



– Исп. 2 (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.

Данная часть включает затрат всех материалов, используемых при исследовании. Результаты расчета затрат представлены в таблице 5.3.1.1.

Таблица 5.3.1.1 – Материальные затраты.

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во, ед.	Сумма, руб.
Комплекс канцелярских принадлежностей	340	5	1 700
Картридж для лазерного принтера	3 490	1	3 490

Офисные бумаги А4	490	1	490
Итого:			5680

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:

$$H_A = \frac{1}{n} \quad (5,6)$$

Где: n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A I}{12} \times t \quad (5,7)$$

Где:

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

Таблица 5.3.2.1 – Затраты на оборудование

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

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

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{6} = 0.17$$

Общая сумма амортизационных отчислений (по формуле 5.7):

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

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 одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \times T_p \quad (5,8)$$

Где:

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата, руб.;

T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дней. (по таблице 5.3.3.1 для инженера: $T_{p2} = 219$ дней, для руководителя: $T_{p1} = 42,2$ дней).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле 5.9:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_M \times M}{F_d} \quad (5,9)$$

Где:

Z_M – месячный должностной оклад работника, руб.;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. Дней (в данном случае $F_d = 247$ дней);

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года (при отпуске в 118 раб. дней, $M = 8,1$ месяц, 6-дневная рабочая неделя);

Должностной оклад работника за месяц определяется по формуле 6:

$$Z_M = Z_{mc} \times (1 + k_{пр} + k_d) \times k_p \quad (6)$$

Где:

Z_{mc} – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб (для руководителя $Z_{mc1} = 28600$ руб, а для инженера $Z_{mc2} = 11280$ 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. Томск);

По формуле 6.10 определяется должностной оклад руководителя за месяц:

$$\begin{aligned} Z_{M1} &= Z_{mc1} \times (1 + k_{пр} + k_d) \times k_p = 28600 \times (1 + 0,3 + 0,2) \times 1,3 \\ &= 55770 \text{ руб} \end{aligned}$$

По формуле 4,10 определяется должностной оклад инженера за месяц:

$$\begin{aligned} Z_{M2} &= Z_{mc2} \times (1 + k_{пр} + k_d) \times k_p = 11280 \times (1 + 0,3 + 0,2) \times 1,3 \\ &= 21996 \text{ руб} \end{aligned}$$

Среднедневная заработная плата у руководителя рассчитывается по формуле 6:

$$Z_{\text{дн1}} = \frac{Z_{\text{м}} \times M}{F_{\text{д}}} = \frac{55770 \times 8,1}{247} = 1828,89 \text{ руб}$$

Среднедневная заработная плата у инженера рассчитывается по формуле 6:

$$Z_{\text{дн2}} = \frac{Z_{\text{м}} \times M}{F_{\text{д}}} = \frac{21996 \times 8,1}{247} = 721,33 \text{ руб}$$

Основная заработная плата руководителя рассчитывается по формуле 6:

$$Z_{\text{осн1}} = Z_{\text{дн1}} \times T_{\text{р1}} = 1828,89 \times 42,2 = 77179,2 \text{ руб}$$

Основная заработная плата инженера рассчитывается по формуле 5,8:

$$Z_{\text{осн2}} = Z_{\text{дн2}} \times T_{\text{р2}} = 721,33 \times 219 = 157971,3 \text{ руб}$$

Таким образом, затраты на общую основную заработную плату составляют:

$$Z_{\text{осн обще}} = Z_{\text{осн1}} + Z_{\text{осн2}} = 77179,2 + 157971,3 = 235150,5 \text{ руб}$$

Перечисленные информации представляются в таблице 6.6.1:

Таблица 5.3.3.1 – Расчеты основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{\text{мс}}$, руб	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{д}}$	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}$, руб	$Z_{\text{дн}}$, руб	$T_{\text{р}}$, дн	$Z_{\text{осн}}$, 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

5.3.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы.

Дополнительная заработная плата определяется по формуле 6.1:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \times Z_{\text{осн}} \quad (6,1)$$

Где:

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата;

$Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата;

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

По формуле 6.1 определяется дополнительная заработная плата для руководителя:

$$Z_{\text{доп1}} = K_{\text{доп}} \times Z_{\text{осн1}} = 0,15 \times 77179,2 = 11576,8 \text{ руб}$$

По формуле 6.1 определяется дополнительная заработная плата для инженера:

$$Z_{\text{доп2}} = K_{\text{доп}} \times Z_{\text{осн2}} = 0,15 \times 157971,3 = 23695,7 \text{ руб}$$

Таким образом, общая дополнительная заработная плата составляет:

$$Z_{\text{доп обще}} = Z_{\text{доп1}} + Z_{\text{доп2}} = 11576,9 + 23695,7 = 35272,6 \text{ руб}$$

5.3.5. Отчисления во внебюджетные фонды

Отчисления во внебюджетные фонды определяются по формуле 6.2:

$$З_{\text{внеб1}} = k_{\text{внеб}} \times (З_{\text{осн1}} + З_{\text{доп1}}) \quad (6,2)$$

Где:

$k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2021 году –30% (ст. 425 НК РФ).

Отчисления во внебюджетные фонды для руководителя определяются по формуле 6.2:

$$З_{\text{внеб1}} = K_{\text{внеб}} \times (З_{\text{осн1}} + З_{\text{доп1}}) = 0,3 \times (77179,2 + 11576,8) = 26626,8 \text{ руб}$$

Отчисления во внебюджетные фонды для инженера определяются по формуле 8.12:

$$\begin{aligned} З_{\text{внеб2}} &= K_{\text{внеб}} \times (З_{\text{осн2}} + З_{\text{доп2}}) = 0,3 \times (157971,3 + 23695,7) \\ &= 54500,1 \text{ руб} \end{aligned}$$

Таким образом, общие затраты на составляется отчисления во внебюджетные фонды:

$$З_{\text{внеб обще}} = З_{\text{внеб1}} + З_{\text{внеб2}} = 26626,8 + 54500,1 = 81126,9 \text{ руб}$$

5.3.6. 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 6.3:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей 1} \div 5)k_{\text{нр}} \quad (6,3)$$

Где:

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

$$\begin{aligned} Z_{\text{накл}} &= (5680 + 21250 + 235150,5 + 35272,6 + 81126,9) \times 0,16 \\ &= 378480,1 \times 0,16 = 60556,9 \text{ руб} \end{aligned}$$

5.3.7. Бюджетная стоимость НИР

Группировка затрат по статьям представляется в таблице 5.3.7.1:

Таблица 5.3.7.1 – Группировка затрат по статьям.

