

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

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 обработке титановых сплавов

УДК : 539.4:621.9.06:669.295.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ01	Ян Анькан		04.06.22

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент отделения машиностроения ИШНПТ	Козлов В.Н.	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 ШБИП ТПУ	Гасанов М.А.	д.э.н.		04.06.22

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент отделения общетехнических дисциплин ШБИП	Антоневич О.А.	к.б.н.		04.06.22

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

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОИЯ ШБИП	Миронова В.Е.	к.ф.н.		04.06.22

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Результаты обучения по ООП Автоматизация технологических процессов и производств в машиностроении

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способность осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать 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, вырабатывая 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

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

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

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП 15.04.01

_____ Мартюшев Н.В..

«___» _____ 2022

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

_____ магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
4АМ01	Ян Анькан

Тема работы:

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2022
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Исследовать напряжённо-деформированное состояние сменных многогранных пластин при резании титановых сплавов с разной подачей на примере труднообрабатываемого жаропрочного титанового сплава ВТ3-1.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Обзор и анализ научно-технической литературы по теме ВКР. Формулирование цели и задач исследования о влиянии геометрии режущего инструмента и режима резания на их напряжённо-деформированное состояние при резании титанового сплава. Исследование длины контакта стружки с передней поверхностью при переднем угле 0° при обработке титанового сплава ВТ3-1 с толщиной среза от 0,11 до 0,41 мм.

	Измерение технологических составляющих силы резания. Расчёт физических составляющих силы резания и определение распределения контактных напряжений на передней поверхности и на фаске износа по задней поверхности. Определение зависимости основных параметров эпюр контактных напряжений от толщины среза. Исследование напряжённо-деформированного состояния режущего инструмента с помощью программы ANSYS при переднем угле 0° при обработке титанового сплава с толщиной среза от 0,11 до 0,41 мм.
Перечень графического материала	Слайды по литературному обзору, эпюры контактных напряжений на передней и задней поверхностях, влияние заднего угла и толщины среза на картины НДС режущих пластин.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Научно-исследовательский	Козлов В.Н.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Гасанов М.А.
Социальная ответственность	Антоневич О.А.
Раздел ВКР на иностранном языке	Миронова В.Е.
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	
Study of Contact Stress Distribution and Stress-Strain State of Cutting Tool in Titanium Alloy Machining	

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 машиностроения ИШНПТ	Козлов В.Н.	к.т.н., доцент		25.12.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ01	Ян Анькан		25.12.2020

РЕФЕРАТ

выпускной квалификационной работы студента гр. 4АМ01 Ян Анькан **Исследование прочности сменных многогранных пластин при обработке титановых сплавов**

Выпускная квалификационная работа выполнена на 147 страницах, содержит 63 рисунка, 64 таблицы, 7 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: сменная многогранная пластина, обрабатываемость титановых сплавов, контактные напряжения, износ режущего инструмента, прочность режущего инструмента, 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».

Выполнены обзор и анализ научно-технической литературы по теме магистерской работы, сформулированы цель и задачи исследования. В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния толщины среза на технологические и физические составляющие силы резания при использовании сменных многогранных пластин (СМП), которые будут использованы на токарных резцах. Рассмотрено влияние толщины среза на длину контакта стружки, на эпюры контактных напряжений на передней поверхности и на фаске износа по задней поверхности, картины НДС режущих пластин.

При проведении экспериментов использовался токарный станок 1К62, трехкомпонентный токарный динамометр Kistler, а также программа «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 СМП и режимы резания при обработке титановых сплавов для повышения работоспособности режущих пластин.

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

the final qualifying work of the student gr. 4AM01 Yang Ankang
**Study of the strength of interchangeable multifaceted plates in titanium alloys
machining**

The final qualifying work is completed on 147 pages, contains 63 figures, 64 tables, 7 sources, 1 appendix.

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

The object of the study is an interchangeable multifaceted plate.

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

The review and analysis of scientific and technical literature on the topic of the master's thesis, the formulation of the goals and objectives of the study were carried out. The paper presents the results of an experimental study of the effect of the uncut chip thickness on the technological and physical components of the cutting force when using interchangeable multifaceted plates (inserts), which will be used on turning cutters. The influence of the uncut chip thickness on the chip contact length, on the contact stress diagrams on the rake surface and on the worn chamfer of the flank surface, as well as on the stress-strain state of the cutting plates is considered.

During the experiments, the 1K62 lathe, the three-component Kistler turning dynamometer, as well as the ANSYS program for calculating the stress-strain state (VAT) of cutting plates were used.

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

The results of the work will make it possible to use rational geometric parameters of the inserts and cutting modes when machining titanium alloys to increase the reliability of the inserts.

The degree of implementation: based on the results of the defense of the work at the state attestation commission, it will be decided whether to recommend the development for implementation in production at Mion LLC, Tomsk.

Scope of application: production of engineering products.

The economic significance of the work is quite high. In the future, it is planned to participate in the organization of the production of cutting carbide plates.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	13
1. Цель и задачи исследования	15
2. Литературный обзор	16
2.1. Анализ конструкций и геометрических параметров СМП.....	16
2.2. Исследование силовых зависимостей процессов резания	22
2.3. Расчёт физических составляющих силы резания	23
2.4. Расчёт напряжений в СМП методом конечных элементов	24
3. Методика выполнения исследования	25
3.1. Определение физических составляющих силы резания и построение эпюр контактных напряжений	25
3.2. Расчёт наибольших нормальных и касательных контактных напряжений при треугольном и трапецеидальном характере эпюр σ	30
3.3. Определение характера эпюр контактных напряжений	34
4. Исследование НДС режущего инструмента при обработке титанового сплава ВТЗ-1.....	37
4.1. Подготовка внешней нагрузки на передней поверхности для расчёта НДС режущего клина.....	37
4.2. Подготовка внешней нагрузки на фаске износа по задней поверхности для расчёта НДС режущего клина.....	48
4.3. Расчёт НДС неизношенного режущего клина.....	522
4.4. Исследования влияния заднего угла α на наибольшие эквивалентные напряжения	58
4.5. Исследование влияния количества участков на наибольшие эквивалентные напряжения.....	61
4.6. Исследование НДС изношенного режущего клина.....	65
4.6.1. Нагрузка на режущий клин со стороны фаски износа по задней поверхности инструмента	65

4.6.2. Расчёт средних нормальных и касательных контактных напряжений на фаске износа по задней поверхности на её различных участках	67
4.6.3. Расчёт НДС изношенного режущего клина	69
5. Исследование НДС СМП	78
Заключение	96
Список литературы	98
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»	100
6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	101
Введение	101
6.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	102
6.1.1. Анализ конкурентных технических решений	102
6.1.2. SWOT-анализ	103
6.2. Планирование научно-исследовательских работ	107
6.2.1. Структура работ в рамках научного исследования	107
6.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения	108
6.3. Бюджет научно-технического исследования	111
6.3.1. Расчет материальных затрат научно-технического исследования	111
6.3.2. Расчет амортизации специального оборудования	111
6.3.3. Основная заработная плата исполнителей темы	112
6.3.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы	114
6.3.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	114
6.3.6. Накладные расходы	115
6.3.7. Бюджетная стоимость НИР	115
6.4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	116
Выводы по разделу	120

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»...	122
Введение.....	124
7. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	125
7.1. Правовые нормы трудового законодательства	125
7.2. Производственная безопасность	126
7.2.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	126
7.2.2. Расчет уровня производственного фактора.....	130
7.3. Экологическая безопасность.....	133
7.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	135
Вывод по разделу	137
Приложение II-Раздел на иностранном языке.....	138
INTRODUCTION.....	139
1. Determining the technological components of cutting forces	140
2. Analysis of different uncut chip thickness and contact lengths	143
3. A study of the VAT behaviour of a worn cutting wedge using the ANSYS software	145
4. Stress-strain studies on replaceable polyhedral plates	146
References	147

Введение

Большинство режущих инструментов сегодня оснащаются сменными многогранными пластинами (СМП), поскольку их можно быстро заменить после максимально допустимого износа. В случае превышения допустимого износа СМП может сломаться, что часто делает её непригодной для использования других вершин, ещё не использованных при обработке. Поэтому исследование напряжённо-деформированного состояния (НДС) СМП является актуальной задачей.

Титановые сплавы всё чаще применяются при изготовлении ответственных деталей, к которым предъявляются повышенные требования по удельной прочности, жаропрочности и коррозионной стойкости. Такие сплавы являются сложными для обработки, поэтому они и называются труднообрабатываемыми. Механизмы деформации в условиях механической обработки (высокие температуры, степень деформации и её скорость) сложны и полностью отличаются от механизмов деформации обычных материалов, таких как сталь, чугун и цветные металлы.

Повышение производительности вызывает необходимость вести обработку на пределе возможности инструментальных материалов, в том числе по способности выдерживать большие напряжения в режущем клине, что делает задачу определения рациональной геометрии инструмента, режимов резания и допустимого износа при черновой обработке титановых сплавов особенно актуальной.

Особое внимание в данной работе уделяется построению эпюр контактных напряжений на передней поверхности и на фаске износа по задней поверхности, необходимых для нагрузки 3Д моделей режущих инструментов при расчёте их НДС в процессе обработки труднообрабатываемых групп титановых сплавов.

Использование программного обеспечения ANSYS позволило с высокой точностью рассчитать распределение основных параметров НДС в СМП и проанализировать влияние геометрии режущего инструмента, режима резания и износа по задней поверхности на её прочность.

1. Цель и задачи исследования

Цель работы: определить рациональные геометрические параметры режущего инструмента, допустимый износ и повысить надёжность работы СМП при обработке титанового сплава ВТЗ-1.

Задачи исследования:

1. Определить длину контакта стружки с передней поверхностью режущего инструмента при разных толщинах среза при обработке титанового сплава ВТЗ-1;

2. Измерить технологические составляющие силы резания при обработке как неизношенным, так и изношенным по задней поверхности резце и рассчитать физические составляющие при обработке титанового сплава ВТЗ-1;

3. Определить распределение (**эпюры**) контактных напряжений на передней поверхности и на фаске износа по задней поверхности при обработке титанового сплава ВТЗ-1 при разных режимах резания, определить влияние толщины среза на основные параметры этих эпюр;

4. Рассчитать НДС СМП при различной толщине среза, длине контакта стружки с передней поверхностью и степени износа режущего инструмента методом конечных элементов;

5. Выполнить анализ НДС режущего инструмента и дать рекомендации по выбору геометрии, режима резания и предельно допустимого износа для повышения надёжности его работы при обработке титанового сплава ВТЗ-1.

2. Литературный обзор

2.1. Анализ конструкций и геометрических параметров СМП

При косоугольном несвободном резании основное внимание уделяется напряжениям в главной секущей плоскости, которая проходит перпендикулярно основной плоскости и проекции главной режущей кромки на основную плоскость (рис. 1). При расположении этой плоскости на расстоянии более двух радиусов при вершине r от вершины инструмента напряжённое состояние считается приближённым к плоскому, т.е. во всех главных секущих плоскостях наблюдается одинаковое НДС [1, 2].

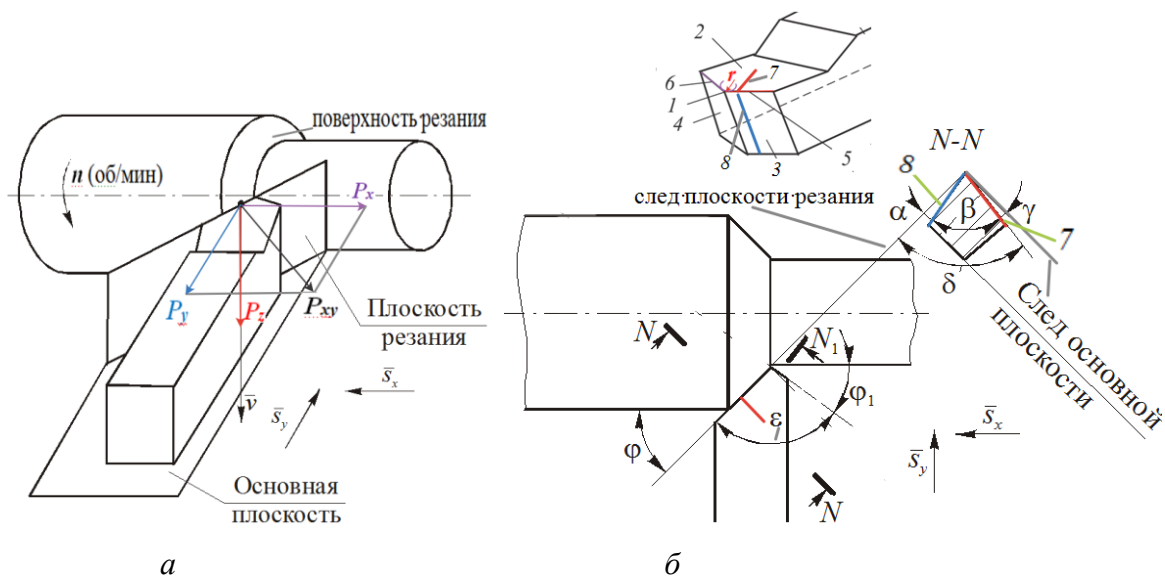


Рис. 2.1.1. Положение основной плоскости и направление технологических составляющих P_z , P_y , P_x и P_{xy} силы резания (а) и сечение режущего инструмента в главной секущей плоскости $N-N$ (б). 1 – вершина режущей части; 2 – передняя поверхность; 3 – главная задняя поверхность; 4 – вспомогательная задняя поверхность; 5 – главная режущая кромка; 6 – вспомогательная режущая кромка; 7 – след передней поверхности на главной секущей плоскости; 8 – след главной задней поверхности на главной секущей плоскости.

Поскольку основная внешняя нагрузка от силы резания приходится на главную режущую кромку, переднюю и заднюю поверхности, примыкающие к

ней, то можно рассматривать НДС простого режущего клина при прямоугольном свободном резании, что существенно упрощает задачу и позволяет избавиться от неопределённости от сил, действующих со стороны вспомогательной режущей кромки b (рис. 1).

Углы в плане φ и φ_1 (главный и вспомогательный) – это углы между направлением продольной подачи s и соответственно, проекциями главной и вспомогательной режущих кромок на основную плоскость. Углы в плане, в основном, зависят от формы СМП.

Радиус при вершине $R(r)$ играет решающую роль на шероховатость обработанной поверхности, особенно при малой подаче.

СМП по геометрическим параметрам делятся на:

- а) негативные ($\gamma=0^\circ$, $\alpha = 0^\circ$) (рис. 2 а);
- б) позитивные ($\gamma=0^\circ$, $\alpha > 0^\circ$) (рис. 2 б);
- в) негативно-позитивные ($\gamma>0^\circ$, $\alpha = 0^\circ$) (рис. 2 в).



Рис. 2.1.2. Основные виды СМП по их форме в сечении

Задний угол α при установке негативных и негативно-позитивных пластин создается за счет их поворота при креплении в державке резца. При этом у негативных пластин передние углы становятся отрицательными, т.е. $(-\gamma)=\alpha$, у негативно-позитивных пластин угол γ уменьшается на величину угла α .

У позитивных пластин угол γ равен углу поворота пластины по часовой стрелке, а угол α уменьшается на эту же величину.

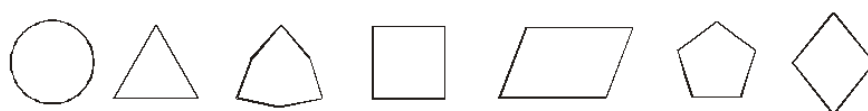


Рис. 2.1.3. Основные формы СМП

Пластины негативные и негативно-позитивные крепятся чаще всего прихватом сверху (рис. 4, *а*) или подпружиненным прихватом, облегчающим смену СМП (рис. 4, *б*). Последняя конструкция обеспечивает более надежное крепление, не требуется пальцами приподнимать прихват.

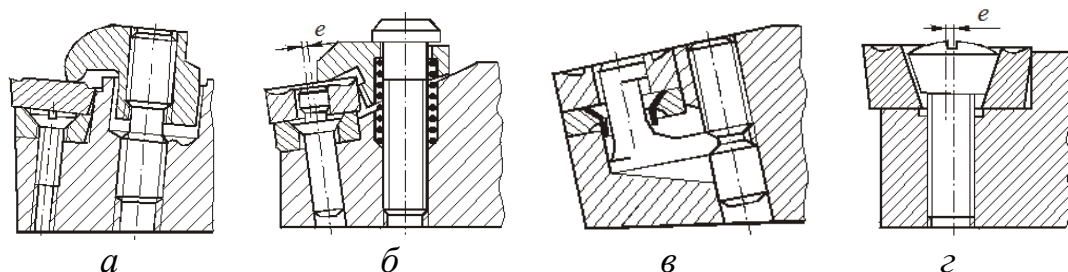


Рис. 2.1.4. Схемы крепления СМП

Крепление рычагом за отверстие (схема *в*) используется для устранения препятствий сходу стружки, но она имеет более сложную конструкцию и уменьшает прочность державки, диаметр отверстия в СМП должен быть больше, что уменьшает прочность.

Крепление винтом (схема *г*) используется для малонагруженных пластин и является простым и компактным, но требует применения специальных СМП с коническим отверстием.

Для увеличения жёсткости нижней опоры применяются подкладные твёрдосплавные пластины (рис. 4, *а-в*), т.к. модуль упругости у твёрдого сплава почти в 2раза больше, чем у стали, из которой изготовлена державка.

У резцов наибольшее распространение получили пластины с отверстием (рис. 4, *б-в*). Благодаря этому обеспечиваются свободный сход стружки по

передней поверхности и значительно меньшие габариты элементов крепления, размещаемых в корпусе державки, пластина не выпадает из гнезда (паза).

Но при черновой обработке отверстие является концентратором напряжений, поэтому может приводить к разрушению СМП.

При черновой обработке титановых сплавов в зависимости от группы обрабатываемости (труднообрабатываемые 3-4 группа) используется большая подача $s = 0,34-0,52$ мм/об (при фрезеровании – подача на зуб $s_z = 0,1-0,3$ мм/зуб), глубина резания $t = 2-4$ мм, небольшая скорость резания $v = 20-60$ м/мин (табл. 2.1.1), обычно отрицательный передний угол ($\gamma = -20\dots-30^\circ$), а главный задний угол $\alpha = 8\dots10^\circ$. При получистовой обработке используется несколько иная геометрия в главной секущей плоскости (рис. 5).