Статьи							
1	2	3	4	5	6	7	8
Материалы, руб	Амортизация, руб	Основная заработная плата, руб	Дополнительная заработная плата, руб	Отчисления на социальные нужды, руб	Итого без накладных расходов, руб	Накладные расходы, руб	Стоимость бюджета, руб
5680	21250	235150,5	35272,6	81126,9	378480,1	60556,9	439036,8

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется бюджет НИ «Исследование прочности сменных многогранных пластин методом конечных элементов» по форме, приведенной в таблице

5.3.7.2. В таблице также представлено определение бюджета затрат двух конкурирующих научно-исследовательских проектов.

Таблица 5.3.7.2 – Группировка затрат по статьям.

№	Наименование статьи	Сумма, руб.		
		Текущий Проект	Исп.2	Исп.3
1	Материальные затраты НИР	5680	9438,45	4800
2	Затраты на специальное оборудование	27083	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	60556,8	85674,86	74052,62
Бюджет затрат НИР		439036,8	1506983,39	538881,50

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

интегральных показателей финансовой эффективности и 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 по формуле 6,4:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{ri}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (6,4)$$

Где:

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

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

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения из всех вариантов;

По перечисленным вычислениям определяются общие затраты для всех вариантов:

$$\Phi_{\text{теку.проект}} = 439036,8$$

$$\Phi_{\text{исп.1}} = 1506983$$

$$\Phi_{\text{исп.2}} = 538881,5$$

$$\Phi_{\text{max}} = \Phi_{\text{исп.1}} = 1506983$$

По формуле 6,4 определяется интегральный финансовый показатель для текущего проекта:

$$I_{\text{финр}}^{\text{текущ.проект}} = \frac{\Phi_{\text{текущ.проект}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{439036}{1506983} = 0.29$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.1}} = \frac{\Phi_{\text{исп.1}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{1506983}{1506983} = 1$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}} = \frac{\Phi_{\text{исп.2}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{538881}{1506983} = 0.35$$

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

Интегральные показатели ресурсоэффективности всех вариантов определяются путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 5.4.1).

Таблица 5.4.1 – Сравнительная оценка характеристик всех вариантов.

Объекты исследования Критерии	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

По данным из таблицы 5.4.1 определяется интегральный показатели ресурсоэффективности для текущего проекта:

$$I_{p}^{\text{текущ.проект}} = 0.3 \times 5 + 0.15 \times 4 + 0.2 \times 5 + 0.2 \times 5 + 0.15 \times 5 = 4.85$$

По данным из таблицы 5.4.1 определяется интегральный показатели ресурсоэффективности для первого конкурентного проекта:

$$I_{p}^{\text{исп.1}} = 0.3 \times 5 + 0.15 \times 5 + 0.2 \times 4 + 0.2 \times 4 + 0.15 \times 4 = 4.45$$

По данным из таблицы 5.4.1 определяется интегральный показатели ресурсоэффективности для второго конкурентного проекта:

$$I_{p}^{\text{исп.2}} = 0.3 \times 4 + 0.15 \times 3 + 0.2 \times 4 + 0.2 \times 5 + 0.15 \times 4 = 4.05$$

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

Интегральные показатели эффективности всех вариантов

вычисляются на основании показателей ресурсоэффективности и интегральных финансовых показателей по формуле 6,5:

$$I_{\text{эф.}i} = \frac{I_p^{\text{исп.}i}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}} \quad (6,5)$$

Где: $I_{\text{эф.}i}$ – интегральный показатель эффективности i -ого варианта разработки;

$I_p^{\text{исп.}i}$ – интегральный показатель ресурсной эффективности i -ого варианта разработки;

$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель i -ого варианта разработки;

По формуле 6.5 определяется интегральный показатель эффективности для текущего проекта:

$$I_{\text{эф.текущ.проект}} = \frac{I_p^{\text{текущ.проект}}}{I_{\text{финр}}^{\text{текущ.проект}}} = \frac{4.85}{0.33} = 7.7$$

По формуле 6.5 определяется интегральный показатель эффективности для первого конкурентного проекта:

$$I_{\text{эф.исп.1}} = \frac{I_p^{\text{исп.1}}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.1}}} = \frac{4.45}{1} = 4.45$$

По формуле 6.5 определяется интегральный показатель эффективности для второго конкурентного проекта:

$$I_{\text{эф.исп.2}} = \frac{I_p^{\text{исп.2}}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}}} = \frac{4.05}{0.35} = 11.6$$

Далее среднее значение интегрального показателя эффективности каждого варианта НИР сравнивалось с средним значением интегрального показателя эффективности текущего проекта с целью определения сравнительной эффективности проектов (таблица 5.4.2).

Таблица 5.4.2– Сравнительные эффективности разработок.

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,29	1	0,35
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,85	4,45	4.05
3	Интегральный показатель эффективности	14.7	4,45	11.6
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,30	0,78

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 439036,8 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 0,29, 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 11,6 (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 4АМ01	ФИО Даурембеков Асылбек Муратович		
Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	Материаловедение
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	15.04.01 «Машиностроение»

Тема ВКР:

Исследование прочности сменных многогранных пластин при фрезеровании титановых сплавов	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>Введение Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. Описание рабочей зоны (рабочего места) при эксплуатации проектного решения/при эксплуатации</p>	<p><i>Объект исследования:</i> сменные многогранные пластины (СМП) <i>Область применения:</i> машиностроение <i>Рабочая зона:</i> производственное помещение 16а корпус, 101а <i>Размеры помещения:</i> 6*9 м. <i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> Станок универсально фрезерный станок FU 251 , динамометр Kistler, Микроскоп. <i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> установить динамометр в станок, проведение экспериментов по обработке и сбор данных, отойте компьютерное программное обеспечение для анализа данных.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и эксплуатации:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации проектного решения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018) ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования. Федеральный закон от 28 декабря 2013 г. N 426-ФЗ "О специальной оценке условий труда.</p>
<p>2. Производственная безопасность при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов – Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора 	<p>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. Повышенный уровень шума; 2. Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения; 3. Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего</p>

	<p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов: использование защитных костюмов, беруши, наушники, защитные ограждения.</p> <p>Расчет: расчет системы искусственного освещения</p>
<p>3. Экологическая безопасность <u>при эксплуатации</u></p>	<p>Воздействие на селитебную зону: при обработке титанового сплава образуется шум</p> <p>Воздействие на литосферу: твердые металлические отходы</p> <p>Воздействие на гидросферу: сброс охлаждающей воды при использовании в качестве охладителя рек, прудов</p> <p>Воздействие на атмосферу: при работе станков воздух загрязняется испарениями от смазочно-охлаждающих жидкостей</p>
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях <u>при эксплуатации</u></p>	<p>Возможные ЧС: Природные катастрофы (морозы); Геологические воздействия (провалы территории); Техногенные аварии (отказ систем безопасности; нарушение контроля и управления оборудования; пожар)</p> <p>Наиболее типичная ЧС: Пожар.</p>
<p>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</p>	
14.03.22	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент, ООД, ШБИП	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н.		14.03.22

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ01	Даурембеков Асылбек Муратович		14.03.22

6. Социальная ответственность

Введение

Сущность проекта ВКР представляется собой определённые рациональные геометрические параметры режущего инструмента и повысить надёжность работы режущего инструмента при обработке титанового сплава BT3-1 BK8.

Результаты работы используются для повышения надёжности инструмента. В связи с этим установлено влияние толщины резания и длины контакта стружки с передней, задней поверхностью и изменение составляющей силы резания при обработке титановых сплавов с учетом выбранного заднего угла СМП. является актуальной задачей производства.

О рабочей зоне: размеры помещения 6*9 м, Используемое оборудование и материалы имеют следующие виды:

- 1) Станок универсально фрезерный модели FU251.
- 2) динамометр фирмы Kistler (Германия) с интерфейсом для подключения к персональному компьютеру.
- 3) Микроскоп БМИ-1.
- 4) Прутки из титанового сплава марки BT3-1.
- 5) Державка фрезерная с набором твёрдосплавных сменных многогранных пластин с разными передними углами.

В процессе работы измерялась длина стружки, создавалась 3D-модель инструмента и выполнялся силовой анализ модели. Также в разделе рассматриваются правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

6.1.1 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.

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

2. ТК РФ Статья 111 «Выходные дни» Всем работникам предоставляются выходные дни (еженедельный непрерывный отдых). При пятидневной рабочей неделе работникам предоставляются два выходных дня в неделю, при шестидневной рабочей неделе - один выходной день. Общим выходным днем является воскресенье. Второй выходной день при пятидневной рабочей неделе устанавливается коллективным договором или правилами внутреннего трудового распорядка. Оба выходных дня предоставляются, как правило, подряд.

6.1.2. 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.

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.

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.

Рабочим местом оператора станка, оснащенного системой ЧПУ, является зона управления процессом резания, в которой имеются два фронтально расположенных пульта управления. Первый пульт расположен на передней панели шкафа электрооборудования и предназначен для управления электро- и гидроагрегатами станка. Второй - на передней панели шкафа ЧПУ и предназначен для ввода, отладки и корректировки программы обработки детали.

Общие требования к рабочему месту даны в ГОСТ 12.2.033-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования» ГОСТ 22269-76 «Система человек - машина. Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования» ГОСТ 23000-78 «Система человек - машина. Пульты управления. Общие эргономические требования». Требования к организации рабочих мест и размещению производственного оборудования при обработке металлов резанием определяется ГОСТ 12.3.025-80, а требования к пультам управления металлообрабатывающих станков ГОСТ 12.2.009-80.

Рациональная организация рабочего места включает в себя эргономически обоснованное взаимное расположение органов управления, средств отображения информации, целесообразное размещение на производственной площади оборудования, материалов, подъемно-транспортных средств и оснастки. Поскольку трудовые действия оператора станка, оснащенного ЧПУ, заключаются в работе с органами управления и средствами отображения информации, то главной задачей при организации

рабочего места оператора является размещение пультов в зоне досягаемости и зоне зрительного наблюдения, обеспечение достаточной освещенности и допустимых параметров микроклимата.

Рабочая поза определяется характером выполняемых операций и расположением пультов непосредственно на станке. Работа оператора по энергозатратам относится к легкой и по этому признаку подходит рабочее место для выполнения работ сидя. Однако работа оператора требует свободного передвижения в рабочей зоне. Рабочая зона, обусловленная технологически, превышает параметры рабочего места сидя. При производстве станочных работ в таком случае оптимальной рабочей позой является поза стоя. Она обеспечивает наилучшие условия для обзора, возможность перемещений и движений с достаточным размахом.

Из конструктивных соображений передние панели пультов управления, расположенных на шкафах электрооборудования и ЧПУ, имеют размеры: ширина 450 мм, высота 400 мм. Высота верхней линии пультов 1600 мм. Расстояние от края рабочей поверхности шкафа 500 мм. Второй пульт более насыщен органами управления и индикации. Частота выполнения операций на этом пульте выше, чем на первом, поэтому он помещен в зоне действия правой руки оператора.