Таблица 2.1.1 – Рекомендации по выбору минутной подачи f_n ($s_{\text{мин}}$) (мм/об) и скорости резания при фрезеровании титановых сплавов [4 каталог КЗТС]

Рекомендации по выбору скоростей резания (V_c , м/мин) для фрезерной обработки

Группа по ISO	Материал заготовки	Твёрдость по Бринеллю (НВ)	Марка сплава											
			Н10	Н20	Н30	ТР20АМ	ТР40АМ	В35	ВР35АМ	А10	А30	АР10АМ	АР30АМ	
			Диапазон подач, f_n (мм/об)											
			0,08-0,25	0,1-0,6	0,1-0,8	0,1-0,3	0,1-0,4	0,1-0,2						
S	Титановые сплавы													
	Технически чистый титан	400 МПа*						90-50		110-95	95-80			
	Сплавы альфа+бета	1050 МПа*						40-20		50-40	40-30			
	Жаропрочные сплавы													
	- на основе Fe	200-280				40-30	40-30	30-20		40-35	30-15			
- на основе Ni и Co	250-320				40-10	40-10	20-10		40-10	30-15				
												0,05-0,1	0,1-0,15	

Таблица 2.1.2 – Рекомендации по выбору СПМ, оборотной подачи f (s) (мм/об) и глубины резания при чистовой и получистовой обработке титановых сплавов [4 каталог КЗТС]


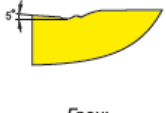
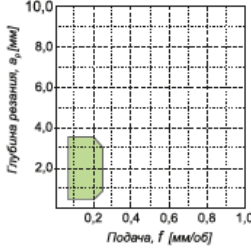
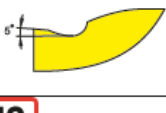

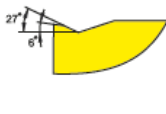
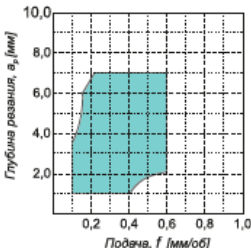
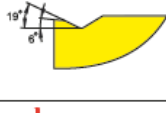
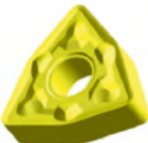
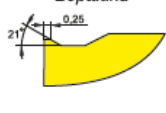
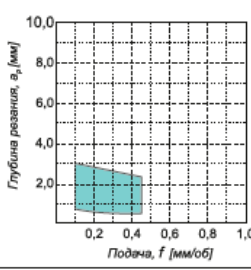
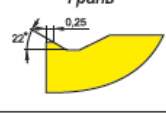
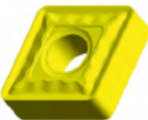
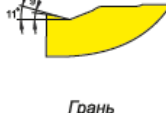
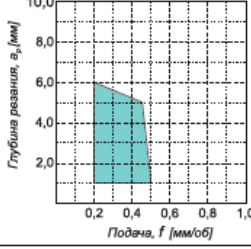


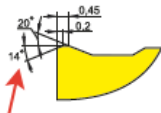
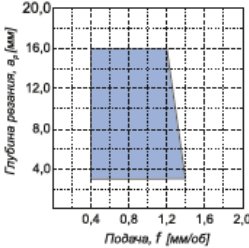
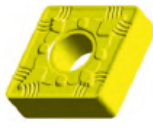
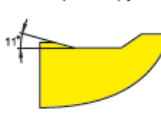
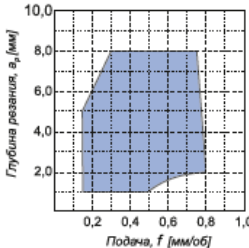

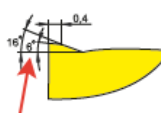
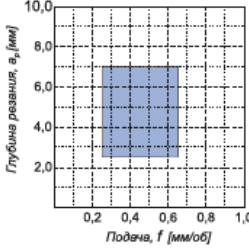

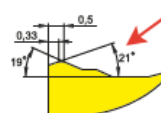
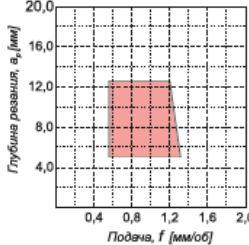
F1		CNMG, DNMG			
	Вершина 		<p>Геометрия для чистовой и получистовой обработки. Острая режущая кромка и положительный передний угол, снижают силу резания. Первый выбор - материалы групп P, M, S. Возможно применение - K, N.</p>		
	Грань 			<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th>$f, (мм/об)$</th> <th>$a_p, (мм)$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,07 - 0,25</td> <td>0,4 - 3,5</td> </tr> </tbody> </table>	$f, (мм/об)$
$f, (мм/об)$	$a_p, (мм)$				
0,07 - 0,25	0,4 - 3,5				
M2		CNMG, SNMG, WNMG, TNMG, VNMG			
	Вершина 		<p>Геометрия имеет позитивный передний угол, предотвращающий деформацию, а <u>негативный наклон кромки</u> препятствует появлению сколов. Основное применение - материалы групп P, M, S.</p>		
	Грань 			<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th>$f, (мм/об)$</th> <th>$a_p, (мм)$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,1 - 0,6</td> <td>1,0 - 7,0</td> </tr> </tbody> </table>	$f, (мм/об)$
$f, (мм/об)$	$a_p, (мм)$				
0,1 - 0,6	1,0 - 7,0				
M8		WNMG			
	Вершина 		<p>Чистовое и получистовое точение. Основное применение - материалы групп M и S.</p>		
	Грань 			<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th>$f, (мм/об)$</th> <th>$a_p, (мм)$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,18 - 0,6</td> <td>0,8 - 7,0</td> </tr> </tbody> </table>	$f, (мм/об)$
$f, (мм/об)$	$a_p, (мм)$				
0,18 - 0,6	0,8 - 7,0				
M9		CNMG, WNMG			
	Вершина 		<p>Геометрия подходит для получистового, а также для <u>лёгкого черного точения</u>. Основное применение - материалы групп M и S. Хорошие результаты и по P, K.</p>		
	Грань 			<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th>$f, (мм/об)$</th> <th>$a_p, (мм)$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,2 - 0,5</td> <td>1,0 - 6,0</td> </tr> </tbody> </table>	$f, (мм/об)$
$f, (мм/об)$	$a_p, (мм)$				
0,2 - 0,5	1,0 - 6,0				

Таблица 2.1.3 – Рекомендации по выбору СПМ, оборотной подачи $f(s)$ (мм/об) и глубины резания при черновой обработке титановых сплавов [4 каталог КЗТС]

R7		SNMM					
	<p>По периметру</p> 	 <p>Универсальная геометрия для односторонних СПМ. Черновая и полуставовая обработка. Применение - материалы групп Р, М, S. Возможное применение - К.</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>$f, (мм/об)$</th> <th>$a_p, (мм)$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,45 - 1,4</td> <td>3,0 - 16,0</td> </tr> </tbody> </table>	$f, (мм/об)$	$a_p, (мм)$	0,45 - 1,4	3,0 - 16,0
$f, (мм/об)$	$a_p, (мм)$						
0,45 - 1,4	3,0 - 16,0						
R4		CNMG, SNMG					
	<p>По периметру</p> 	 <p>Черновое и полуставовое точение. Основное применение - материалы группы Р, М и S.</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>$f, (мм/об)$</th> <th>$a_p, (мм)$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,15 - 0,8</td> <td>1,0 - 8,0</td> </tr> </tbody> </table>	$f, (мм/об)$	$a_p, (мм)$	0,15 - 0,8	1,0 - 8,0
$f, (мм/об)$	$a_p, (мм)$						
0,15 - 0,8	1,0 - 8,0						
R8		WNMG, WNMM					
	<p>По периметру</p> 	 <p>Рекомендуется для черновой обработки на средних подачах. Применение - материалы групп Р, М, S.</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>$f, (мм/об)$</th> <th>$a_p, (мм)$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,25 - 0,65</td> <td>2,5 - 7,0</td> </tr> </tbody> </table>	$f, (мм/об)$	$a_p, (мм)$	0,25 - 0,65	2,5 - 7,0
$f, (мм/об)$	$a_p, (мм)$						
0,25 - 0,65	2,5 - 7,0						
H3		SNMM					
	<p>По периметру</p> 	 <p>Односторонняя СПМ. Предназначена для сверхтяжёлой черновой обработки за счёт очень прочной геометрии режущей кромки. Выступы по периметру режущей кромки обеспечивают сопротивление износу по передней поверхности. Основное применение - материалы групп Р и К.</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>$f, (мм/об)$</th> <th>$a_p, (мм)$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,55 - 1,3</td> <td>5,0 - 15,0</td> </tr> </tbody> </table>	$f, (мм/об)$	$a_p, (мм)$	0,55 - 1,3	5,0 - 15,0
$f, (мм/об)$	$a_p, (мм)$						
0,55 - 1,3	5,0 - 15,0						

2.2. Исследование силовых зависимостей процессов резания

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

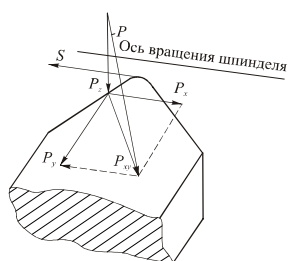


Рис. 2.2.1. Положение осей составляющих силы резания

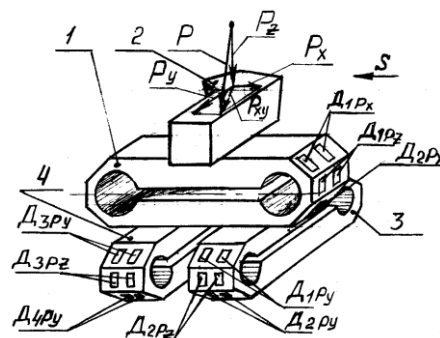


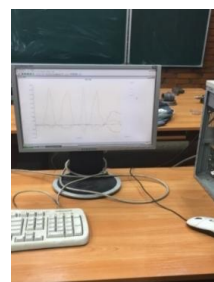
Рис. 2.2.2 Трёхкомпонентный токарный динамометр



а



б



в

Рис. 2.2.3. Установка резца в динамометр Kistler 9257B на токарном станке (а), настройка усилителя для измерения технологических составляющих силы резания (б), демонстрация на экране изменения составляющих силы резания в процессе резания и их запись отдельным файлом

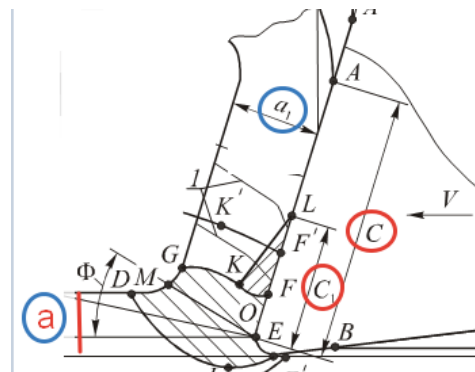
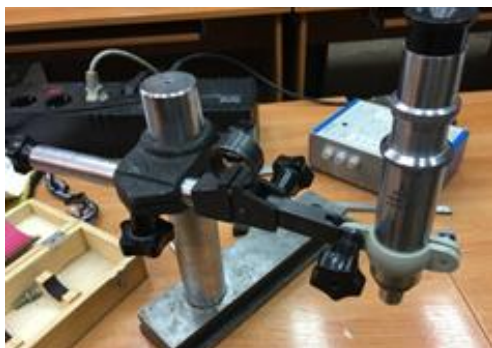


Рис. 2.2.4. Измерение микроскопом «Мир» длины контакта стружки с передней поверхностью режущей пластины

При измерении составляющих силы резания использовался динамометр Kistler 9257 В. Результаты измерения выводились на монитор компьютера. После обработки измерялась длина контакта стружки с передней поверхностью с помощью микроскопа «Мир», а длина пластического контакта, также измерялась с помощью микроскопа по остаткам материала прирезцової поверхности стружки, прилипшим к передней поверхности.

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, 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:

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

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

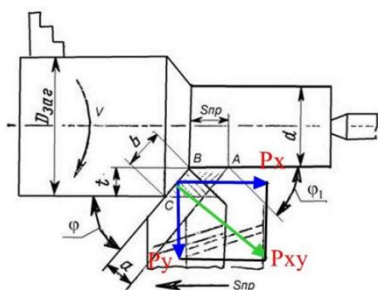


Рис. 2.3.1. Технологические P_x , P_y , P_z и P_{xy} составляющие силы резания на виде сверху

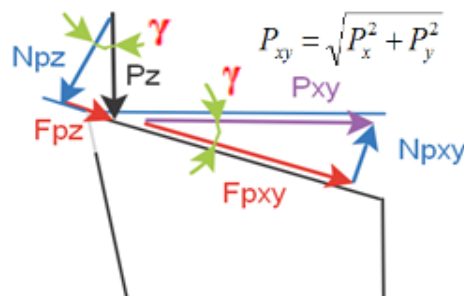


Рис. 2.3.2. Схема действия технологических (P_z и P_{xy}) и физических (N и F) составляющих силы резания при положительном переднем угле γ

2.4. Расчёт напряжений в СМП методом конечных элементов

Расчёт напряжённо-деформированного состояния (НДС) используется для оценки прочности инструмента. При этом широко используется метод конечных элементов (МКЭ) – это численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики.

Программа ANSYS является основной программой для исследования НДС. С её помощью мы можем визуально и эффективно получить результаты расчёта НДС режущей части.

Для исследования влияния толщины среза и длины контакта стружки с передней поверхностью на НДС режущих пластин создаём 3D модели (рис. 2.4.1). Затем задаём свойства материала модели резца (рис. 2.4.2), направление осей, потом задаём внешние нагрузки (рис. 2.4.4).

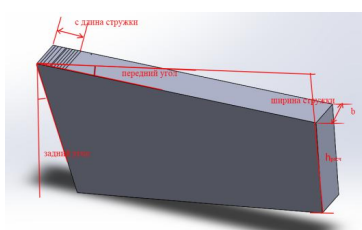


Рис. 2.4.1. 3D модель режущего клина

	A	B	C	D	E
	Property	Value	Unit		
1	Material Field Variables		Table		
2	Density	7480	g/cm ³		
3	Bottom Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Bottom Secant Coefficient of Thermal Expansion				
5	Bottom Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Bottom Secant Coefficient of Thermal Expansion				
7	Bottom Secant Coefficient of Thermal Expansion				
8	Bottom Secant Coefficient of Thermal Expansion				
9	Bottom Secant Coefficient of Thermal Expansion				
10	Stress-Strain Parameters				
11	Stress-Strain Parameters				
12	Stress-Strain Parameters				
13	Stress-Strain Parameters				
14	Stress-Strain Parameters				
15	Stress-Strain Parameters				
16	Stress-Strain Parameters				
17	Stress-Strain Parameters				
18	Stress-Strain Parameters				
19	Stress-Strain Parameters				
20	Stress-Strain Parameters				
21	Stress-Strain Parameters				
22	Stress-Strain Parameters				
23	Stress-Strain Parameters				
24	Tensile Yield Strength	700	MPa		
25	Compressive Yield Strength	2400	MPa		
26	Tensile Ultimate Strength	2800	MPa		
27	Compressive Ultimate Strength	3400	MPa		

Рис. 2.4.2. Свойства сплава BK8 при задании инструментального материала в ANSYS

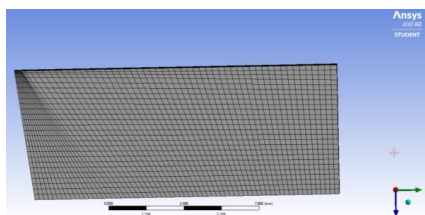


Рис. 2.4.3. Разбивка 3D модели на конечные элементы

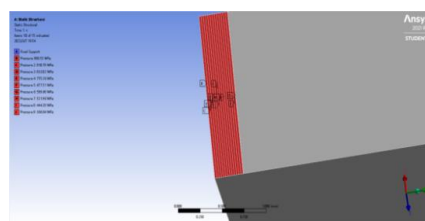


Рис. 2.4.4. Приложение внешних нагрузок

3. Методика выполнения исследования

3.1. Определение физических составляющих силы резания и построение эпюр контактных напряжений

Для реализации прямоугольного свободного резания, более простом и удобном для исследований методе, осуществлялось точение диска шириной $b = 2,3$ мм из титанового сплава ВТЗ-1 с радиальной подачей резца s (мм/об). В этом случае толщина среза $a = s$ (мм). С использованием динамометра измерялись технологические составляющие силы резания: **тангенциальная** составляющая P_z (Н), направленная касательно поверхности резания, и **радиальная** составляющая P_y (Н), направленная радиально относительно обрабатываемого диска в основной плоскости. Главная режущая кромка резца устанавливалась по оси центров, поэтому вектор силы P_z совпадал по направлению с вектором скорости резания v .

После точения измерялась длина контакта стружки с передней поверхностью c (мм), однако из-за сегментного характера стружки, близкого к **элементному**, длина контакта очень мала и неустойчива, плохо видима, поэтому при её измерении возникают достаточно большие погрешности.

По измеренным составляющим силам при резании острым резцом, т.е. практически неизношенным по задней поверхности, были построены графики влияния толщины среза на составляющие P_z и P_y (рис. 3.1.1).

Методом экстраполяции на нулевую толщину среза ($a = 0$ мм) были выделены силы, действующие на передней и на задней поверхности. График $P_y = f(a)$ показывает, что на **режущей кромке** (с мало заметным некоторым

радиусом округления ρ) и **очень маленькой** мало заметной **фаской износа по задней поверхности** (некоторой длиной h_f) действует большая сила, которую можно обозначить как **общая** сила на фаске и радиусном участке режущей кромки $P_{y(\rho+h)} = 420 \text{ Н}$.

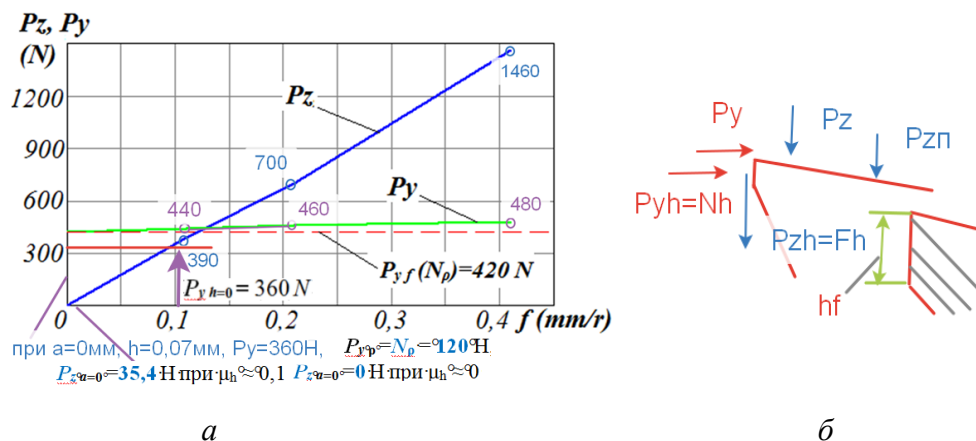


Рис. 3.1.1. Влияние толщины среза a (мм) при прямоугольном свободном точении диска с радиальной подачей $f = s_{\text{рад}}$ (мм/об) на силы на передней поверхности неизношенного резца при обработке титанового сплава ВТ3-1 (а) и схема действия общих технологических P_z и P_y , технологических $P_{zп}$ и $P_{yп}$ на передней поверхности, технологических P_{zh} и P_{yh} , на фаске износа по задней поверхности, и физических составляющих F_h и N_h на фаске износа (б). ВТ3-1 – ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $v = 1 \text{ м/с}$, $b = 2,3 \text{ мм}$.

Разница величины силы $P_y = f(a)$ и этой силой на режущей кромке $P_{y(\rho+h)} = 420 \text{ Н} = \text{const}$ есть **сила на передней поверхности** $P_{yп}$: $P_{yп} = P_y - P_{y(\rho+h)}$.

График $P_z = f(a)$ показывает, что на **режущей кромке** с очень маленьким радиусом округления ρ и **очень маленькой фаской износа по задней поверхности** длиной h_f отсутствуют существенная сила: $P_{z \text{ flank}} = P_{y\rho} \approx 0 \text{ Н}$. Поэтому сила $P_z = f(a)$ есть $P_{zп} = f(a)$: $P_{zп} = P_z - P_{z(\rho+h)} = P_z - 0 = P_z$.