При работе на станке выполняются операции с временными характеристиками «часто» (менее 2-х операций в минуту) и «редко» (не более 2-х операций в 1 ч), поэтому расположение органов управления соответствует требованиям ГОСТ 12.2.033-78.

Общие требования к размещению средств отображения информации приведены в ГОСТ 22269-76 и ГОСТ 12.2.033-78. Средняя высота их расположения для мужчины должна составлять 1410 мм для мужчины и женщины - 1365 мм. Ширина пульта должна быть меньше горизонтального размера второстепенной зоны расположения индикаторов, ограниченной зоной периферического зрения, а высота пульта - меньше вертикального

размера второстепенной зоны индикаторов. При оценке размещения индикаторов необходимо учитывать структуру поля зрения оператора, прежде всего границы центральной и периферийной областей.

6.2. Производственная безопасность

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

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
1.повышенная температура поверхностей и оборудования	СП 60.13330.2020 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха СНиП 41-01-2003 (с Поправкой);
2.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.
3.Движущиеся машины и механизмы, передвигающиеся заготовки и материалы;	ГОСТ 12.3.009-76 ССБТ. Работы погрузочно-разгрузочные. Общие требования безопасности.
4.Повышенный уровень шума;	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация.
5.Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения;	искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*;
6.Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами	ГОСТ 30494-2011 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.

В разделе рассматриваются следующие опасные и вредные производственные факторы:

1) Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами

Оптимальные и допустимые показатели температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 6.2.1 ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. В теплый период года необходимо предусмотреть защиту от попадания прямых солнечных лучей. Работы делятся на три

категории тяжести на основе общих энергозатрат организма. Работа, относящаяся к инженерам– разработчикам, относится к категории легких работ. Допустимые значения микроклимата для этого случая даны в таблице 6.2.2

Таблица 6.2.2 – Допустимые значения микроклимата.

Период года	Категория работы	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Средней тяжести - ПБ	17 – 19	40 - 60	≤0.2
Теплый	Средней тяжести - ПБ	20 - 22	40 - 60	≤0.3

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

2) Повышенный уровень шума

Предельно допустимый уровень (ПДУ) шума - это уровень фактора, который при ежедневной работе, но не более 40 часов в неделю в течение всего рабочего стажа, не должен вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современным и методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений. Соблюдение ПДУ шума не исключает нарушения здоровья у сверхчувствительных лиц. Допустимый уровень шума ограничен ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ и СП 51.13330.2011. Максимальный уровень звука постоянного шума на рабочих местах не должно превышать 80 дБА. В нашем случае этот параметр соответствовал значению 75 дБА. основной шум исходит от производства и обработки фрезерного 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.

3) Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения

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, мое рабочее место: $E=300$ лк. Искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*.

Естественное освещение осуществляется через светопроемы, обеспечивающие необходимый коэффициент естественной освещенности (КЕО) не ниже 1,2 %.

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

4) Повышенная температура поверхностей и оборудования

Эксперимент по обработке титанового сплава на станке проводится в комнате 101а корпус 16а. При запуске станок FU251, постепенно нагревается. Особенно это видно при обработке с инструментом. Поэтому очень важно устройство для отвода тепла машины и человека. Так же нужно разместить предупреждающие знаки на оборудовании или рядом с ним, чтобы знать об опасностях, связанных с перегревом.

Настоящий свод правил распространяется на проектирование систем внутреннего тепло- и холодоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха в строящихся, реконструируемых или капитально ремонтируемых зданиях, общественных, высотой не более 50 м и жилых зданиях, высотой не более 75 м, включая многофункциональные

здания и здания одного функционального назначения, наша небольшая заводской находится в этом диапазоне.

Схема непосредственного охлаждения: Схема охлаждения, в которой воздух кондиционируемого помещения охлаждается в теплообменнике рабочим телом (хладагентом) холодильной машины, это решение используется в нашем небольшом заводском цеху.

Эксплуатируемая (рабочая) зона: Пространство определенного объема в помещении, в котором предусмотрено нахождение людей и заданы требования к параметрам воздушной среды. СП 60.13330.2020 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха СНиП 41-01-2003 (с Поправкой).

5) 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), В задании не описано 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.

Электрические цепи, образующие искры, дуги или нагревательные части под напряжением. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, для машины и механизмы.

б) Движущиеся машины и механизмы, передвигающиеся заготовки и материалы

В нашей небольшой заводской мастерской 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. 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.

6.3. Экологическая безопасность

Воздействие на селитебную зону: В моем эксперименте во время обработки станок будет шуметь и также вырабатывать 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".

Воздействие 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. Федеральный закон от 24.06.1998 N 89-ФЗ (ред. от 02.07.2021) "Об отходах производства и потребления" (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2022)

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

Экспериментальные инструменты и заготовки можно продолжать использовать на школьных фабриках. Большой изношенный режущий инструмент 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».

Воздействие на гидросферу: В моем эксперименте я основными источниками загрязнения окружающей среды-вода для охлаждения. Сточные воды предприятий содержат нефтепродукты, образующиеся из смазочно-охлаждающих жидкостей и растворов обезжиривания, ионы тяжелых металлов, они являются II класс - высокоопасные отходы. Федеральный закон

от 24.06.1998 N 89-ФЗ (ред. от 02.07.2021) "Об отходах производства и потребления" (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2022) из гальванических производств, множество химических соединений. ГОСТ 17.1.3.13-86. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране поверхностных вод от загрязнений.

Воздействие 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. Федеральный закон от 24.06.1998 N 89-ФЗ (ред. от 02.07.2021) "Об отходах производства и потребления" (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2022).

6.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Производство находится в 1-ом этаже корпуса 16А, ТПУ, городе Томске с континентально-циклоническим климатом. Возможными ЧС на объекте в данном случае, могут быть сильные пожар.

Для Сибири в зимнее время года характерны морозы. Достижение критически низких температур приведет к авариям систем теплоснабжения и жизнеобеспечения, В большинстве случаев происходит пожар. Причины возникновения пожара неэлектрического характера:

а) халатное неосторожное обращение с огнем (оставленные без присмотра нагревательные приборы, использование открытого огня);

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, искрение и электрические дуги, статическое электричество и т. п.

Для устранения причин возникновения и локализации пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия:

- а) использование только исправного оборудования;
- б) проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- д) отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ;
- е) курение в строго отведенном месте.

Огнетушители водо-пенные (ОХВП-10) используют для тушения очагов пожара без наличия электроэнергии. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В. Кроме того, порошковые применяют для тушения документов.

Для тушения токоведущих частей и электроустановок применяется переносной порошковый огнетушитель, например ОП-5.

На каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений на высоте не более 1,35 м. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей (рисунок 6.4.1).



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

Здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации,

порошковых или углекислотных огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к запасному (эвакуационному) выходу.

Вывод 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. Группа по электробезопасности III. Приказ Минтруда России от 24.07.2013 N 328н (ред. от 15.11.2018) "Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок" (Зарегистрировано в Минюсте России 12.12.2013 N 30593) 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.

Установлено, что механическая обработка титановых сплавов оказывает умеренно негативное воздействие на окружающую среду, для объектов II класса.

Приложение II-Раздел ВКР на иностранном языке
(справочное) I

**Investigation of the strength of replaceable polyhedral plates during milling
of titanium alloys**

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4AM01	Даурембеков А.М		14.03.22

Консультант отделения машиностроения ИШНПТ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМШ ИШНПТ	Козлов В.Н.	к.т.н., доцент		14.03.22

Консультант – лингвист ОИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сыскина А.А	к.ф.н.		14.03.22

Introduction

In mechanical engineering, much attention is paid to improving the performance of the tool. Currently, most cutting tools are equipped with replaceable polyhedral plates (RPP, or **inserts**) due to their rapid replacement after the maximum permissible wear. At the same time, the study of the strength of the RPP is relevant and important.

The reliability of the RPP is determined by its guaranteed durability under rational cutting conditions. Manufacturers of cutting tools invest a lot of effort in products designed for machining titanium. The correct choice of the tool and working with it also contributes to the improvement of machining efficiency. Durability depends on both the intensity of wear and brittle fracture. To assess the probability of chipping of the cutting edge, to determine the rational geometry and cutting mode, it is necessary to calculate the stress-strain state (SSC) RPP or its cutting wedge.

The use of contact stress diagrams for external loading when calculating the stress-strain state (SSC) using the ANSYS software allowed in this work to determine the effect of the geometry of the cutting tool, wear on the back surface and cutting mode on the SSC of replaceable polyhedral plates when machining titanium alloy BT3-1.

1. Analysis of structures and geometric parameters of the RPP

Titanium and alloys based on it are widely used in modern industry. The exceptional strength-to-weight ratio, high corrosion resistance and strength in various temperature ranges make these materials indispensable in the aerospace and chemical industries, shipbuilding and medicine. Aircraft frame elements, compressor discs and blades, covers, propellers and orthopedic implants are some examples of parts made of titanium and its alloys. Despite these undeniable advantages, titanium and titanium alloys have their own specific disadvantages. Poor workability is one of them. Indeed, the mythical giants Titans, after whom the new light metal discovered at the end of the 18th century was named, were also imperfect. Manufacturers of cutting tools invest a lot of effort in products designed for machining titanium. The correct choice of the tool and working with it also contributes to the improvement of machining efficiency.

For prefabricated tools with mechanical fastening of the RPP, the necessary geometry is obtained by a certain orientation of the cutting plate of various shapes in the tool body [1]. To describe the geometry of a prefabricated milling cutter, the most acceptable approach is based on specifying the orientation of the RPP by rotating it in the housing socket at the angles of γ_x (axial rake angle) and γ_y (radial rake angle) relative to the instrumental coordinate system. Therefore, in modern designs of end mills, constructive (instrumental) orientation angles of the RPP in the milling cutter body have also been added to the basic geometric parameters. The main geometric parameters of the end mill include (Fig. 1.1):

1) Working (functional) angles are the main angle in plan ϕ , the **rake** angle γ , the angle of inclination of the cutting edge λ , the flank angle α .

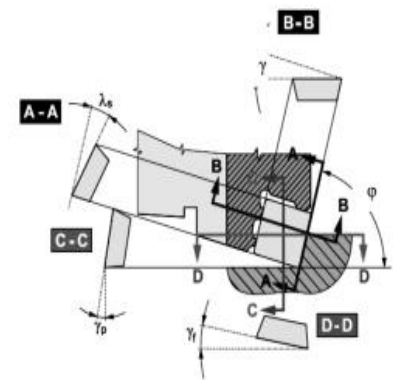


Figure 1.1 Geometric parameters of the RPP end mill

2) Constructive (instrumental) angles serve for the basic orientation of the position of the seat of the plate and are of particular importance for the design of the milling cutter body.

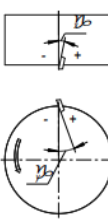
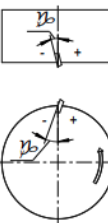

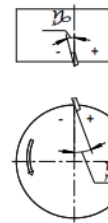
These angles are designated in different companies in different ways:

- instrumental axial rake angle γ_h (Korloy firm) or axial rake angle γ_p (Pramet firm [2])

- radial rake angle γ_y (γ_f firm Pramet) or instrumental side rake angle (firm Korloy).

Having analyzed the design features of milling cutters of various manufacturers, all end mills can be classified according to geometric schemes into four types, which are presented in Table 1.1. Due to changes in the orientation rake of the RPP in the milling cutter body, its geometry changes, therefore, the efficiency and durability of the milling cutter changes. To solve the problem of determining the geometry of the end mill, it is necessary to be able to determine geometric parameters even at the design stage of milling cutters with RPP.

Table 1.1 Geometric schemes of end mills with RPP

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 ($\gamma_x < 0, \gamma_y > 0$)
			

2. Investigation of force dependences of cutting processes

A three-component turning dynamometer is used to measure the technological components of the cutting force (P_x, P_y, P_z).