Из рис. 3.1.1 видно, что для подачи $f = 0 \text{ мм/об}$ касательная сила $F_{(\rho+h)} = P_{zп a=0 \text{ мм}}$ на режущей кромке равна нулю, а нормальная

сила $N_{(\rho+h)}=P_{yfa=0}$ имеет большую величину: $N_{(\rho+h)}=420$ Н, или удельную линейную силу на 1 мм длины режущей кромки $q_{N(\rho+h)}=N_{(\rho+h)}/b=182,6$ (Н/мм), где b – ширина **контакта стружки** с передней поверхностью. Принимается, что ширина **контакта стружки** с передней поверхностью b равна **ширине** обтачиваемого **диска** $b_d=2,3$ мм при малом уширении стружки. Даже при существенном уширении стружки лучше принимать $b=b_d$, т.к. по краям уширения их давление на поверхность контакта не может быть большим из-за слабой связи с диском (действует как заусениц).

При переднем угле $\gamma=0^\circ$ **нормальная** сила на передней поверхности $N=P_{zп.}$, **касательная** сила на передней поверхности $F=P_{yп.}$

Из-за небольшой длины контакта стружки с передней поверхностью c при обработке титанового сплава ВТЗ-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 ВТЗ-1, возникают большие сложности при исследовании распределения контактных напряжений методом разрезного резца.

Касательная сила на передней поверхности F очень мала, поэтому и касательные контактные напряжения $\tau=F/(c \times b)$ тоже малы. Форма эпюры касательных контактных напряжений может быть принята равномерно распределённой, что соответствует пластическому характеру контакта стружки, а небольшая сила F не позволит рассматривать множество вариантов формы эпюры.

Форма эпюры нормальных контактных напряжений σ на передней поверхности большинства исследователей предполагается треугольной. Однако может быть рассмотрено три возможные формы, которые позволят рассчитать величину наибольшего нормального контактного напряжения на передней поверхности σ_{\max} (рис. 3.1.2).

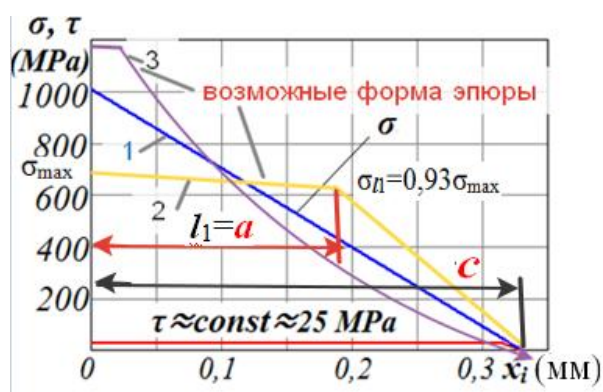


Рис. 3.1.2. Возможные формы эпюры нормальных контактных напряжений σ на передней поверхности реза. ВТЗ-1 – ВК6. Пример рассмотрен при толщине среза $a = 0,11$ мм, скорости резания $v = 1$ м/с, переднем угле $\gamma = 0^\circ$

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).

Для определения достоверности принятой формы эпюры σ может быть применён расчётный метод: нормальная сила на передней поверхности, рассчитанная по эпюре N_σ должна быть равна нормальной силе, измеренной при резании $N_{\text{эксп}}$, т.е. $N_\sigma \approx N_{\text{эксп}}$.

Расчёт величины наибольшего **нормального** контактного напряжения σ_{\max} (Н/мм² или МПа: 1 Н/мм² = 1 МПа) также позволит в какой-то мере оценить достоверность той или иной формы эпюры: если величина наибольшего нормального контактного напряжения будут нереально большой

или малой, значит такая форма маловероятна. После принятия формы эпюры рассчитываются нормальная N_{σ} и касательная F_{σ} силы на передней поверхности по принятой форме эпюры. Эти силы должны быть приблизительно равны физическим составляющим силам, полученным из эксперимента. Исходя из этого проверочные расчёты и будут определяться наибольшие контактные напряжения.

На результаты расчётов контактного напряжения 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. 3.1.3). 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. 3.1.3) давление на сформировавшийся и отделённый элемент **со стороны заготовки** в зоне формирования элемента уже

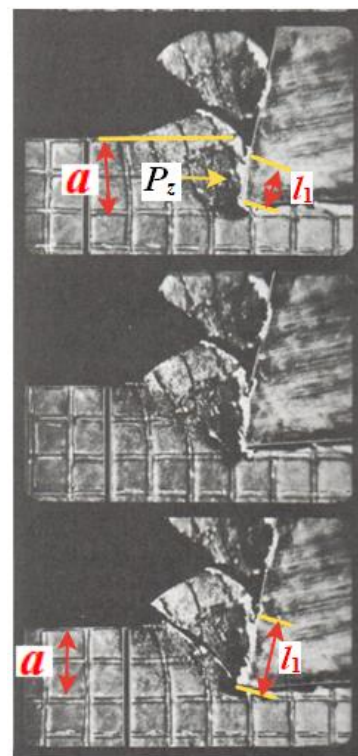


Рис. 3.1.3. Силовое действие на переднюю поверхность резца в процессе формирования элемента стружки

практически не оказывается, и поэтому наиболее вероятна модель № 1 ($c = 1,1 \times a$) с трапецидальной формой эпюры нормальных контактных напряжений.

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

В результате экспериментов было измерено: при $a = 0,11$ мм $P_z = 390$ Н.

При $\gamma = 0^\circ$ $N = P_z = 390$ Н, $F = P_y - N_p = P_y - 420 = 440 - 420 = 20$ Н.

При $a = 0,21$ мм $P_z = 700$ 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, $N = P_z = 1460$ Н, $F = P_y - N_p = P_y - 420 = 480 - 420 = 60$ Н.

Табл. 3.1.1 — Технологические и физические составляющие силы резания, полученные из экспериментов при $\gamma = 0^\circ$. ВТЗ-1-ВК8, $v = 60$ м/мин.

Толщина среза a , мм	Технологические составляющие силы		Физические составляющие силы	
	P_y ср, Н	P_z ср, Н	N , Н	F , Н
0,11	390	440	390	20
0,21	700	460	700	40
0,41	1460	480	1460	60

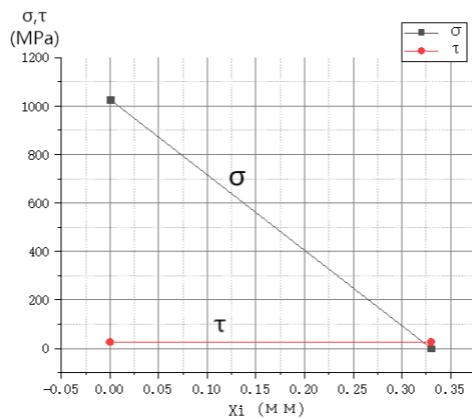
3.2. Расчёт наибольших нормальных и касательных контактных напряжений при треугольном и трапецидальном характере эпюр σ

Табл. 3.2.1 — Влияние толщины среза и длины контакта стружки на наибольшие нормальные контактные напряжения при **треугольном** характере эпюры σ (см. рис. 3.1.1, вариант №1) (ВТЗ-1-ВК8, $\gamma = 0^\circ$, образовании элементной стружки)

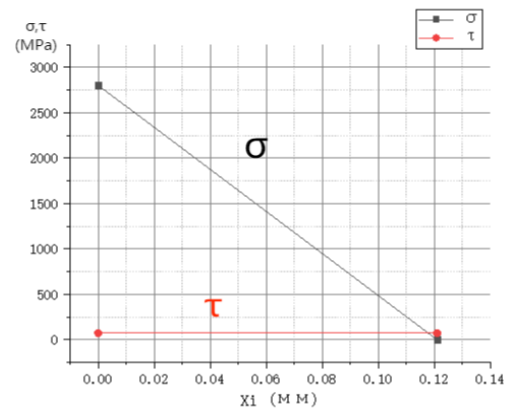
	$a = 0,11$ мм, $c = 1,1a$	$a = 0,11$ мм, $c = 3a$	$a = 0,21$ мм, $c = 1,1a$	$a = 0,21$ мм, $c = 3a$	$a = 0,41$ мм, $c = 1,1a$	$a = 0,41$ мм, $c = 3a$
σ_{\max} (МПа)	2810	1027,2	2634,6	966	2815	1032
τ_{\max} (МПа)	71,8	26,3	75,3	27,6	57,6	21,1
μ_{\min}	0,0256	0,0256	0,0286	0,0286	0,0205	0,0204

Табл. 3.2.2. — Влияние толщины среза и длины контакта стружки на наибольшие нормальные контактные напряжения при **трапецидальном** характере эпюры σ (см. рис. 3.1.1, вариант №2) (BT3-1-BK8, $\gamma = 0^\circ$, образовании элементной стружки)

	$a = 0,11$ мм, $c = 1,1a$	$a = 0,11$ мм, $c = 3a$	$a = 0,21$ мм, $c = 1,1a$	$a = 0,21$ мм, $c = 3a$	$a = 0,41$ мм, $c = 1,1a$	$a = 0,41$ мм, $c = 3a$
σ_{\max} (МПа)	1390,7	813,1	1432,5	764	1530	817
τ_{\max} (МПа)	71,8	26,3	75,3	27,6	57,6	21,1
μ_{\min}	0,0516	0,0324	0,0526	0,0361	0,0376	0,0258

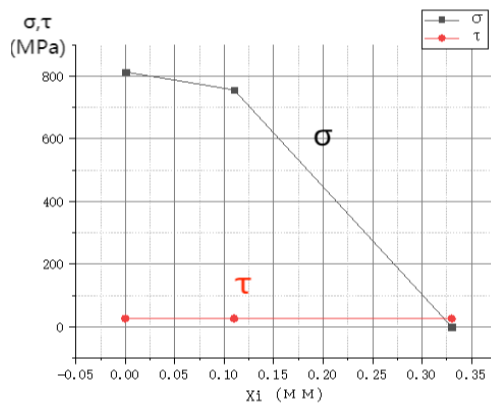


a

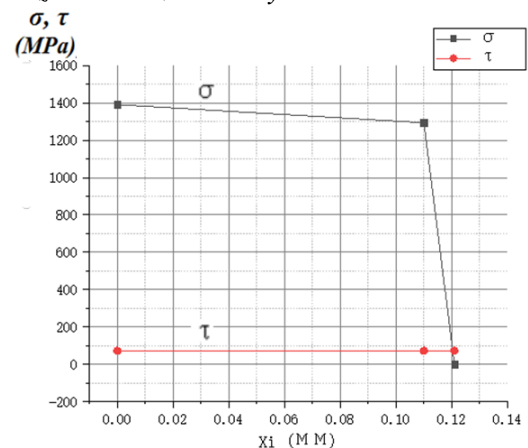


б

Рис. 3.1.4. Распределение нормальных σ и касательных τ контактных напряжений (МПа) на передней поверхности резца при обработке титанового сплава BT3-1 при **треугольном** характере эпюры σ : *a* – при длине контакта стружки с передней поверхностью $c = 3 \cdot a$; *б* – при длине контакта стружки с передней поверхностью $c = 1,1 \cdot a$. BT3-1 – BK8, $\gamma = 0^\circ$, $a = 0,11$ мм, $N = P_z = 390$ Н, $F = P_{yH} = 20$ Н.

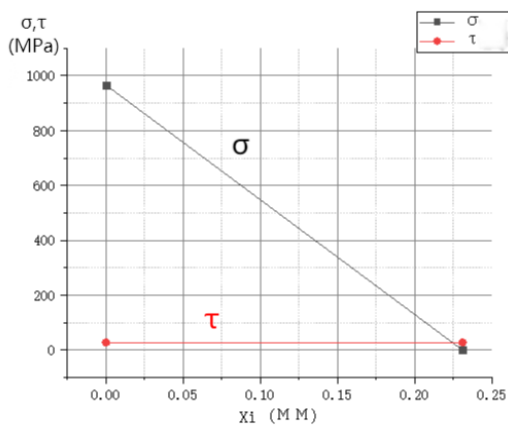


a

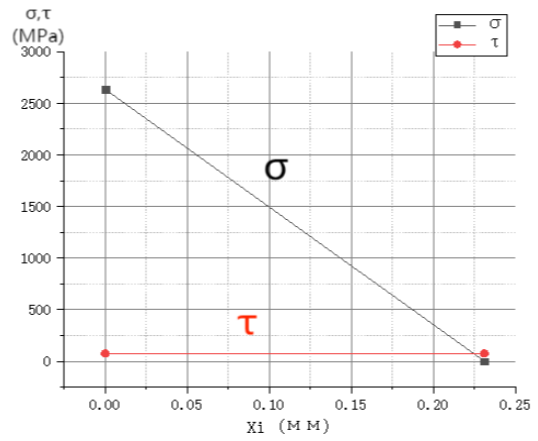


б

Рис. 3.1.5. Распределение нормальных σ и касательных τ контактных напряжений (МПа) на передней поверхности резца при обработке титанового сплава BT3-1 при **трапецидальном** характере эпюры σ : *a* – при длине контакта стружки с передней поверхностью $c = 3 \cdot a$; *б* – при длине контакта стружки с передней поверхностью $c = 1,1 \cdot a$. BT3-1 – BK8, $\gamma = 0^\circ$, $a = 0,11$ мм, $N = P_z = 390$ Н, $F = P_{yH} = 20$ Н.

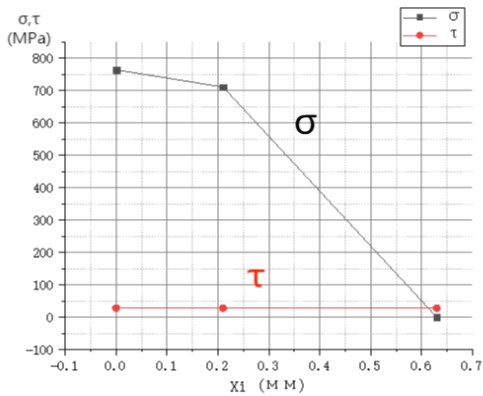


a

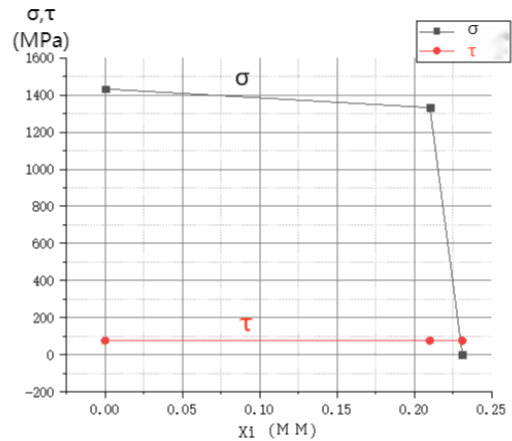


б

Рис. 3.1.6. Распределение нормальных σ и касательных τ контактных напряжений (МПа) на передней поверхности резца при обработке титанового сплава ВТ3-1 при **треугольном** характере эпюры σ : *a* – при длине контакта стружки с передней поверхностью $c = 3 \cdot a$; *б* – при длине контакта стружки с передней поверхностью $c = 1,1 \cdot a$. ВТ3-1 – ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $a = 0,21$ мм, $N = P_z = 700$ Н, $F = P_{yII} = 40$ Н.



a



б

Рис. 3.1.7. Распределение нормальных σ и касательных τ контактных напряжений (МПа) на передней поверхности резца при обработке титанового сплава ВТ3-1 при **трапецидальном** характере эпюры σ : *a* – при длине контакта стружки с передней поверхностью $c = 3 \cdot a$; *б* – при длине контакта стружки с передней поверхностью $c = 1,1 \cdot a$. ВТ3-1 – ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $a = 0,21$ мм, $N = P_z = 700$ Н, $F = P_{yII} = 40$ Н.

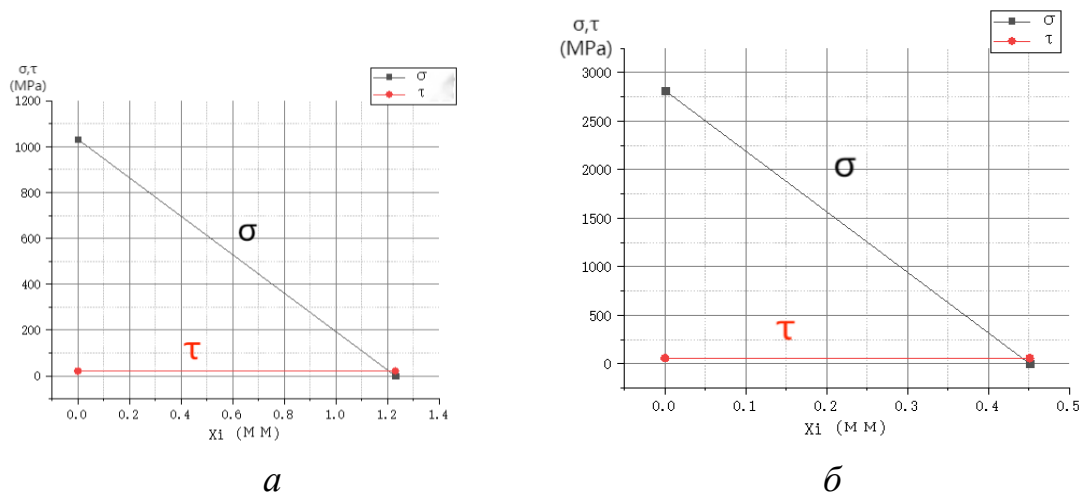


Рис. 3.1.8. Распределение нормальных σ и касательных τ контактных напряжений (МПа) на передней поверхности резца при обработке титанового сплава ВТ3-1 при **треугольном** характере эпюры σ : *a* – при длине контакта стружки с передней поверхностью $c = 3 \cdot a$; *б* – при длине контакта стружки с передней поверхностью $c = 1,1 \cdot a$. ВТ3-1 – ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $a = 0,41$ мм, $N = P_z = 1460$ Н, $F = P_{y\text{н}} = 60$ Н.

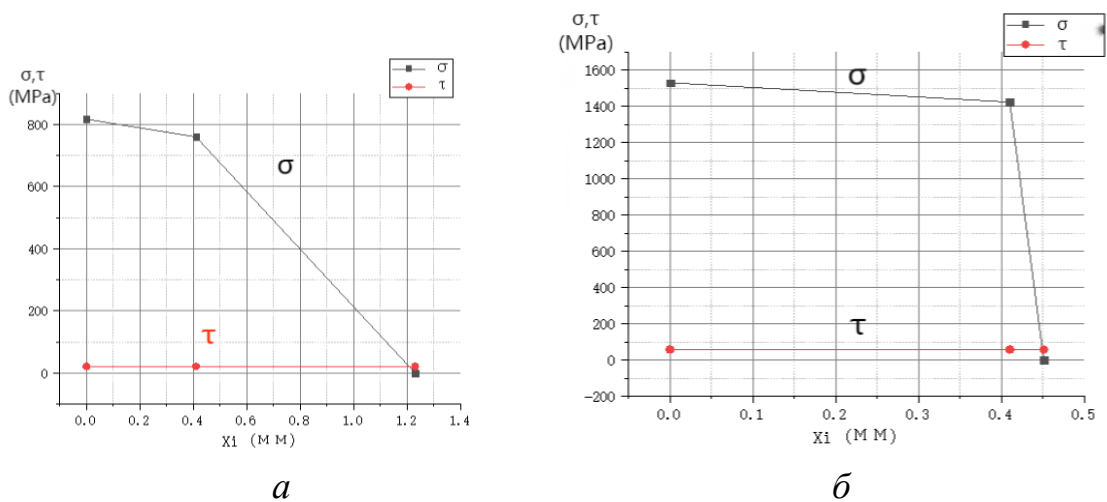


Рис. 3.1.9. Распределение нормальных σ и касательных τ контактных напряжений (МПа) на передней поверхности резца при обработке титанового сплава ВТ3-1 при **трапецидальном** характере эпюры σ : *a* – при длине контакта стружки с передней поверхностью $c = 3 \cdot a$; *б* – при длине контакта стружки с передней поверхностью $c = 1,1 \cdot a$. ВТ3-1 – ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $a = 0,41$ мм, $N = P_z = 1460$ Н, $F = P_{y\text{н}} = 60$ Н.