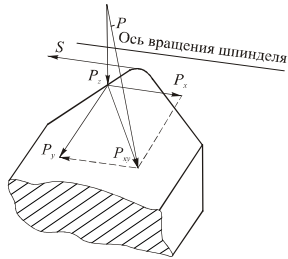


Figure. 2.1. The position of the axes of the components of the cutting force

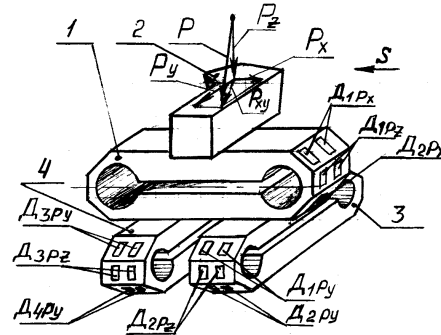


Figure. 2.2 Three-component turning dynamometer

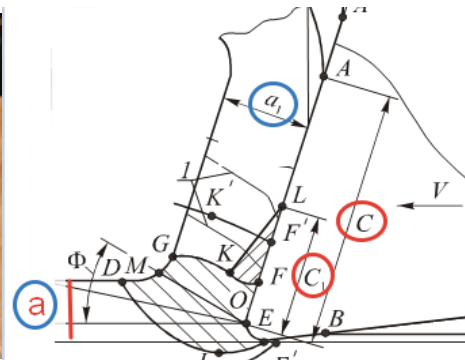
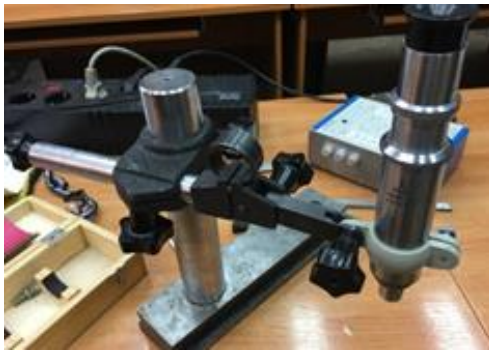


Figure. 2.3 Measurement of the chip contact length with the rake surface of the cutting plate with the Mir microscope

When measuring the components of the cutting force, a Kistler 9257 V dynamometer was used. The measurement results were displayed on a computer monitor. After machining, the length of the chip's contact with the rake surface was measured using a Mir microscope, and the length of the plastic contact was also measured using a microscope by the remnants of the chip's incision surface material stuck to the front rake.

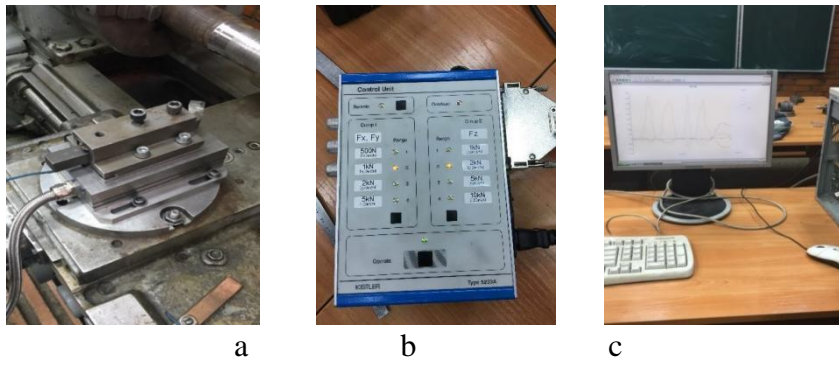


Figure. 2.4. Installing the cutter in a Kistler 9257B dynamometer on a lathe (a), setting up an amplifier to measure the technological components of the cutting force (b), demonstrating on the screen changes in the components of the cutting force during the cutting process and recording them in a separate file

3. Calculation of the physical components of the cutting force

According to the technological components P_z , P_{xy} and P_x of the cutting force measured during the experiment, its physical ones were calculated, with a positive forward angle γ , the scheme of action of the technological components is shown in Fig. 3.1. and Fig. 3.2. Taking into account the direction of the vectors of the components of the cutting force, the formula for calculating the physical components is derived:

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

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

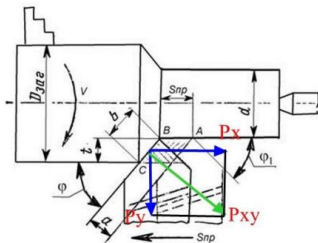


Figure. 3.1. Technological P_x , P_y , P_z and P_{xy} components of the cutting force in the top view

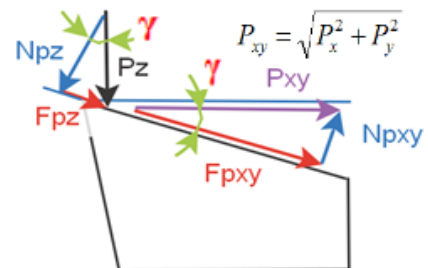


Figure 3.2. Scheme of action of technological (P_z and P_{xy}) and physical (N and F) components of the cutting force at a positive forward angle γ

4. Titanium alloy milling research

Machinability is most often understood as the intensity of wear of the cutting tool (or rational cutting speed with rational tool durability, often it is 20-40 minutes) and the quality of the treated surface. The machinability of most titanium alloys is poor and depends on many factors: chemical composition, structure, hardness, method of obtaining the initial workpiece and its preparation for further blade machining. The machinability of α - or even α - β alloys is comparable in machinability, but the machinability of β - and pseudo- β -alloys is significantly worse [1]. The main problems when cutting titanium alloys are the following factors:

- intense heat generation in the chip formation zone leads to excessive adhesive wear of the cutting edge with its rounding to a radius of $p = 0.1...5$ mm and the formation of a wear chamfer on the rear surface with a length of $h_z = 0.2...5$ mm [2, 3, 4].

Intense wear on the front the surface leads to a rapid increase in the wear hole with a decrease in

the strength of the cutting wedge, the appearance of a negative rake angle γ to -30° ;

- low thermal conductivity leads to poor heat transfer and slow heat transfer, which significantly increases the effect of the first point;
- low modulus of elasticity leads to a more significant restoration of the cutting surface after passing under the cutting edge, which contributes to an increase in normal contact stresses on the wear chamfer along the back surface [1, 2, 3, 4], the appearance of vibration, which generally impairs the accuracy of machining and the quality of the treated surface.

All these factors significantly reduce the service life of the tool and they negatively affect productivity, because the cutting speed of hard-to-process groups of titanium alloys is sometimes several times less than the cutting speed of non-hardened



Figure 4.1 Machinability of titanium alloy groups

structural steel. The machinability of a titanium alloy of various groups of titanium alloys is clearly shown in Fig. 4.1. [1].

When milling titanium alloy workpieces, they try to use the most efficient milling technology, or scheme. The milling technology determines the trajectory of the tool and the ratio "axial depth of cut (**ap**)

– radial cutting depth (**ae**)" [1]. At the same time, the terms used in the reference book [1] correspond to the following terms used in Russia for end milling: axial cutting depth a_p is the milling width B ; radial cutting depth a_e is the cutting depth t .

5. Mechanical machining of titanium alloys

Compared to other materials, the machining of titanium alloys is more problematic and has many limitations. Titanium alloys have some properties that can significantly affect both the cutting process and the material that is being cut. If the mode and tool are chosen correctly, as well as the workpiece is securely fixed, then the titanium metalworking process will be highly efficient. Many problems in the machining of titanium can be avoided if the peculiarities of the influence of titanium alloys on the metalworking process are overcome.

Many properties that give titanium alloys the status of an attractive material for the manufacture of parts have a significant effect on the deterioration of its machinability [2,3,5,6], namely:

- high strength combined with low density, which reduces the weight of structures, its density is 60% of the density of steel;
- low thermal conductivity;
- higher corrosion resistance than stainless steel.

All the properties listed above mean that when machining titanium alloys, significant forces appear acting on a small area of the cutting edge during machining due to the short length of the chip contact with the front rake. This often leads to vibrations during machining and leads to rapid wear of the cutting edge of the tool. In addition,

titanium does not conduct heat well. Therefore, titanium machining requires a high redness from the tool [2,3,7,33].

One of the negative phenomena in the machining of titanium alloys is the phenomenon of adhesion (Fig. 5.1), and in some cases, surface hardening of titanium alloys occurs, which contributes to significant wear of the cutting tool. The carbon content of more than two tenths of a percent contributes to other materials, the machining of titanium alloys is more problematic and has many limitations. Titanium alloys have some properties that can significantly affect both the cutting process and the material that is being cut. If the mode and tool are chosen correctly, as well as the workpiece is securely fixed, then the titanium metalworking process will be highly efficient. Many

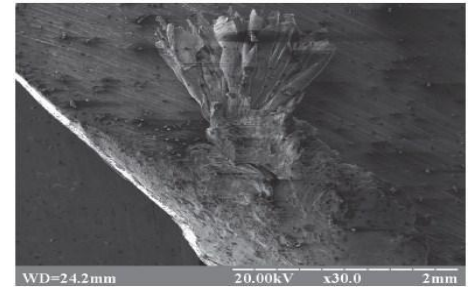


Figure 5.1 Build-up on RI

problems in the machining of titanium can be avoided if the peculiarities of the influence of titanium alloys on the metalworking process are overcome.

Many properties that give titanium alloys the status of an attractive material for the manufacture of parts have a significant effect on the deterioration of its machinability [2,3,5,6], namely:

- high strength combined with low density, which reduces the weight of structures, its density is 60% of the density of steel;
- low thermal conductivity;
- higher corrosion resistance than stainless steel.

All the properties listed above mean that when machining titanium alloys, significant forces appear acting on a small area of the cutting edge during machining due to the short length of the chip contact with the front rake. This often leads to vibrations during machining and leads to rapid wear of the cutting edge of the tool. In addition, titanium does not conduct heat well. Therefore, titanium machining requires a high redness from the tool [2,3,7,33].

One of the negative phenomena in the machining of titanium alloys is the phenomenon of adhesion (Fig. 5.1), and in some cases, surface hardening of titanium alloys occurs, which contributes to significant wear of the cutting tool. The carbon content of more than two tenths of a percent contributes to 0.2%, if the carbon content in titanium alloy exceeds this number, then hard titanium carbides are formed, which act on the cutting edge of the tool as an abrasive and blunt it. Figures 5.2 and 5.3 schematically show the machining of steel and titanium alloy.

In addition, when machining titanium alloys as shown in Figure 5.3, in comparison with the machining of steel shown in Figure 5.2, the contact length of titanium chips with the front rake is significantly less than when machining steel. This also explains the formation of large shear angles with small chip shrinkage when

cutting titanium alloys, as a rule, its shrinkage coefficient along the length is close to one. This can be seen from the values of the shrinkage coefficient of various grades of titanium and hard alloys, as well as the dependence of the longitudinal deformation of the chips on the cutting speed and feed.

In some cases, as a result of the absorption of oxygen and nitrogen from the air during the machining of titanium alloys, the so-called negative shrinkage is obtained, i.e. the length of the resulting chips is longer than the cutting path.