3.3. Определение характера эпюр контактных напряжений

На основании построенных эпюр (рис. 3.1.4 – 3.1.9) были построены графики влияния толщины среза a и длины контакта стружки c при треугольном и трапецидальном характере эпюры σ (рис. 3.1.10 – 3.1.12).

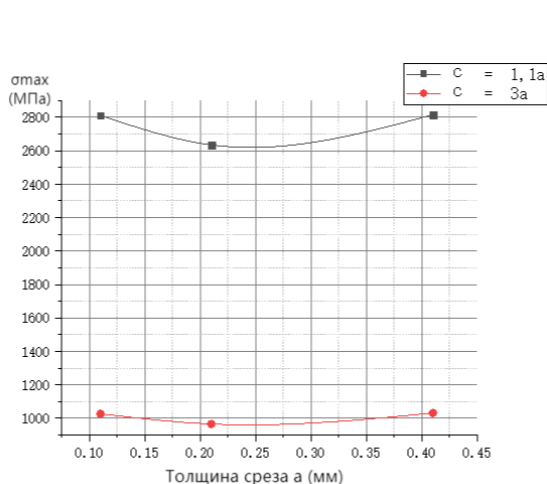


Рис 3.2.1. Влияние толщины среза a и длины контакта стружки c на величину наибольшего нормального контактного напряжения σ_{max} (МПа) на передней поверхности при обработке титанового сплава. ВТЗ-1—ВК8, $v=60$ м/мин, $\gamma=0^\circ$, $b = 2,3$ мм, **треугольный** характер эпюры σ

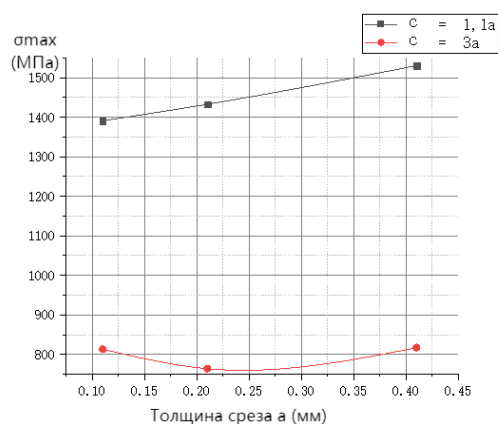


Рис 3.2.2. Влияние толщины среза a и длина контакта стружки c на величину наибольшего нормального контактного напряжения σ_{max} (МПа) на передней поверхности при обработке титанового сплава. ВТЗ-1—ВК8, $v=60$ м/мин, $\gamma=0^\circ$, $b = 2,3$ мм, **трапецидальный** характер эпюры σ

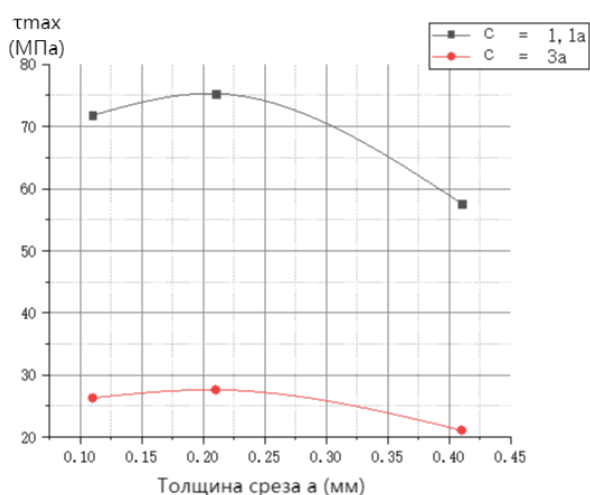


Рис 3.2.3. Влияние толщины среза a и длина контактные стружки c ($c=1,1a$) и ($c=3a$) на величину наибольшего касательного контактного напряжения τ_{max} (МПа) на передней поверхности при обработке титанового сплава. ВТЗ-1—ВК8, $v=120$ м/мин, $\gamma=0^\circ$, $b = 2,3$ мм.

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 : например, при **трапецидальном** характере эпюры σ при увеличении толщины среза в 4 раза с 0,11 до 0,41 мм σ_{\max} увеличивается всего в 1,1 раза: с 1391 до 1530 МПа.

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 σ_{\max} ($\sigma_{\max} = 1400-1550$ 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 $c = 1,1 \cdot a$.

Величина наибольшего касательного контактного напряжения τ_{\max} при длине контакта стружки с передней поверхностью $c = 1,1 \cdot a$ больше соответствует результатам исследований контактных процессов при обработке титановых сплавов, хотя и имеет очень маленькую величину ($\tau_{\max} = 55-75$ МПа). Последнее объясняется нами большой температурой приконтактной поверхности стружки ($\Theta \approx 900-1300^\circ\text{C}$) из-за малого коэффициента теплопроводности титановых сплавов [$\lambda_{\text{ВТЗ-1}} = 8,01$ Вт/(м·град) против $\lambda_{\text{сталь 40X}} = 36$ Вт/(м·град)], что приводит к существенному уменьшению предела прочности на сдвиг. При таких условиях происходит пластический характер контакта стружки с передней поверхностью. Поэтому было принято, что на передней поверхности резца характер распределения касательных контактных напряжений τ равномерный (т.к. пластический характер контакта стружки), а длина контакта стружки **дополнительно подтверждается**, что $c = 1,1 \cdot a$.

4. Исследование НДС режущего инструмента при обработке титанового сплава BT3-1

4.1. Подготовка внешней нагрузки на передней поверхности для расчёта НДС режущего клина

Для исследования влияния толщины среза a (мм) и длины контакта стружки с передней поверхностью c (мм) на НДС режущих пластин создаём 3D модели с передним углом $\gamma = 0^\circ$ и с задним углом $\alpha = 8^\circ$. Для упрощения задачи принимаем, что сначала апробируем методику расчёта НДС на модели резца, работающего при радиальном точении периферии диска из титанового сплава (рис. 4.1.1).

Ширина диска $b_d = 2,3$ мм, ширина резца $b_p = 2,35$ мм, таким образом на боковой поверхности 3D модели резца (простого режущего клина) можно увидеть картину распределения основных параметров НДС при его плоском напряжённом состоянии, при котором картина НДС одинакова в любом сечении, перпендикулярном главной режущей кромке. Радиальная подача резца $s_{\text{рад}}$ (мм/об) с режущей кромкой, параллельной оси вращения заготовки (шпинделя токарного станка), обеспечит прямоугольное свободное резание, т.к. в резании участвует только одна главная режущая кромка.

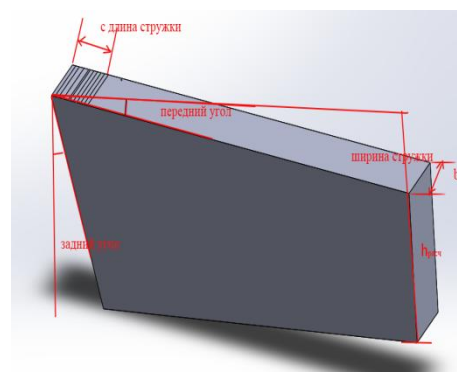


Рис. 4.1.1. Геометрические параметры режущей пластины (простого режущего клина)

При этом толщина среза a равна подаче за один оборот, т.е. $a = s \cdot \sin\varphi = s \cdot \sin 90^\circ = s \cdot (\text{мм})$.

Для расчёта НДС простого режущего клина при прямоугольном свободном резании с помощью программы ANSYS нагрузка на переднюю поверхность 3D модели режущей пластины принималась в соответствие с принятым законом распределения σ и τ (см. рис. 3.1.5 б, 3.1.7 б, 3.1.9 б). Для создания 3D модели использовали программное обеспечение Solidworks 2020 (рис. 4.1.1).

- Передний угол: $\gamma = 0^\circ$;
- Главный задний угол: $\alpha = 8^\circ$;
- Ширина режущего клина $b = 2,3$ мм.

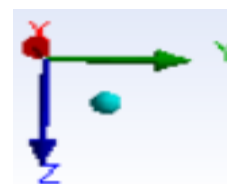


Рис. 4.1.2.
Направление осей при задании внешней нагрузки

При приложении внешних нагрузок очень важно правильно направить оси, поэтому принимаем их направление в соответствие с направлением осей действия технологических составляющих P_z , P_y , и P_x силы резания (см. рис. 2.1.1).

При прямоугольном свободном резании ось OX направляем вдоль режущей кромки (на рис. 4.1.2 она показана в направлении к наблюдателю). Касательное контактное напряжение направлено вдоль передней поверхности, а т.к. передний угол $\gamma = 0^\circ$, то оно направлено вдоль оси OY в том же направлении (рис. 4.1.2). Нормальное напряжение направлено перпендикулярно передней поверхности в её сторону, а т.к. передний угол $\gamma = 0^\circ$, то перпендикулярно к плоскости XOY (рис. 4.1.2).

Перед расчётом НДС необходимо создать 3Д модель резца (рис. 4.1.1), задать свойства материала модели резца (рис. 4.1.3), задать (приложить) внешние нагрузки (рис. 4.1.4).

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	

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

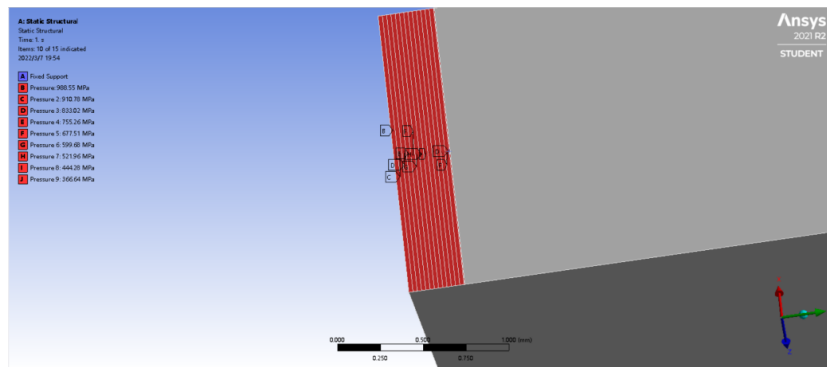


Рис. 4.1.4. Приложение внешних нагрузок на резец, работающий при прямоугольном свободном резании

В программе ANSYS задаются силы, направленные вдоль осей OZ, OY и OX (или OXY при рассмотрении НДС в главной секущей плоскости при косоугольном резании), а также задаются задачи. Например, рассчитать нормальные внутренние напряжения вдоль этих же осей (σ_z , σ_y , σ_x), эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ (σ_e), деформации по осям (ε_z , ε_y , ε_x), общие деформации ε .

Вместо сил лучше прикладывать контактные напряжения σ и τ . Т.к. эпюры

нормальных контактных напряжений σ имеют не равномерный характер распределения, то разбиваем участок контакта стружки с передней поверхностью на участки шириной, равной ширине среза b , и с длиной $L_{\pi i}$, которая зависит от крутизны уменьшения эпюры σ при отдалении от режущей кромки: чем больше интенсивность уменьшения графика σ , тем меньше должна быть длина $L_{\pi i}$.

На каждом таком участке длиной $L_{\pi i}$ принимается, что распределение нормальных контактных напряжений будет равномерным с величиной, равной среднему напряжению на данном участке $\sigma_{\text{ср}i}$, определяемой по эпюре σ (см. рис. 3.1.5 б, 3.1.7 б, 3.1.9 б), т.е. $q_{\sigma i} = \sigma_{\text{ср}i}$ (МПа).

Для проверки влияния длины участка на НДС, использовалось большое (см. табл. 4.1.1 а) и малое количество участков (см. табл. 4.1.1 б) при одинаковых эпюрах. Чем больше количество участков на длине контакта стружки с передней поверхностью, тем меньше длина участка, что увеличивает соответствие внешней нагрузки 3Д модели графику распределения контактного напряжения.

Был выполнен расчёт НДС и при разном характере эпюры σ и разной длине контакта стружки с передней поверхностью для дополнительной проверки принятого решения о **трапецидальном** характере эпюры σ и **длине контакта** стружки $c = 1,1 \times a$.

Если разница распределения основных параметров НДС ($\sigma_z, \sigma_y, \sigma_x, \sigma_{\text{экв}}, \varepsilon_z, \varepsilon_y, \varepsilon_x, \varepsilon$) при одинаковых размерах 3Д модели и сетки конечных элементов

будет небольшая, то нет необходимости использования большого количества участков, т.к. это увеличивает трудоёмкость подготовки к расчёту НДС режущего инструмента.

Таблица 4.1.1 а – Величины средних контактных напряжений на рассматриваемых участках передней поверхности при расчёте НДС резца с шириной $b=2,3$ мм. ВТЗ-1—ВК8, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=8^\circ$, $a = 0,11$ мм, $c = 3 \times a$, треугольный характер эпюры σ

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	Длина участка L_{ni} , мм	$\sigma_{cp i}$, МПа	$\tau_{cp i}$, МПа
1	2	3	4	5
1	0-0,025	0,025	988,2	26,3
2	0,025-0,05	0,025	910,4	26,3
3	0,05-0,075	0,025	832,6	26,3
4	0,075-0,10	0,025	754,8	26,3
5	0,10-0,125	0,025	677	26,3
6	0,125-0,15	0,025	599,1	26,3
7	0,15-0,175	0,025	521,3	26,3
8	0,175-0,20	0,025	443,5	26,3
9	0,20-0,225	0,025	365,7	26,3
10	0,225-0,25	0,025	287,9	26,3
11	0,25-0,275	0,025	210,1	26,3
12	0,275-0,30	0,025	132,3	26,3
13	0,30-0,325	0,025	54,4	26,3
14	0,325-0,33	0,025	7,8	26,3

Таблица 4.1.1 б – 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, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=8^\circ$, $a = 0,11$ мм, $c = 3 \times a$, треугольный характер эпюры σ

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	Длина участка L_{ni} , мм	$\sigma_{cp i}$, МПа	$\tau_{cp i}$, МПа
1	2	3	4	5
1	0-0,05	0,05	949,2	26,3
2	0,05-0,1	0,05	793,7	26,3
3	0,1-0,15	0,05	638,1	26,3
4	0,15-0,20	0,05	482,5	26,3
5	0,20-0,25	0,05	326,8	26,3
6	0,25-0,33	0,05	124,9	26,3

Таблица 4.1.2 а – Величины средних контактных напряжений на рассматриваемых участках передней поверхности при расчёте НДС резца с шириной $b=2,3$ мм. ВТЗ-1 — ВК8, $\gamma=0^\circ$, $\alpha= 8^\circ$, $a = 0,11$ мм, $c = 3 \times a$, трапецеидальный характер эпюры σ

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	$\sigma_{cp i}$, МПа	$\tau_{cp i}$, МПа
1	0-0,025	806,6	26,3
2	0,025-0,05	793,6	26,3
3	0,05-0,075	780,7	26,3
4	0,075-0,10	765,1	26,3
5	0,10-0,125	559,8	26,3
6	0,125-0,15	495,5	26,3
7	0,15-0,175	431,1	26,3
8	0,175-0,20	366,8	26,3
9	0,20-0,225	302,4	26,3
10	0,225-0,25	238	26,3
11	0,25-0,275	173,7	26,3
12	0,275-0,30	109,3	26,3
13	0,30-0,325	45	26,3
14	0,325-0,33	6,4	26,3

Таблица 4.1.2 б – 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, $\gamma=0^\circ$, $\alpha= 8^\circ$, $a = 0,11$ мм, $c = 3 \times a$, трапецеидальный характер эпюры σ

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	$\sigma_{cp i}$, МПа	$\tau_{cp i}$, МПа
1	0-0,05	1010,9	26,3
2	0,05-0,1	978,2	26,3
3	0,1-0,15	890,2	26,3
4	0,15-0,20	673	26,3
5	0,20-0,25	455,9	26,3
6	0,25-0,33	173,7	26,3

Таблица 4.1.3 а – Величины средних контактных напряжений на рассматриваемых участках передней поверхности при расчёте НДС резца с шириной $b=2,3$ мм. ВТЗ-1—ВК8, $\gamma=0^\circ$, $\alpha= 8^\circ$, $a = 0,11$ мм, $c = 1,1 \times a$, треугольный характер эпюры σ

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	$\sigma_{cp\ i}$, МПа	$\tau_{cp\ i}$, МПа
1	0-0,01	2685,2	71,8
2	0,01-0,02	2453,7	71,8
3	0,02-0,03	2222,3	71,8
4	0,03-0,04	1990,7	71,8
5	0,04-0,05	1759,3	71,8
6	0,05-0,06	1527,8	71,8
7	0,06-0,07	1296,3	71,8
8	0,07-0,08	1064,8	71,8
9	0,08-0,09	833,3	71,8
10	0,09-0,10	601,8	71,8
11	0,10-0,11	370,4	71,8
12	0,11-0,121	127,3	71,8

Таблица 4.1.3 б – 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, $\gamma=0^\circ$, $\alpha= 8^\circ$, $a = 0,11$ мм, $c = 1,1 \times a$, треугольный характер эпюры σ

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	$\sigma_{cp\ i}$, МПа	$\tau_{cp\ i}$, МПа
1	0-0,02	2569,5	71,8
2	0,02-0,04	2106,5	71,8
3	0,04-0,06	1643,6	71,8
4	0,06-0,08	1180,9	71,8
5	0,08-0,10	717,6	71,8
6	0,10-0,121	243	71,8

Таблица 4.1.4 *a* – Величины средних контактных напряжений на рассматриваемых участках передней поверхности при расчёте НДС резца с шириной $b=2,3$ мм. ВТЗ-1 — ВК8, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=8^\circ$, $a=0,11$ мм, $c=1,1 \times a$, трапецидальный характер эпюры σ

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	$\sigma_{cp i}$, МПа	$\tau_{cp i}$, МПа
1	0-0,01	1386,3	71,8
2	0,01-0,02	1377,4	71,8
3	0,02-0,03	1368,5	71,8
4	0,03-0,04	1359,7	71,8
5	0,04-0,05	1350,8	71,8
6	0,05-0,06	1342	71,8
7	0,06-0,07	1333,2	71,8
8	0,07-0,08	1324,3	71,8
9	0,08-0,09	1315,5	71,8
10	0,09-0,10	1306,6	71,8
11	0,10-0,11	1297,8	71,8
12	0,11-0,121	646,7	71,8

Таблица 4.1.4 *б* – 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, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=8^\circ$, $a=0,11$ мм, $c=1,1 \times a$, трапецидальный характер эпюры σ

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	$\sigma_{cp i}$, МПа	$\tau_{cp i}$, МПа
1	0-0,02	1381,9	71,8
2	0,02-0,04	1364,2	71,8
3	0,04-0,06	1346,5	71,8
4	0,06-0,08	1328,8	71,8
5	0,08-0,10	1311	71,8
6	0,10-0,121	1293,4	71,8