The decrease in chip shrinkage with an increase in cutting speed is also explained by a sharp decrease in the friction forces of the chips on the front rake of the cutting part of the tool. Titanium alloys are characterized by high friction coefficients, which limits their use for mobile joints. As a result, when machining titanium alloys, the entire load is distributed over a very small section of the blade tip, which

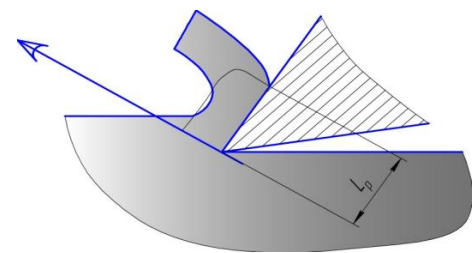


Figure 5.2 Chip formation during steel machining

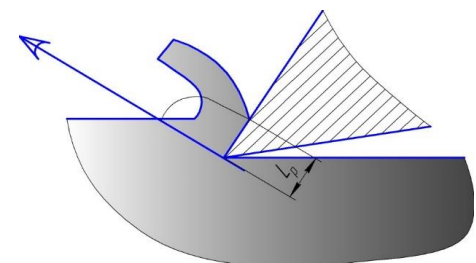


Figure 5.3 Chip formation during machining of titanium alloy

subsequently leads to a decrease in tool durability and rapid destruction of its cutting edge [5,6,7].

It is believed that titanium is difficult to process, but this is not typical for modern machines, tools and machining methods. Part of the difficulty in machining titanium is a new area in which a sufficient amount of experience has not yet been gained. Titanium may also seem more difficult to process compared to other metals, such as cast iron or low-alloy steels.

Machining of titanium should be performed at different feeds and speeds compared to other metals, but it can still be quite easy to process. If a titanium part is rigidly clamped on a machine in good condition and equipped with a special ISO 50 cone-shaped spindle with a short tool reach, then there should be no problems, provided that the cutting tool is selected correctly [2,3,8,33].

But stable and ideal conditions are not always present when milling. In addition, many titanium parts have a complex shape with narrow, shallow or deep and large pockets, thin chamfers and walls. For the correct and successful machining of these forms, a tool with a large length of the cutting part is needed, which can quickly lead to deformation of the tool, which occurs due to vibrations during the machining of titanium and its alloys.

There are methods by which it is possible to significantly reduce vibrations when machining titanium. Most milling machines used for machining titanium alloys are equipped with ISO 40 cone spindles. Due to the intensive operation of these machines, their efficiency in terms of accuracy and reliability of machining is reduced. Titanium machining, as a rule, includes contour machining, grooving or edge machining, and all these operations can lead to vibration [2,3,8]. Therefore, it is necessary to take measures to prevent it, if possible increasing the rigidity of fixing the workpiece.

The main way to solve this problem is a multi-stage fastening of workpieces, in which the workpieces are positioned closer to the spindle, which allows to reduce vibration.

Due to the fact that titanium alloys retain strength and hardness at high temperatures, a large load affects the cutting edge during machining. At the same time, a large amount of heat is generated at the cutting site, which entails the danger of deformation. Therefore, the correct choice of the geometry of the replacement plate and the alloy grade is of great importance when machining titanium. The solution to this problem is PVD coated plates, which can significantly increase efficiency [8,9]. There are a number of conditions for cutting modes when machining titanium alloy workpieces. The accuracy of the end and rational beating of tools is very important when machining titanium. For example, if the plate is incorrectly installed in the cutter body, this will lead to rapid damage to the cutting edges.

Although preference is given to geometry with a positive anterior angle, a tool with a slightly negative anterior angle is capable of machining at higher feeds, which reach 0.5 mm per tooth. In this case, the reliability of fixing the workpiece and the rigidity of the machine are important.

The minimum feed applied when milling titanium is usually 0.1 mm per tooth. It is also possible to reduce the spindle speed in order to obtain the recommended cutting speed as shown in Table 5.1. Incorrectly selected spindle speed can reduce durability by 90% with minimal feed per tooth. Another way is to reduce the number of milling cutter plates, or to choose a milling cutter with the smallest number of plates [2,3,7].

Table 5.1

Groups of titanium alloy, its structure and grade	Cutting tool material	Cutting speed, m/s	Machinability coefficient in relation to steel 45
Plastic: - Low strength BT1-1, OT4-0, AT2 - - Medium strength BT5-1, BT5, OT4, BT3	BK6M; BK8	1-1,7	0,45
Structural high strength: - BT6, IRM1 (($\alpha+\beta$)- structure) - BT20, AT6, OT4-2 (α -structure) -	BK8; BK6M; P9K5	1-2,3 0,75-1,2	0,55 0,32
High-strength alloys: BT14, BT16, BT22, BT23 (($\alpha+\beta$)- structure) BT15, TC6 (β - structure)	BK8;BK6M	0,8-1,6 0,5-1	0,4 0,25
Heat-resistant alloys: BT3-1, BT8, BT9(($\alpha+\beta$)- structure)	BK8	0,5-1,2	0,28

When machining titanium, it is recommended to maintain a small contact length with the workpiece to ensure cooling of the teeth of the cutter during the next turn before the next cutting in the cutting process.

All of the above recommendations on tool design and cutting modes when machining titanium and its alloys are taken into account by modern manufacturers when designing tools. Various designs of end mills for machining titanium alloys are being designed, which increase productivity. When machining titanium, it is recommended to maintain a small contact length with the workpiece to ensure cooling of the teeth of the cutter during the next turn before the next cutting in the cutting process.

All of the above recommendations on tool design and cutting modes when machining titanium and its alloys are taken into account by modern manufacturers when designing tools. Various designs of end mills for machining titanium alloys are being designed, which increase productivity.

Conclusion

1. Reducing the cutting depth t allows you to increase the cutting speed v while maintaining the durability of T .
2. Cutting in an arc reduces the wear rate of the milling cutter due to a smoother increase in the load on the tooth when it enters contact and a decrease in the chip thickness at the exit of the milling cutter tooth. Modern CAD/CAM systems allow you to create a tool trajectory with an almost constant engagement angle, which reduces the thermal load on the milling cutter tooth.
3. The supply of coolant under high pressure significantly increases the efficiency of milling, however, the use of coolant is often not permissible due to contamination of expensive chips and the impossibility of its recycling.
4. Different milling width B when milling in several passes reduces the intensive formation of grooves and the influence of negative factors.
5. Milling with a large feed (HFM) allows you to increase machining performance, it is necessary to use cutters with a large number of teeth and a small angle in plan, large feed per tooth.