Таблица 4.1.5 – 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, $\gamma=0^\circ$, $\alpha= 8^\circ$, $a = 0,21$ мм, $c = 3 \times a$, треугольный характер эпюры σ

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	$\sigma_{cp\ i}$, МПа	$\tau_{cp\ i}$, МПа
1	0-0,1	889,3	27,6
2	0,1-0,2	736	27,6
3	0,2-0,3	582,7	27,6
4	0,3-0,4	429,3	27,6
5	0,4-0,5	276	27,6
6	0,5-0,63	99,7	27,6

Таблица 4.1.6 – 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, $\gamma=0^\circ$, $\alpha= 8^\circ$, $a = 0,21$ мм, $c = 3 \times a$, 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	752,3	27,6
2	0,1-0,2	725,8	27,6
3	0,2-0,3	642,9	27,6
4	0,3-0,4	473,7	27,6
5	0,4-0,5	304,5	27,6
6	0,5-0,63	110	27,6

Таблица 4.1.7 – 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, $\gamma=0^\circ$, $\alpha= 8^\circ$, $a = 0,21$ мм, $c = 1,1 \times a$, треугольный характер эпюры σ

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	$\sigma_{cp\ i}$, МПа	$\tau_{cp\ i}$, МПа
1	0-0,05	2349,5	75,3
2	0,05-0,10	1779,3	75,3
3	0,10-0,15	1209	75,3
4	0,15-0,20	639,9	75,3
5	0,20-0,231	177	75,3

Таблица 4.1.8 – 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, $\gamma=0^\circ$, $\alpha= 8^\circ$, $a = 0,21$ мм, $c = 1,1 \times a$, трапецеидальный характер эпюры

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	$\sigma_{cp\ i}$, МПа	$\tau_{cp\ i}$, МПа
1	0-0,05	1420,6	75,3
2	0,05-0,10	1396,9	75,3
3	0,10-0,15	1372,8	75,3
4	0,15-0,20	1348,9	75,3
5	0,20-0,231	983,3	75,3

Таблица 4.1.9 – 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, $\gamma=0^\circ$, $\alpha= 8^\circ$, $a = 0,41$ мм, $c = 3 \times a$, треугольный характер эпюры σ

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	$\sigma_{cp\ i}$, МПа	$\tau_{cp\ i}$, МПа
1	0-0,2	948	21,1
2	0,2-0,4	780,3	21,1
3	0,4-0,6	612,5	21,1
4	0,6-0,8	444,7	21,1
5	0,8-1,0	276,9	21,1
6	1,0-1,23	96,5	21,1

Таблица 4.1.10 – 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, $\gamma=0^\circ$, $\alpha= 8^\circ$, $a = 0,41$ мм, $c = 3 \times a$, трапецеидальный характер эпюры σ

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	$\sigma_{cp\ i}$, МПа	$\tau_{cp\ i}$, МПа
1	0-0,2	803	21,1
2	0,2-0,4	775,2	21,1
3	0,4-0,6	676,2	21,1
4	0,6-0,8	491,1	21,1
5	0,8-1,0	305,8	21,1
6	1,0-1,23	106,6	21,1

Таблица 4.1.11 *a* – Величины средних контактных напряжений на рассматриваемых участках передней поверхности при расчёте НДС резца с шириной $b=2,3$ мм.

BT3-1—BK8, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=8^\circ$, $a=0,41$ мм, $c=1,1 \times a$, треугольный характер эпюры σ

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	$\sigma_{cp\ i}$, МПа	$\tau_{cp\ i}$, МПа
1	0-0,05	2658,9	57,6
2	0,05-0,1	2346,8	57,6
3	0,1-0,15	2034,9	57,6
4	0,15-0,20	1722,7	57,6
5	0,20-0,25	1410,6	57,6
6	0,25-0,30	1098,5	57,6
7	0,30-0,35	786,5	57,6
8	0,35-0,40	474,4	57,6
9	0,40-0,451	159,2	57,6

Таблица 4.1.11 *б* – Величины средних контактных напряжений на рассматриваемых участках передней поверхности при расчёте НДС резца с шириной $b=2,3$ мм при **малом** количестве участков. BT3-1—BK8, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=8^\circ$, $a=0,41$ мм, $c=1,1 \times a$, треугольный характер эпюры σ

№ участка от режущей кромки	Диапазон i -того участка, мм	$\sigma_{cp\ i}$, МПа	$\tau_{cp\ i}$, МПа
1	0-0,1	2502,9	57,6
2	0,1-0,2	1878,7	57,6
3	0,2-0,3	1254,6	57,6
4	0,3-0,4	630,4	57,6
5	0,4-0,451	159,2	57,6

Таблица 4.1.12 а – Величины средних контактных напряжений на рассматриваемых участках передней поверхности при расчёте НДС резца с шириной $b=2,3$ мм. ВТЗ-1—ВК8, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=8^\circ$, $a=0,41$ мм, $c=1,1 \times a$, 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	1523,4	57,6
2	0,05-0,1	1510,4	57,6
3	0,1-0,15	1497,3	57,6
4	0,15-0,20	1484,3	57,6
5	0,20-0,25	1471,2	57,6
6	0,25-0,30	1458,2	57,6
7	0,30-0,35	1445,1	57,6
8	0,35-0,40	1432	57,6
9	0,40-0,451	884,9	57,6

Таблица 4.1.12 б – 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, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=8^\circ$, $a=0,41$ мм, $c=1,1 \times a$, 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	1516,9	57,6
2	0,1-0,2	1490,2	57,6
3	0,2-0,3	1464,7	57,6
4	0,3-0,4	1438,6	57,6
5	0,4-0,451	884,9	57,6

4.2. Подготовка внешней нагрузки на фаске износа по задней поверхности для расчёта НДС режущего клина

При обработке титановых сплавов труднообрабатываемых групп обрабатываемости режущие инструменты интенсивно изнашиваются по задней поверхности с образованием фаски износа длиной $h_\phi = h_3 = h_f$. Последнее

обозначение широко используется в зарубежной литературе, а в последнее время и в отечественной. Поэтому будем использовать это обозначение.

Если длина фаски износа не превышает 1 мм, то задний угол на ней равен нулю градусов, т.е. $\alpha_{\phi} = \alpha_{h_3} = \alpha_h = 0^\circ$. С увеличением длины фаски этот угол становится отрицательным: при $h_f > 3$ мм задний угол $\alpha_h \approx -1 \dots -3^\circ$. Резание, тем не менее, продолжается, что является предметом для изучения в этой работе.

Для некоторого упрощения задачи принимаем, что задний угол на фаске износа $\alpha_h = 0^\circ$. При измерении технологических составляющих силы резания очень важно, чтобы условия контакта не изменялись, особенно на фаске износа из-за жёсткости контакта фаски с поверхностью резания (с заготовкой). Поэтому на задней поверхности резца затачивалась искусственная фаска с задним углом $\alpha_h = 0^\circ$ и длиной $h_f = 1,2$ мм.

Этим резцом выполнялось резание с разными подачами, измерялись силы резания, длина контакта стружки с передней поверхностью. После этого инструмент затачивался только по задней поверхности (задний угол $\alpha = 8^\circ$), доводя длину фаски до желаемой величины. Обычно это 1,0 мм, затем 0,8 мм, и так далее, пока фаска не исчезала. Такой способ позволяет не изменять задний угол на фаске $\alpha_h = 0^\circ$ и обеспечивает неизменность условий контакта по задней поверхности.

Последний этап обработки с длиной искусственной фаски износа $h_f = 0,05 \dots 0,054$ мм принимался как обработка неизношенным инструментом. Если фаска отсутствовала, то режущая кромка начинала выкрашиваться, что не

позволяло обеспечить идентичность геометрии резца в разных сериях экспериментов.

Обработка графиков изменения составляющих силы резания при уменьшении радиальной подачи $s_{\text{рад}}$ (толщины среза a при прямоугольном свободном резании) (рис. 3.1.1) позволил выделить силы на этой очень маленькой фаске методом экстраполяции на нулевую толщину среза, т.е. при $a = 0$ мм.

Отношение приращения силы P_z ($\Delta P_{zi} = P_{zi} - P_{zi-1}$) на графике увеличения сил при увеличении длины фаски износа h_f (т.е. $h_{fi} = h_{fi-1} + \Delta h_f$) к приращению площади фаски $\Delta S_{\phi} = (h_{fi} - h_{fi-1}) \times b$ есть удельная сила q_{Pzh_i} (Н/мм²) на этом i -том участке фаски задней поверхности. В обозначении удельной силы вводится индекс h , т.к. прирост силы P_z связан только с увеличением силы на фаске задней поверхности при увеличении её длины на величину Δh_f .

Необходимо уточнить, что переточка по задней поверхности вызывает уменьшение длины фаски h_f , а значит, и уменьшение сил резания. Однако при построении графиков влияния длины фаски на силы резания, т.е. $P_z = f(h_f)$ и $P_y = f(h_f)$, построения начинаются с нулевой фаски по задней поверхности с последующим увеличением её длины, а значит, и увеличением сил резания: $\uparrow h_f \rightarrow \uparrow P_z$ и $\uparrow P_y$.

Обычно при проведении экспериментов $\Delta h_f = 0,1$ мм при $h_f < 0,7$ мм, т.к. в этом диапазоне изменения длины фаски происходит интенсивное изменение составляющей P_y силы резания. При $h_f > 0,7$ мм $\Delta h_f = 0,2$ мм, т.к. в этом

диапазоне изменения длины фаски изменение составляющей P_y происходит по прямо пропорциональной зависимости, поэтому и нет необходимости часто изменять длину фаски переточкой по задней поверхности.

Величина $q_{Pzh i}$ есть удельная сила трения F_h на фаске задней поверхности, т.е. $q_{Pzh i} = q_{Fh i}$ (Н/мм²). При $h_f \rightarrow 0$ мм удельная сила трения на фаске задней поверхности $q_{Fh i}$ приближается по величине к касательному контактному напряжению в рассматриваемой точке i , т.е. $q_{Fh i} \rightarrow \tau_h$.

Аналогично и по отношению приращения силы P_y ($\Delta P_{y i} = P_{y i} - P_{y i-1}$) к приращению площади фаски $\Delta S_\Phi = (h_{f i} - h_{f i-1}) \times b$ – это есть удельная сила $q_{Pyh i}$ (Н/мм²) на этом i -том участке фаски задней поверхности.

Величина $q_{Pyh i}$ есть удельная сила давления N_h на фаске задней поверхности, т.е. $q_{Pyh i} = q_{Nh i}$ (Н/мм²). При $h_f \rightarrow 0$ мм удельная сила давления на фаске задней поверхности $q_{Nh i}$ приближается по величине к нормальному контактному напряжению в рассматриваемой точке i , т.е. $q_{Nh i} \rightarrow \sigma_h$.

Таким образом, используя графики изменения сил резания при изменении длины фаски можно построить эпюры контактных напряжений σ_h и τ_h на искусственной фаске износа по задней поверхности для приложения нагрузки на этой фаске изношенного резца.

4.3. Расчёт НДС неизношенного режущего клина

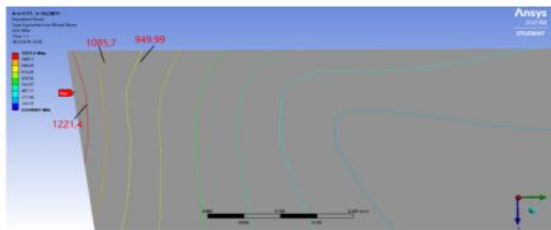


Рис. 4.3.1.1. Распределение эквивалентных напряжений в режущем клине при прямоугольном резании диска. ВТ3-1—ВК8, $\gamma=0^\circ$, $a \approx 0,11$ мм, $c = 3a$ мм, $b \approx 2,3$, $F=20$ Н, $N=390$ Н, Треугольный характер эпюры, 14 участков

a

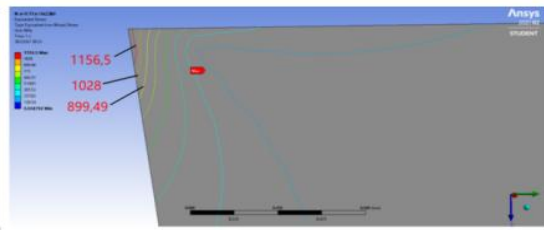


Рис. 4.3.2.1. Распределение эквивалентных напряжений в режущем клине при прямоугольном резании диска. ВТ3-1—ВК8, $\gamma=0^\circ$, $a \approx 0,11$ мм, $c = 3a$ мм, $b \approx 2,3$, $F=20$ Н, $N=390$ Н, Треугольный характер эпюры, 6 участков

б

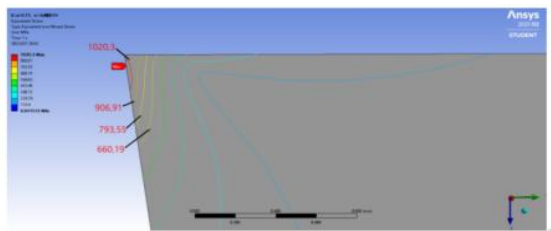


Рис. 4.3.3.1. Распределение эквивалентных напряжений в режущем клине при прямоугольном резании диска. ВТ3-1—ВК8, $\gamma=0^\circ$, $a \approx 0,11$ мм, $c = 3a$ мм, $b \approx 2,3$, $F=20$ Н, $N=390$ Н, Трапецидальный, 14 участков

в

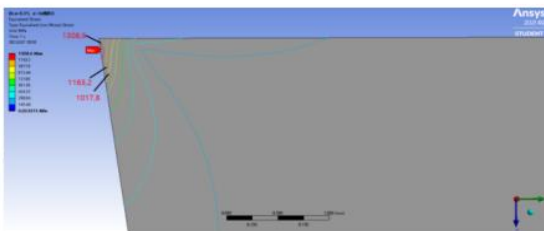


Рис. 4.3.4.1. Распределение эквивалентных напряжений в режущем клине при прямоугольном резании диска. ВТ3-1—ВК8, $\gamma=0^\circ$, $a \approx 0,11$ мм, $c = 3a$ мм, $b \approx 2,3$, $F=20$ Н, $N=390$ Н, Трапецидальный, 6 участков

г

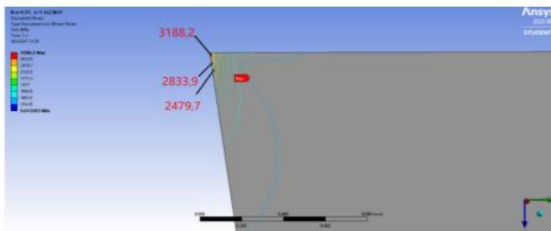


Рис. 4.3.5.1. Распределение эквивалентных напряжений в режущем клине при прямоугольном резании диска. ВТ3-1—ВК8, $\gamma=0^\circ$, $a \approx 0,11$ мм, $c = 1,1a$ мм, $b \approx 2,3$, $F=20$ Н, $N=390$ Н, Треугольный характер эпюры, 12 участков

д

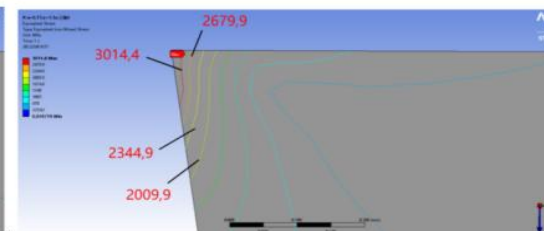


Рис. 4.3.6.1. Распределение эквивалентных напряжений в режущем клине при прямоугольном резании диска. ВТ3-1—ВК8, $\gamma=0^\circ$, $a \approx 0,11$ мм, $c = 1,1a$, $b \approx 2,3$, $F=20$ Н, $N=390$ Н, Треугольный характер эпюры, 6 участков

е

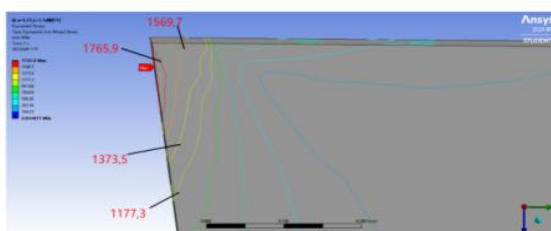


Рис. 4.3.7.1. Распределение эквивалентных напряжений в режущем клине при прямоугольном резании диска. ВТ3-1—ВК8, $\gamma=0^\circ$, $a \approx 0,11$ мм, $c = 1,1a$, $b \approx 2,3$, $F=20$ Н, $N=390$ Н, Трапецидальный характер эпюры, 12 участков

ж

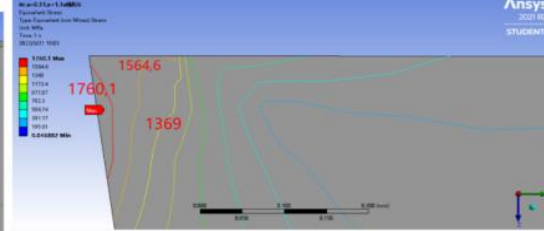


Рис. 4.3.8.1. Распределение эквивалентных напряжений в режущем клине при прямоугольном резании диска. ВТ3-1—ВК8, $\gamma=0^\circ$, $a \approx 0,11$ мм, $c = 1,1a$, $b \approx 2,3$, $F=20$ Н, $N=390$ Н, Трапецидальный характер эпюры, 6 участков

з

Рис. 4.3.1 – Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экр}} \max$ в режущем клине при прямоугольном резании диска и титанового сплава. ВТ3-1-ВК8, $\gamma=0^\circ$, $b=2,3$ мм. ***a*** – толщина среза $a = 0,11$ мм, $c = 3a$, треугольная форма эпюры σ , 14 участков; ***б*** – толщина среза $a = 0,11$ мм, $c = 3a$, треугольная форма эпюры σ , 6 участков; ***в*** – толщина среза $a = 0,11$ мм, $c = 3a$, трапецидальная форма эпюры σ , 14 участков; ***г*** – толщина среза $a = 0,11$ мм, $c = 3a$, трапецидальная форма эпюры σ , 6 участков; ***д*** – толщина среза $a = 0,11$ мм, $c = 1,1a$, треугольная форма эпюры σ , 12 участков; ***е*** – толщина среза $a = 0,11$ мм, $c = 1,1a$, треугольная форма эпюры σ , 6 участков; ***ж*** – толщина среза $a = 0,11$ мм, $c = 1,1a$, трапецидальная форма эпюры σ , 12 участков; ***з*** – толщина среза $a = 0,11$ мм, $c = 1,1a$, трапецидальная форма эпюры σ , 6 участков;

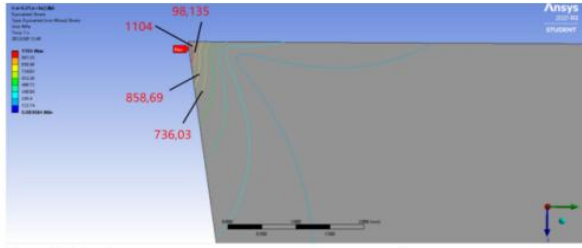


Рис. 4.3.9.1. Распределение эквивалентных напряжений в режущем клине при прямоугольном резании диска ВТ3-1—BK8, $\gamma=0^\circ$, $a \approx 0,21$ мм, $c = 3a$, $b \approx 2,3$, $F=40$ Н, $N=700$ Н, Треугольный характер эпюры, 6 участков

а

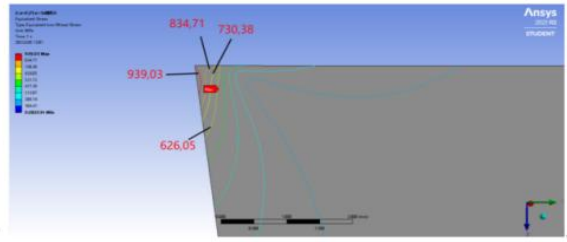


Рис. 4.3.10.1. Распределение эквивалентных напряжений в режущем клине при прямоугольном резании диска ВТ3-1—BK8, $\gamma=0^\circ$, $a \approx 0,21$ мм, $c = 3a$, $b \approx 2,3$, $F=40$ Н, $N=700$ Н, Трапецидальный характер эпюры, 6 участков

б

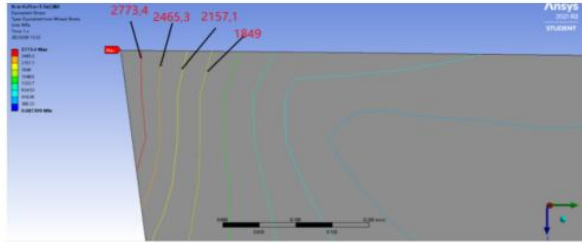


Рис. 4.3.11.1. Распределение эквивалентных напряжений в режущем клине при прямоугольном резании диска ВТ3-1—BK8, $\gamma=0^\circ$, $a \approx 0,21$ мм, $c = 1,1a$, $b \approx 2,3$, $F=40$ Н, $N=700$ Н, Треугольный характер эпюры, 5 участков

в

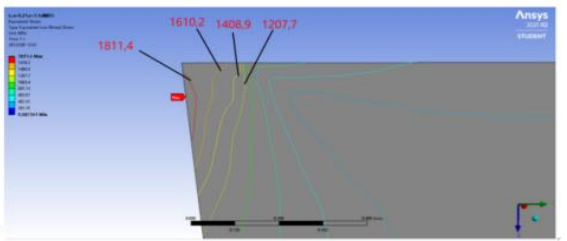


Рис. 4.3.12.1. Распределение эквивалентных напряжений в режущем клине при прямоугольном резании диска ВТ3-1—BK8, $\gamma=0^\circ$, $a \approx 0,21$ мм, $c = 1,1a$, $b \approx 2,3$, $F=40$ Н, $N=700$ Н, Трапецидальный характер эпюры, 5 участков

г

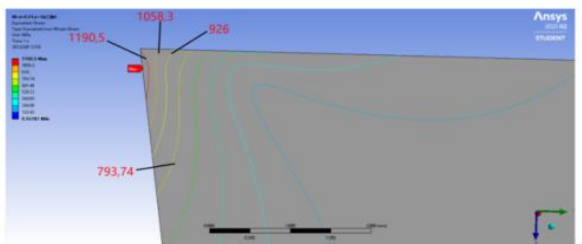


Рис. 4.3.13.1. Распределение эквивалентных напряжений в режущем клине при прямоугольном резании диска ВТ3-1—BK8, $\gamma=0^\circ$, $a \approx 0,41$ мм, $c = 3a$, $b \approx 2,3$, $F=60$ Н, $N=1460$ Н, Треугольный характер эпюры, 6 участков

д

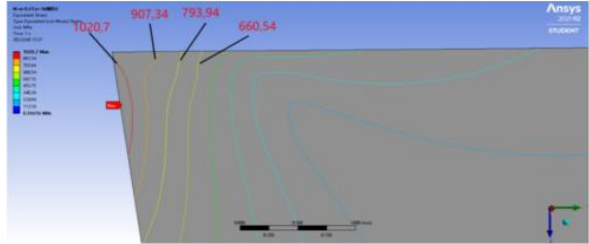


Рис. 4.3.14.1. Распределение эквивалентных напряжений в режущем клине при прямоугольном резании диска ВТ3-1—BK8, $\gamma=0^\circ$, $a \approx 0,41$ мм, $c = 3a$, $b \approx 2,3$, $F=60$ Н, $N=1460$ Н, Трапецидальный характер эпюры, 6 участков

е

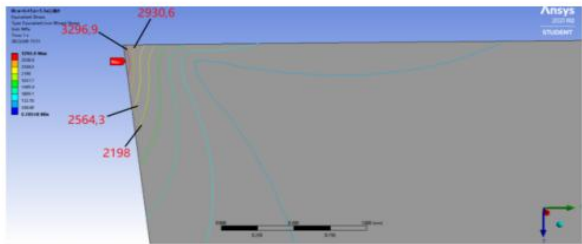


Рис. 4.3.15.1. Распределение эквивалентных напряжений в режущем клине при прямоугольном резании диска ВТ3-1—BK8, $\gamma=0^\circ$, $a \approx 0,41$ мм, $c = 1,1a$, $b \approx 2,3$, $F=60$ Н, $N=1460$ Н, Треугольный характер эпюры, 9 участков

ж

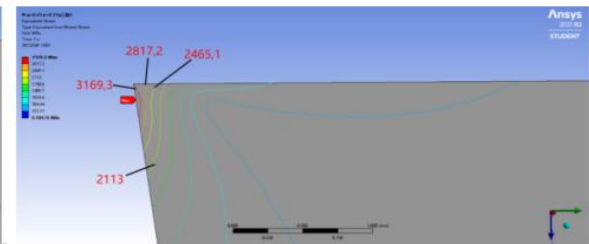


Рис. 4.3.16.1. Распределение эквивалентных напряжений в режущем клине при прямоугольном резании диска ВТ3-1—BK8, $\gamma=0^\circ$, $a \approx 0,41$ мм, $c = 1,1a$, $b \approx 2,3$, $F=60$ Н, $N=1460$ Н, Треугольный характер эпюры, 5 участков

з

Рис. 4.3.2 – Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв max}}$ в режущем клине при прямоугольном резании диска и титанового сплава ВТ3-1-BK8, $\gamma=0^\circ$, $b=2,3$ мм. **а** – толщина среза $a = 0,21$ мм, $c = 3a$, треугольная форма эпюры σ , 6 участков; **б** – толщина среза $a = 0,21$ мм, $c = 3a$, трапецидальная форма эпюры σ , 6 участков; **в** – толщина среза $a = 0,21$ мм, $c = 1,1a$, треугольная форма эпюры σ , 5 участков; **г** – толщина среза $a = 0,21$ мм, $c = 1,1a$, трапецидальная форма эпюры σ , 5 участков; **д** – толщина среза $a = 0,41$ мм, $c = 3a$, треугольная форма эпюры σ , 6 участков; **е** – толщина среза $a = 0,41$ мм, $c = 3a$, трапецидальная форма эпюры σ , 6 участков; **ж** – толщина среза $a = 0,41$ мм, $c = 1,1a$ треугольная форма эпюры σ , 9 участков; **з** – толщина среза $a = 0,41$ мм, $c = 1,1a$, трапецидальная форма эпюры σ , 5 участков.

По картинам НДС режущего клина определяем **наибольшие** деформации и напряжения при малом и большом количестве участков на длине контакта стружки для переднего угла.

Табл. 4.3.1. — Наибольшие деформации и напряжения при **малом** и **большом** количестве участников при обработки титанового сплава. ВТЗ-1—ВК8, $v=60$ м/мин, $\gamma=0^\circ$, $b = 2,3$ мм, $\alpha=8^\circ$.

№ порядковый и название параметра	Толщина среза a (мм)	Маленькое	Большое	Маленькое	Большое	Маленькое	Большое	Маленькое	Большое
		количество участков Треугольный характер	количество участков Треугольный характер	количество участков Трапецидальный характер	количество участков Трапецидальный характер	количество участков Треугольный характер	количество участков Треугольный характер	количество участко Трапецидальн ый характер	количество участков Трапецидальн ый характер
		$c = 3 \times a$	$c = 3 \times a$	$c = 3 \times a$	$c = 3 \times a$	$c = 1,1 \times a$	$c = 1,1 \times a$	$c = 1,1 \times a$	$c = 1,1 \times a$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 - наибольшие эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв max}}$ (МПа)	$a = 0,11$	1156,5	1221,4	1308,6	1020,3	3014,8	3188,2	1760,1	1765,9
	$a = 0,21$	1104		939,03		2773,4		1811,4	1816,2
	$a = 0,41$	1190,5		1020,7		3169,3	3296,9	1948,4	1960
2 - наибольшие нормальные напряжения по оси OY $\sigma_y \text{ max}$ (МПа)	$a = 0,11$	451,38	478,14	558,13	408,72	1207,6	1010,7	940,82	894,42
	$a = 0,21$	439,44		417,75		1113,9		901,56	999,9
	$a = 0,41$	513,15		495,5		1311,6	1335,2	1117,1	1115,9
3 - наибольшие нормальные напряжения по оси OZ $\sigma_z \text{ max}$ (МПа)	$a = 0,11$	12,313	9,87	15,828	8,4216	27,457	23,306	76,966	32,601
	$a = 0,21$	11,918		11,824		25,312		72,43	58,504
	$a = 0,41$	23,349		22,997		27,531	27,588	61,962	54,959
4 - наибольшие деформация ϵ_{max} (мм)	$a = 0,11$	0,0094481	0,0094923	0,011727	0,0081506	0,0040846	0,010558	0,0034912	0,0033676
	$a = 0,21$	0,0046853		0,0045171		0,006254		0,0056342	0,0056377
	$a = 0,41$	0,0076891		0,0073412		0,011017	0,011112	0,0096453	0,0096504

Табл. 4.3.1 – продолжение

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
5 - наибольшие касательные напряжения в плоскости YOZ $\tau_{yz \max}$ (МПа)	<i>a</i> = 0,11	37,07	30,394	45,644	25,943	72,898	311,53	62,886	46,893
	<i>a</i> = 0,21	51,907		51,866		77,41		54,797	53,209
	<i>a</i> = 0,41	110		109,9		110,64	111,37	110,64	111,36
6 - наибольшие касательные напряжения в плоскости XOZ $\tau_{xz \max}$ (МПа)	<i>a</i> = 0,11	50,6	50,539	64,6	43,418	63,48	52,966	48,472	46,215
	<i>a</i> = 0,21	89,221		89,059		90,625		91,271	91,279
	<i>a</i> = 0,41	186,54		186		190,4	190,48	189,58	189,63

Сравнение результатов расчётов НДС режущего клина при разном количестве участков, на которые делится длина контакта стружки с передней поверхностью для задания внешней нагрузки на передней поверхности, показало, что увеличение количества участков несущественно увеличивает напряжения и деформации в режущем клине. Поэтому было принято использовать длину участков $l_i = 0,1$ мм.

Сравнение наибольших напряжений и деформаций в режущем клине, полученных при нагрузке передней поверхности 3Д модели режущего клина эпюрами с разным характером эпюры σ и длиной контакта стружки показало, что они существенно зависят от характера эпюры нормальных контактных напряжений σ , длины контакта стружки c с передней поверхностью s , но несущественно зависят от

толщины среза a :

например, при

трапецеидальном

характере эпюры σ при

увеличении толщины

среза в 4 раза с 0,11 до

0,41 мм $\sigma_{\text{экв max}}$

увеличивается всего в

1,14 раза (рис. 4.3.3).

Величина $\sigma_{\text{экв max}}$

(рис. 4.3.3) после расчёта НДС режущего клина при его нагрузке разной формой эпюр и соотношения длины контакта с толщиной среза дополнительно показала, что трапецеидальная форма эпюры σ и длина контакта стружки $c = 1,1 \times a$ в наибольшей степени соответствуют результатам исследования напряжённого состояния режущих пластин при обработке титанового сплава.

На рис. 4.3.1 приведены картины распределения эквивалентных

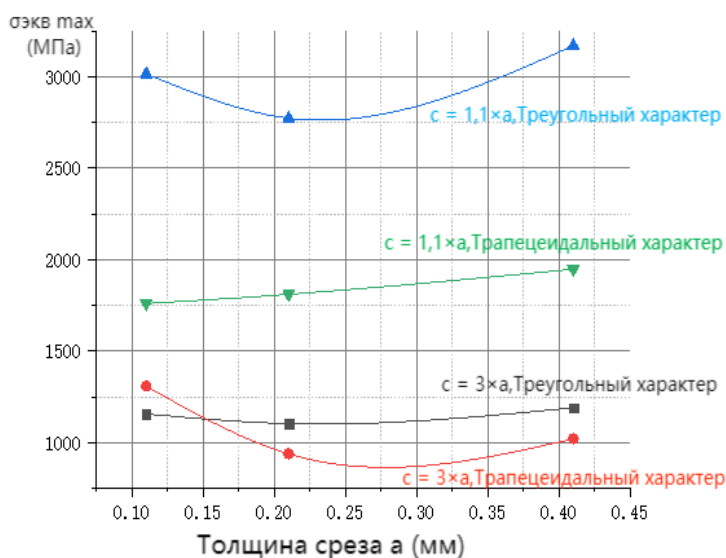


Рис. 4.3.3. Влияние толщины среза a (мм) на наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$ (МПа) при обработке титанового сплава. ВТЗ-1 -ВК8, $v = 60$ м/мин, $\gamma = 0^\circ$, $b = 2,3$ мм.

напряжений в неизношенном режущем клине при прямоугольном резании диска из титанового сплава ВТ3-1 при разных толщинах среза.

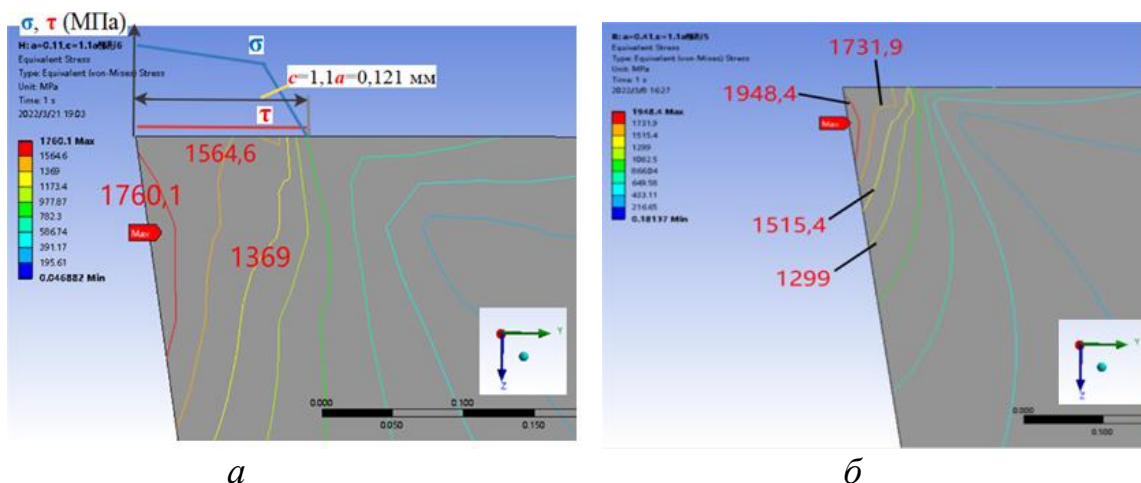
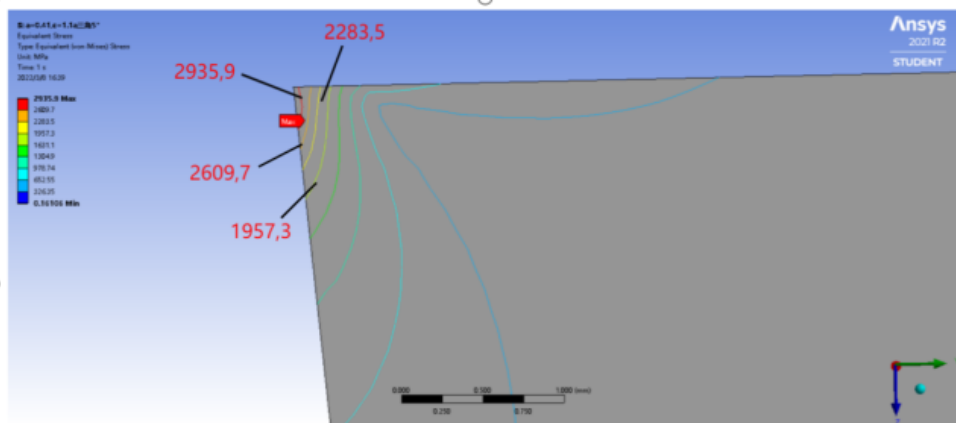


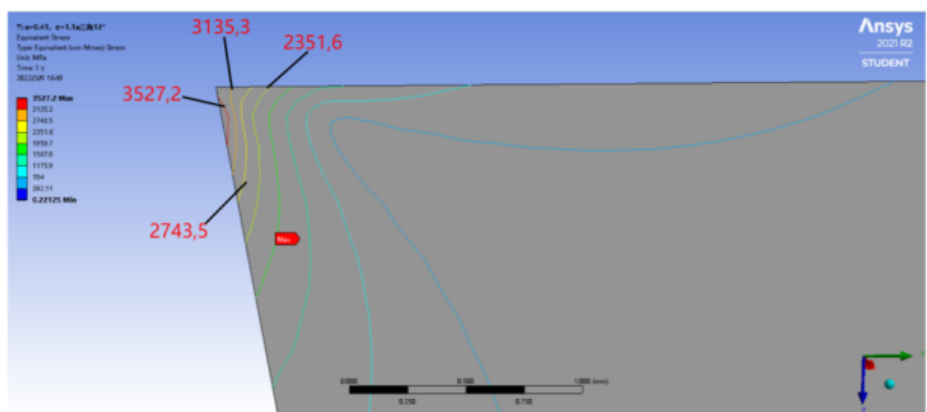
Рис. 4.3.4. Распределение эквивалентных напряжений в режущем клине при прямоугольном резании диска. ВТ3-1-ВК8, $\gamma=0^\circ$, $c = 1,1a$, $b = 2,3$ мм, трапецидальный характер эпюры нормальных контактных напряжений σ , 5 участков: а) толщина среза $a = 0,11$ мм, $c = 1,1a = 0,121$ мм; б) толщина среза $a = 0,41$ мм, $c = 1,1a = 0,451$ мм.

Характер распределения эквивалентных напряжений при разной толщине среза одинаков, их величина быстро уменьшается при отдалении от участка контакта стружки с передней поверхностью в направлении оси OY . В направлении оси OZ величина $\sigma_{\text{эКВ}}$ практически не изменяется (практически вертикальные линии равных напряжений), что приводит к появлению на задней поверхности и на основании режущей пластины довольно больших напряжений. На практике это подтверждается в некоторых случаях отслаиванием твёрдого сплава на основании режущей пластины.

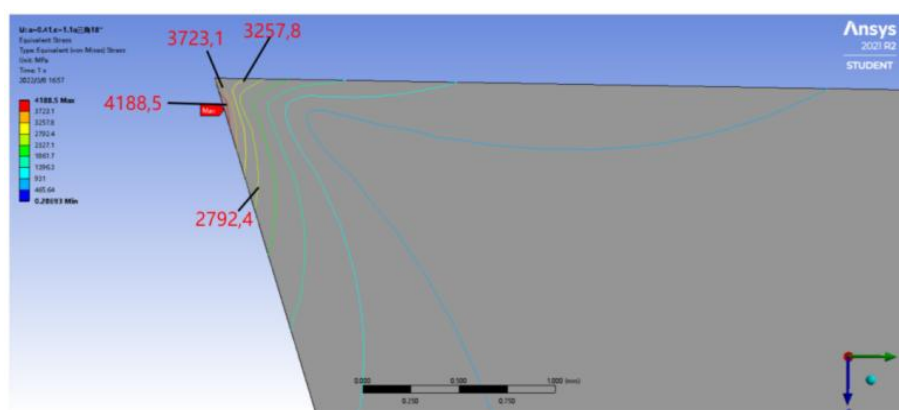
4.4. Исследования влияния заднего угла α на наибольшие эквивалентные напряжения



a



б



в

Рис. 4.4.1. Влияние заднего угла α на распределение эквивалентных напряжений в режущем клине при прямоугольном резании диска. ВТЗ-1-ВК8, $\gamma=0^\circ$, толщина среза $a = 0,41$ мм, $c = 1,1a = 0,451$ мм, $b = 2,3$ мм, треугольная форма эпюры σ , 5 участков: а) $\alpha = 5^\circ$; б) $\alpha = 12^\circ$; в) $\alpha = 18^\circ$.

На рис. 4.4.1 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 **треугольной** форме эпюры σ), но с различной величиной заднего угла α .

На рис. 4.4.2 представлены графики влияния заднего угла α на величину наибольшего эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{ЭКВ max}}$ при трапецидальной (1) и треугольной (2) форме эпюры σ .

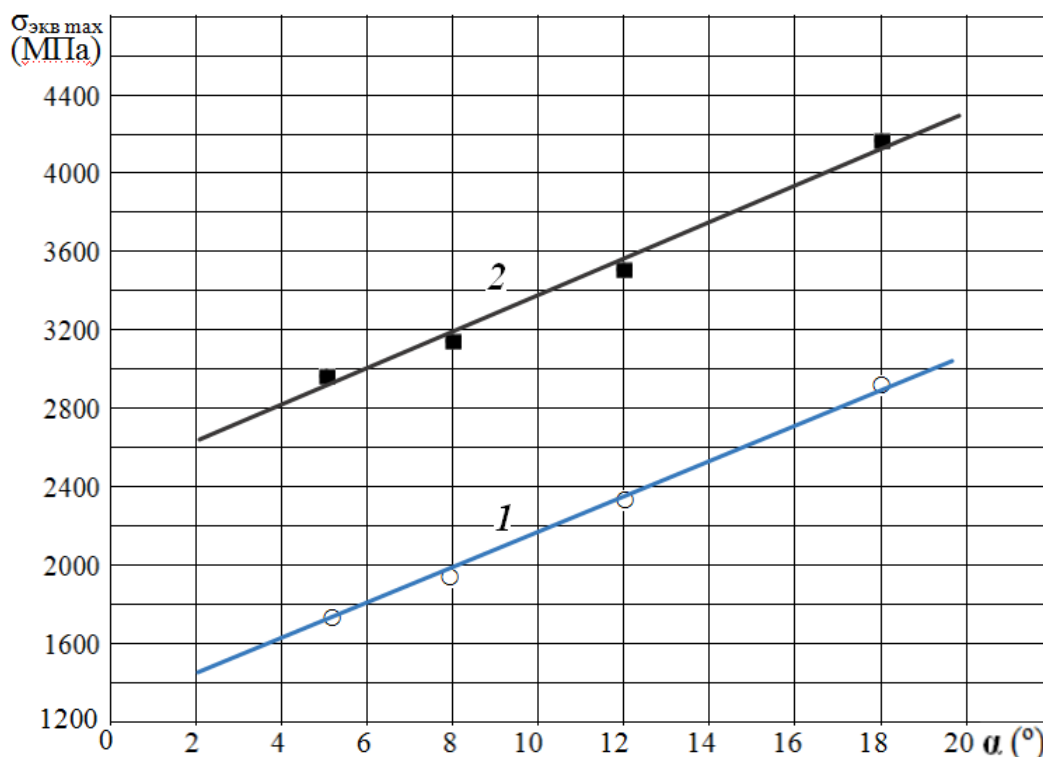


Рис. 4.4.2. Влияние заднего угла α (°) на наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{ЭКВ max}}$ (МПа) в режущем клине при обработке титанового сплава. ВТЗ-1 - ВК8, $v = 60$ м/мин, $\gamma=0^\circ$, $b = 2,3$ мм, $a = 0,41$ мм, $c = 1,1 \times a$. 1 – трапецидальная форма эпюры σ ; 2 – треугольная форма эпюры σ .

Графики идут практически параллельно, но величины $\sigma_{\text{ЭКВ max}}$ при треугольной форме эпюры σ очень большие, что не соответствует

наблюдениям за процессом обработки титановых сплавов: инструмент должен был бы ломаться при использовании заднего угла $\alpha = 18^\circ$, чего не наблюдалось во время экспериментов. График *I* больше соответствует наблюдениям за процессом черновой обработки. Таким образом, ещё раз подтверждается утверждение, что распределение нормальных контактных напряжений имеет трапецидальную форму, а длина контакта стружки $c = 1,1 \times a$.

Табл. 4.4.1. — Наибольшие напряжения и деформация при обработке титанового сплава. ВТЗ-1 - ВК8, $v = 60$ м/мин, $\gamma=0^\circ$, $b = 2,3$ мм, $a = 0,41$, $c = 1,1 \cdot a$, треугольная форма эпюры σ

Название параметра	$\alpha=5^\circ$	$\alpha=8^\circ$	$\alpha=12^\circ$	$\alpha=18^\circ$
1 - наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экр max}}$ (МПа)	2935,9	3169,3	3527,2	4188,5
2 - наибольшее нормальное напряжение по оси OY $\sigma_y \text{ max}$ (МПа)	1159,8	1311,6	1574,3	2061,7
3 - наибольшее нормальное напряжение по оси OZ $\sigma_z \text{ max}$ (МПа)	23,569	27,531	34,478	49,389
4 - наибольшая деформация ϵ_{max} (мм)	0,0096791	0,011017	0,013179	0,017508
5 - наибольшее касательное напряжение в плоскости YOZ $\tau_{yz \text{ max}}$ (МПа)	113,07	110,64	111,5	151,93
6 - наибольшее касательное напряжение в плоскости XOZ $\tau_{xz \text{ max}}$ (МПа)	162,26	190,4	233,77	316,83

Увеличение заднего угла α с 5° до 18° приводит к увеличению наибольшего эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экр max}}$ в 1,5 раза (см. рис. 4.4.2). Однако использование режущих инструментов с задним углом менее 8° приводит к более интенсивному увеличению фаски износа по задней поверхности, поэтому оптимальный задний угол при обработке титанового сплава рекомендуется 8° .

4.5. Исследование влияния количества участков на наибольшие эквивалентные напряжения

Для оценки степени влияния количества участков, на которые разделяется длина контакта стружки с передней поверхностью для задания внешней наружки, были рассчитано НДС режущего клина с одинаковой нагрузкой на передней поверхности, но с разным количеством участков, которые выделяются на длине контакта стружки (таблица 4.5.1, а-в).

Таблица 4.5.1, а – Величины средних контактных напряжений на рассматриваемых участках при расчёте НДС резца с шириной $b=2,3$ мм. ВТЗ-1—ВК8, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=8^\circ$, $a=0,41$ мм, $c=1,1 \times a$, трапецидальная форма эпюры σ , 9 участков выделяются на длине контакта стружки

№ участка от режущей кромки	Диапазон участка L_{pi} , мм	σ_{cpi} , МПа	τ_{cpi} , МПа
1	0-0,05	1523,4	57,6
2	0,05-0,1	1510,4	57,6
3	0,1-0,15	1497,3	57,6
4	0,15-0,20	1484,3	57,6
5	0,20-0,25	1471,2	57,6
6	0,25-0,30	1458,2	57,6
7	0,30-0,35	1445,1	57,6
8	0,35-0,40	1432	57,6
9	0,40-0,451	884,9	57,6

Таблица 4.5.1, б – Величины средних контактных напряжений на рассматриваемых участках при расчёте НДС резца с шириной $b=2,3$ мм. ВТЗ-1—ВК8, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=8^\circ$, $a=0,41$ мм, $c=1,1 \times a$, трапецидальная форма эпюры σ , 9 участков выделяются на длине контакта стружки

№ участка от режущей кромки	Диапазон участка L_{pi} , мм	σ_{cpi} , МПа	τ_{cpi} , МПа
1	0-0,1	1516,9	57,6
2	0,1-0,2	1490,2	57,6
3	0,2-0,3	1464,7	57,6
4	0,3-0,4	1438,6	57,6
5	0,4-0,451	884,9	57,6

Таблица 4.5.1, *в* – Величины средних контактных напряжений на рассматриваемых участках при расчёте НДС резца с шириной $b=2,3$ мм.

BT3-1—BK8, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=8^\circ$, $a = 0,41$ мм, $c = 1,1 \times a$, трапециевидальная форма эпюры σ , 30 участков выделяются на длине контакта стружки

№ участка от режущей кромки	Диапазон участка L_{pi} , мм	$\sigma_{срi}$, МПа	$\tau_{срi}$, МПа
1	0-0,015	1528	57,6
2	0,015-0,03	1524,1	57,6
3	0,03-0,045	1520,2	57,6
4	0,045-0,06	1516,3	57,6
5	0,06-0,075	1512,4	57,6
6	0,075-0,09	1508,5	57,6
7	0,09-0,105	1504,5	57,6
8	0,105-0,12	1500,6	57,6
9	0,12-0,135	1496,7	57,6
10	0,135-0,15	1492,8	57,6
11	0,15-0,165	1488,9	57,6
12	0,165-0,18	1484,9	57,6
13	0,18-0,195	1481	57,6
14	0,195-0,21	1477,1	57,6
15	0,21-0,225	1473,2	57,6
16	0,225-0,24	1469,3	57,6
17	0,24-0,255	1465,4	57,6
18	0,255-0,27	1461,4	57,6
19	0,27-0,285	1457,5	57,6
20	0,285-0,30	1453,6	57,6
21	0,30-0,315	1449,7	57,6
22	0,315-0,33	1445,8	57,6
23	0,33-0,345	1441,8	57,6
24	0,345-0,36	1437,9	57,6
25	0,36-0,375	1434	57,6
26	0,375-0,39	1430	57,6
27	0,39-0,405	1426,2	57,6
28	0,405-0,41	1423,6	57,6
29	0,41-0,435	989,1	57,6
30	0,435-0,451	277,6	57,6

Таблица 4.5.2 – Наибольшие напряжения и деформация при различном количестве участков, которые выделяются на длине контакта стружки, при обработке титанового сплава ВТ3-1 неизношенным резцом. ВТ3-1-ВК8, $v = 60$ м/мин, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=8^\circ$, $b = 2,3$ мм, **трапецидальный** характер эпюры σ на передней поверхности, $a = 0,41$, $c = 1,1 \times a$.

№ п/п	Название параметра	Количество участков		
		5	9	30
1	Наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$ (МПа)	1948,4	1960	1966,9
2	Наибольшие нормальные напряжения по оси OY $\sigma_y \text{ max}$ (МПа)	1117,1	1115,9	1140,4
3	Наибольшие нормальные напряжения по оси OZ $\sigma_z \text{ max}$ (МПа)	61,962	54,959	26,028
4	Наибольшие общая деформация ϵ_{max} (мм)	0,0096453	0,0096504	0,0096418
5	Наибольшие касательные напряжения в плоскости YOZ $\tau_{yz \text{ max}}$ (МПа)	110,64	111,36	113,28
6	Наибольшие касательные напряжения в плоскости XOZ $\tau_{xz \text{ max}}$ (МПа)	189,58	189,63	188,41

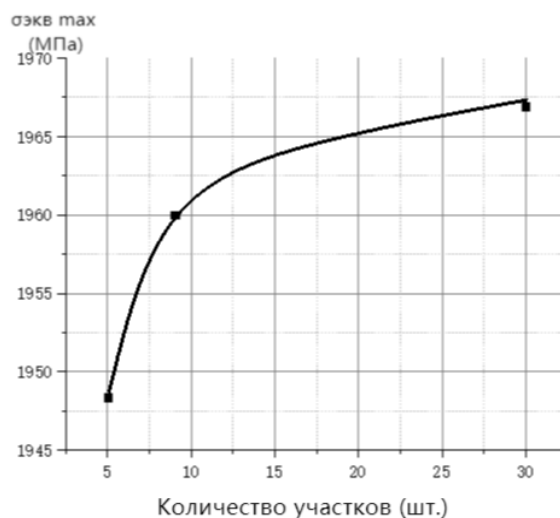


Рис. 4.5.1. Влияния количества участков, на которые делится длина контакта стружки с передней поверхностью, на наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$ при **трапецидальном** характере эпюры σ на передней поверхности при обработке титанового сплава ВТ3-1 неизношенным резцом. ВТ3-1 - ВК8, $v = 60$ м/мин, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=8^\circ$, $b = 2,3$ мм, $a = 0,41$ мм, $c = 1,1 \times a$.

На рис. 4.5.1 представлен график влияния количества участков, на которые делится длина контакта стружки с передней поверхностью, на наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$. На первый взгляд с увеличением количества участков $\sigma_{\text{экв max}}$ существенно увеличивается, но если рассчитать коэффициент увеличения $\sigma_{\text{экв max}}$ при увеличении количества участков с 5 до 30 шт., то он приближается к 1 из-за большой величины $\sigma_{\text{экв max}}$.

Коэффициент увеличения $\sigma_{\text{экв max}}$ при наибольшем количестве участков при $a = 0,41$ мм: $K_{\sigma_{\text{экв max}}} = \sigma_{\text{экв max при 30 уч}} / \sigma_{\text{экв max при 5 уч}} = 1966,9 / 1948,4 = 1,0095$.

Вывод: можно не увеличивать количество участков на длине контакта (на примере передней поверхности) более 5 шт. Но лучше принимать длину каждого участка $l_{\text{уч-ка опт}} = 0,1$ мм: при небольшой длине контакта стружки с передней поверхностью при обработке титанового сплава (даже при наибольшей применяемой подаче 0,41 мм/об длина контакта $c = 0,451$ мм) это всего 5 участков. При большой длине искусственной фаски износа по задней поверхности может быть использована длина участка $l_{\text{уч-ка опт}} = 0,2-0,3$ мм на тех участках эпюр контактных напряжений, где их изменения не очень интенсивные.

4.6. Исследование НДС изношенного режущего клина

4.6.1. Нагрузка на режущий клин со стороны фаски износа по задней поверхности инструмента

При прямоугольном свободном точении диска с радиальной подачей резца, который считался не изношенным, были измерены технологические составляющие силы резания. Методом экстраполяции на нулевую толщину среза были определены силы на задней поверхности: при ширине среза $b = 2,3$ мм нормальная $N_h = P_y$ при $a=0 = 420$ Н и касательная $F_h = P_z$ при $a=0 = 35,4$ Н (см. рис. 3.1.1).

Для предотвращения выкрашивания режущей кромки при переточке резца по задней поверхности оставалась очень маленькая фаска длиной $h_f = 0,054$ мм. Были определены удельные контактные нагрузки на этой фаске q_{Nh} и q_{Fh} , которые из-за небольшого размера длины фаски можно принять за нормальные σ_h и касательные τ_h контактные напряжения на этом участке искусственной фаски износа: $q_{Nh} = N_h / (h_f \times b) = 420 / (0,054 \times 2,3) = 3381$ Н/мм² = 3381 МПа;

$$q_{Fh} = F_h / (h_f \times b) = 35,4 / (0,054 \times 2,3) = 285$$
 Н/мм² = 285 МПа.

Методами разрезного резца и изменения длины фаски износа по задней поверхности были определены эпюры контактных напряжений на искусственной фаске износа по задней поверхности (см. рис. 4.6.1).

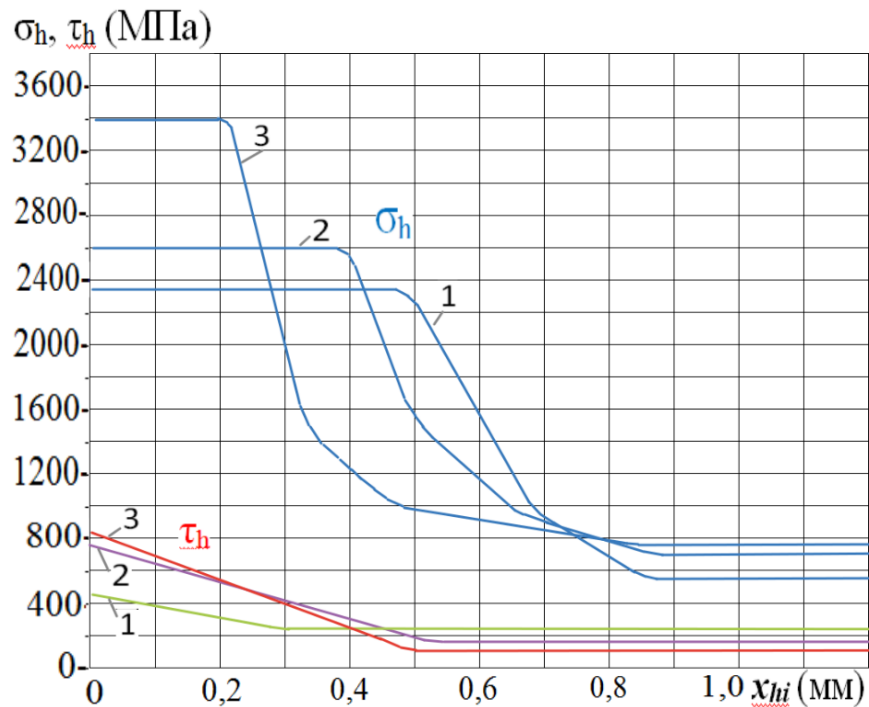


Рис. 4.6.1. Распределение нормальных σ_h и касательных τ_h контактных напряжений (МПа) на искусственной фаске износа по задней поверхности резца при обработке титанового сплава ВТ3-1. 1 – $a = 0,11$ мм; 2 – $a = 0,21$ мм; 3 – $a = 0,41$ мм. ВТ3-1 - ВК8, $v = 60$ м/мин, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=8^\circ$, $b = 2,3$ мм, Абсцисса – расстояние от режущей кромки на фаске задней поверхности x_{hi} (мм).

Полученные величины в целом сопоставимы с результатами исследования распределения контактных напряжений на участке искусственной фаске износа по задней поверхности у режущей кромки: $q_{Nh} = 3381$ МПа $\approx \sigma_h = 3400-2380$ МПа; $q_{Fh} = 285$ МПа $\approx \tau_h = 900-420$ МПа.

4.6.2. Расчёт средних нормальных и касательных контактных напряжений на фаске износа по задней поверхности на её различных участках

По эпюрам нормальных и касательных контактных напряжений на фаске износа по задней поверхности (рис. 4.6.1) определяем средние нормальные $\sigma_{h\text{cp}i}$ и касательные $\tau_{h\text{cp}i}$ контактные напряжения на фаске задней поверхности на её различных участках и записываем в табл. 4.6.2 -4.6.4.

Средние контактные напряжения на фаске задней поверхности на её различных участках могут быть рассчитаны и по графикам влияния длины фаски по задней поверхности на силы на фаске. Например, при $a = 0,41$ мм: $N_h=1564$ Н на фаске $h_f=0,2$ мм, тогда $\sigma_{h\text{cp}} = N_h/(b \cdot h_f) = 1564/(2,3 \cdot 0,2) = 3400$ Н; $F_h=183,08$ Н на фаске $h_f=0,1$ мм, тогда $\tau_{h\text{cp}} = F_h/(b \cdot h_f) = 183,08/(2,3 \cdot 0,1) = 796$ Н/мм².

Таблица 4.6.2. – Величины средних контактных напряжений на рассматриваемых участках **фаски износа** по задней поверхности у резца шириной $b=2,3$ мм. ВТЗ-1 - ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $a = 0,41$ мм

№ участка от режущей кромки	Диапазон участка L_{hi} , мм	$\sigma_{h\text{cp}i}$, МПа	$\tau_{h\text{cp}i}$, МПа
1	0-0,1	3400	796
2	0,1-0,2	3400	600
3	0,2-0,3	2600	500
4	0,3-0,4	1400	300
5	0,4-0,5	1100	200
6	0,5-0,6	950	100
7	0,6-0,7	900	100
8	0,7-0,8	800	100
9	0,8-0,9	760	100
10	0,9-1,0	683	100
11	1,0-1,1	683	100
12	1,1-1,2	683	100

Таблица 4.6.3. – Величины средних контактных напряжений на рассматриваемых участках **фаски износа** по задней поверхности у резца шириной $b=2,3$ мм. ВТЗ-1—ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $a = 0,21$ мм

№ участка от режущей кромки	Диапазон участка $L_{h i}$, мм	$\sigma_{h cp i}$, МПа	$\tau_{h cp i}$, МПа
1	0-0,1	2600	687
2	0,1-0,2	2600	596
3	0,2-0,3	2600	500
4	0,3-0,4	2600	339
5	0,4-0,5	2000	226
6	0,5-0,6	1250	191
7	0,6-0,7	1000	191
8	0,7-0,8	800	191
9	0,8-0,9	750	191
10	0,9-1,0	750	191
11	1,0-1,1	750	191
12	1,1-1,2	750	191

Таблица 4.6.4. – Величины средних контактных напряжений на рассматриваемых участках **фаски износа** по задней поверхности у резца шириной $b=2,3$ мм. ВТЗ-1 - ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $a = 0,11$ мм

№ участка от режущей кромки	Диапазон участка $L_{h i}$, мм	$\sigma_{h cp i}$, МПа	$\tau_{h cp i}$, МПа
1	0-0,1	2200	422
2	0,1-0,2	2200	374
3	0,2-0,3	2200	300
4	0,3-0,4	2200	278
5	0,4-0,5	2200	278
6	0,5-0,6	1700	278
7	0,6-0,7	1261	278
8	0,7-0,8	835	278
9	0,8-0,9	552	278
10	0,9-1,0	508	278
11	1,0-1,1	508	278
12	1,1-1,2	508	278

На передней поверхности в качестве внешней нагрузки прилагаем эпюры σ и τ при **трапецидальном** характере эпюры σ на передней поверхности при $c=1,1 \cdot a$ при соответствующей толщине среза a (см. табл. 4.1.4, a ; 4.1.8 и 4.1.12, a).

На фаске задней поверхности в качестве внешней нагрузки прилагаем эпюры σ_h и τ_h , средние нормальные $\sigma_{h\text{cp}}$ и касательные $\tau_{h\text{cp}}$ контактные напряжения на фаске задней поверхности на её различных участках при соответствующей толщине среза a (см. табл. 4.6.2; 4.6.3; 4.6.4) и рассчитываем НДС режущего клина для разной степени износа, т.е. при разной длине фаски износа.

4.6.3. Расчёт НДС изношенного режущего клина

Расчёт НДС выполнялся с использованием программы ANSYS. Некоторые картины НДС представлены на рис. 4.6.2 – 4.6.4, результаты расчёта обобщены в табл. 4.6.5.

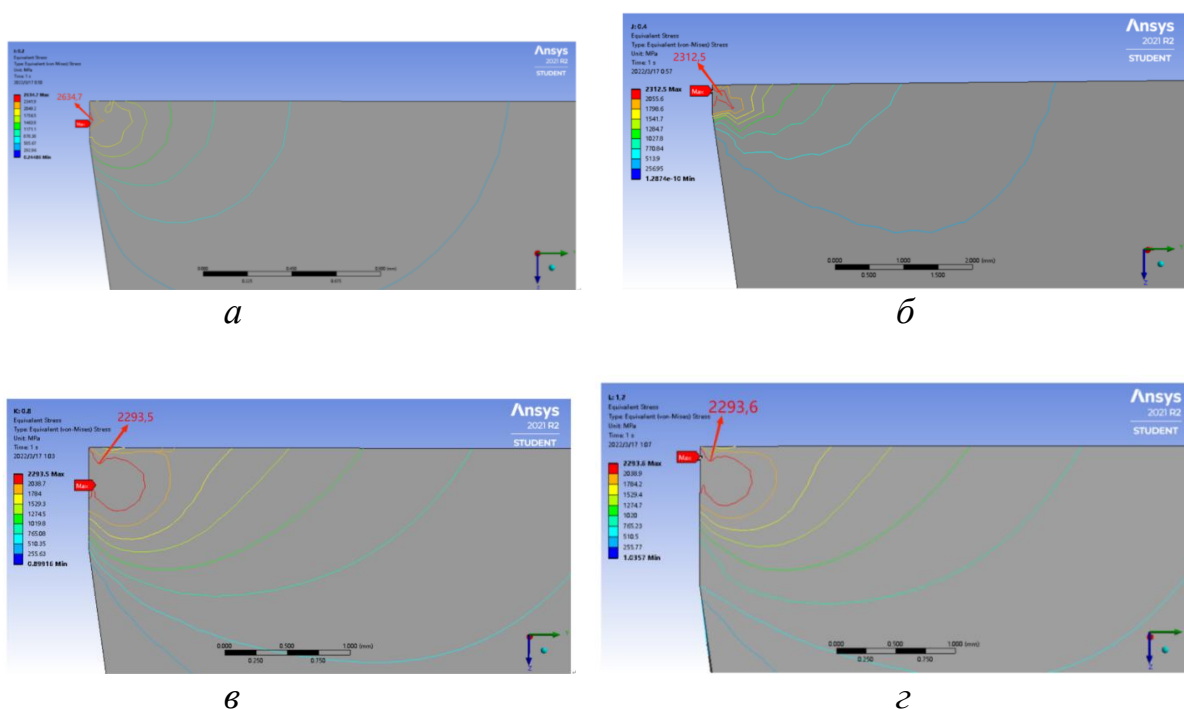
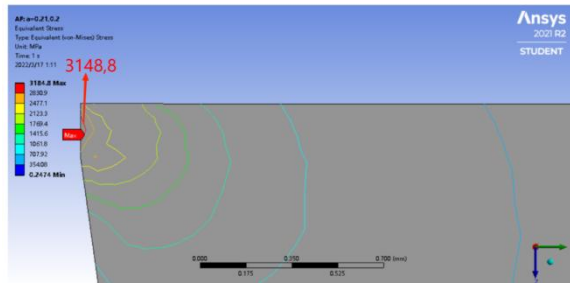
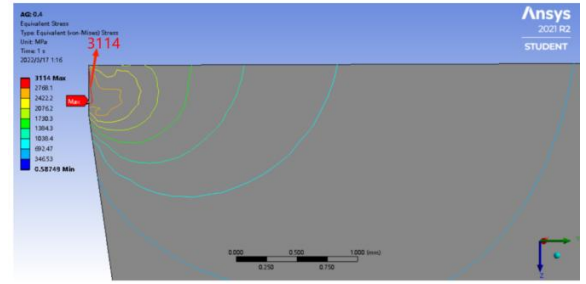


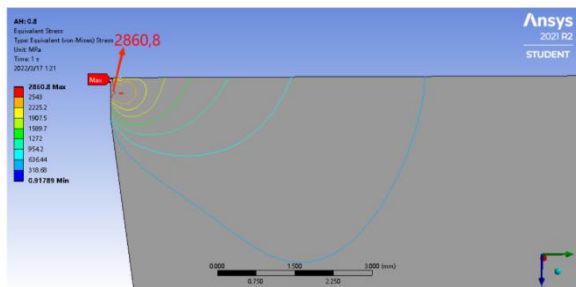
Рис. 4.6.2. Распределение эквивалентных напряжений в изношенном режущем клине с различной длиной фаски износа по задней поверхности h_f при прямоугольном резании диска. ВТЗ-1—ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $a = 0,11$ мм, $b = 2,3$ мм, трапецидальный характер эпюры σ на передней поверхности. а) $h_f = 0,2$ мм; б) $h_f = 0,4$ мм; в) $h_f = 0,8$ мм; г) $h_f = 1,2$ мм.



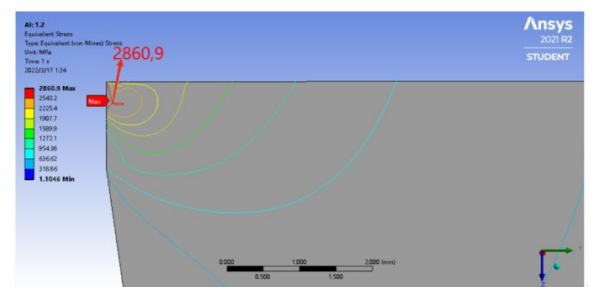
a



б

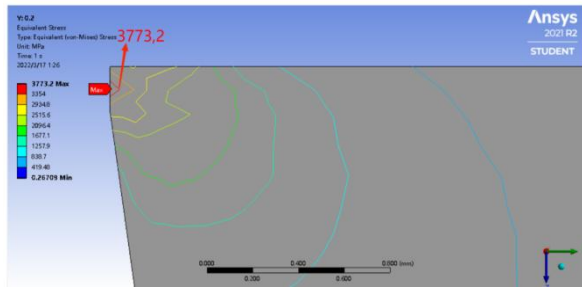


в

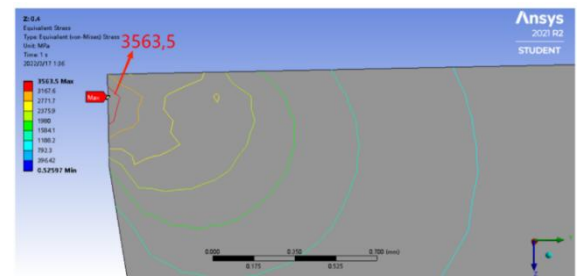


г

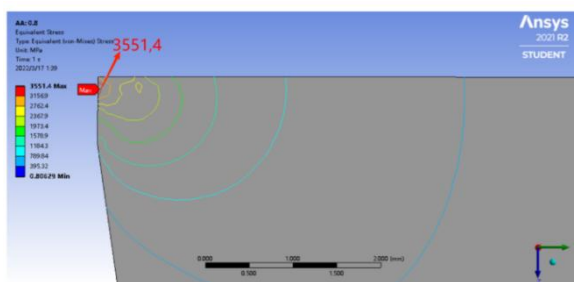
Рис. 4.6.3. Распределение эквивалентных напряжений в изношенном режущем клине с различной длиной фаски износа по задней поверхности h_f при прямоугольном резании диска. ВТЗ-1—ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $a = 0,21$ мм, $b = 2,3$ мм, трапецидальный характер эпюры σ на передней поверхности. а) $h_f = 0,2$ мм; б) $h_f = 0,4$ мм; в) $h_f = 0,8$ мм; г) $h_f = 1,2$ мм.



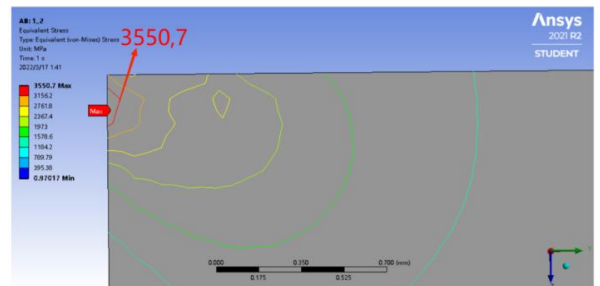
a



б



в



г

Рис. 4.6.4. Распределение эквивалентных напряжений в изношенном режущем клине с различной длиной фаски износа по задней поверхности h_f при прямоугольном резании диска. ВТЗ-1—ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $a = 0,41$ мм, $b = 2,3$ мм, трапецидальный характер эпюры σ на передней поверхности. *a*) $h_f = 0,2$ мм; *б*) $h_f = 0,4$ мм; *в*) $h_f = 0,8$ мм; *г*) $h_f = 1,2$ мм.

Табл. 4.6.5 — Наибольшие напряжения и деформации в изношенном по задней поверхности режущем клине при обработке титанового сплава при **трапецеидальной** форме эпюры σ на передней поверхности и длине контакта стружки на передней поверхности $c = 1,1 \times a$. ВТЗ-1—ВК8, $v = 60$ м/мин, $\gamma = 0^\circ$, $b = 2,3$ мм, $a = 0,41$ мм, $\alpha = 8^\circ$.

№ п/п	Название параметра	Символ параметра	Длина фаски износа по задней поверхности h_f				
			0 мм	0,2 мм	0,4 мм	0,8 мм	1,2 мм
1	Наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$ (МПа)	$\sigma_{\text{экв max}}$	1948,4	3773,2	3563,5	3551,4	3550,7
2	Наибольшее нормальное напряжение по оси OY $\sigma_y \text{ max}$ (МПа)	$\sigma_y \text{ max}$	1117,1	156,92	105,8	210,43	295,89
3	Наибольшее нормальное напряжение по оси OZ $\sigma_z \text{ max}$ (МПа)	$\sigma_z \text{ max}$	61,962	68,685	280,87	590,53	851,04
4	Наибольшая общая деформация ε_{max} (мм)	$\varepsilon_{\text{общ max}}$	0,0096453	0,0067936	0,009041	0,011111	0,012291
5	Наибольшее касательное напряжение в плоскости YOZ $\tau_{yz \text{ max}}$ (МПа)	$\tau_{yz \text{ max}}$	110,64	144,84	125,75	118,18	116,99
6	Наибольшее касательное напряжение в плоскости XOZ $\tau_{xz \text{ max}}$ (МПа)	$\tau_{xz \text{ max}}$	189,58	232,51	274,72	207,81	200,22

Табл. 4.6.6 — Наибольшие напряжения и деформации в изношенном по задней поверхности режущем клине при обработке титанового сплава при **трапецидальной** форме эпюры σ на передней поверхности и длине контакта стружки на передней поверхности $c = 1,1 \times a$. ВТЗ-1—ВК8, $v = 60$ м/мин, $\gamma=0^\circ$, $b = 2,3$ мм, $a = 0,21$ мм, $\alpha=8^\circ$.

№ п/п	Название параметра	Символ параметра	Длина фаски износа по задней поверхности h_f				
			0 мм	0,2 мм	0,4 мм	0,8 мм	1,2 мм
1	Наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$ (МПа)	$\sigma_{\text{экв max}}$	1811,4	3184,8	3144	2860,8	2860,9
2	Наибольшее нормальное напряжение по оси OY $\sigma_y \text{ max}$ (МПа)	$\sigma_y \text{ max}$	901,56	90,162	204,43	363,71	429,63
3	Наибольшее нормальное напряжение по оси OZ $\sigma_z \text{ max}$ (МПа)	$\sigma_z \text{ max}$	72,43	119,28	585,92	1052,2	1267,7
4	Наибольшая общая деформация ε_{max} (мм)	$\varepsilon_{\text{общ max}}$	0,005634	0,0050592	0,0090208	0,01229	0,013428
5	Наибольшее касательное напряжение в плоскости YOZ $\tau_{yz \text{ max}}$ (МПа)	$\tau_{yz \text{ max}}$	54,797	47,919	59,362	106,59	130,13
6	Наибольшее касательное напряжение в плоскости XOZ $\tau_{xz \text{ max}}$ (МПа)	$\tau_{xz \text{ max}}$	91,271	211,14	275,36	251,9	297,17

Табл. 4.6.7 — Наибольшие напряжения и деформации в изношенном по задней поверхности режущем клине при обработке титанового сплава при **трапецидальной** форме эпюры σ на передней поверхности и длине контакта стружки на передней поверхности $c = 1,1 \times a$. ВТЗ-1—ВК8, $v = 60$ м/мин, $\gamma = 0^\circ$, $b = 2,3$ мм, $a = 0,11$ мм, $\alpha = 8^\circ$.

№ п/п	Название параметра	Символ параметра	Длина фаски износа по задней поверхности h_f				
			0 мм	0,2 мм	0,4 мм	0,8 мм	1,2 мм
1	Наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$ (МПа)	$\sigma_{\text{экв max}}$	1760,1	2634,7	2312,5	2293,5	2293,6
2	Наибольшие нормальные напряжения по оси OY $\sigma_y \text{ max}$ (МПа)	$\sigma_y \text{ max}$	940,82	80,589	387,31	409,81	428,22
3	Наибольшие нормальные напряжения по оси OZ $\sigma_z \text{ max}$ (МПа)	$\sigma_z \text{ max}$	76,966	228,62	753,67	1205,1	1266,3
4	Наибольшие общая деформация ε_{max} (мм)	$\varepsilon_{\text{общ max}}$	0,003491	0,0045799	0,0085634	0,0124	0,012737
5	Наибольшие касательные напряжения в плоскости YOZ $\tau_{yz \text{ max}}$ (МПа)	$\tau_{yz \text{ max}}$	62,866	62,574	230,28	123,36	129,93
6	Наибольшие касательные напряжения в плоскости XOZ $\tau_{xz \text{ max}}$ (МПа)	$\tau_{xz \text{ max}}$	48,472	199,34	224,01	286,74	297,9

На рис. 4.6.5 представлены графики влияния длины фаски износа по задней поверхности на величину наибольшего эквивалентного напряжения.

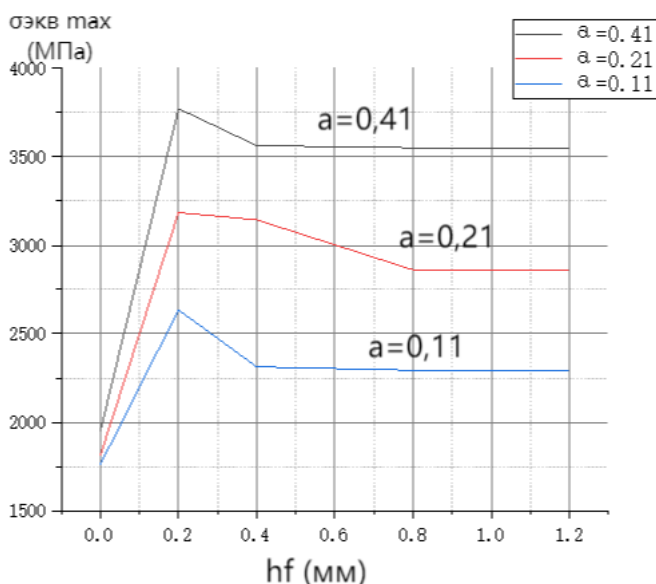


Рис.4.6.5. Влияние длины фаски износа по задней поверхности h_f (мм) на величину наибольшего эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экв max}}$ (МПа) при различной толщине среза a (мм) при обработке титанового сплава. ВТЗ-1 - ВК8, $v = 60$ м/мин, $\gamma=0^\circ$, $b = 2,3$ мм, трапецидальный характер эпюры σ на передней поверхности и длина контакта стружки $c = 1,1 \times a$.

Для оценки влияния длины фаски износа по задней поверхности на величину наибольшего эквивалентного напряжения были рассчитаны коэффициенты увеличения $\sigma_{\text{экв max}}$ при длине фаски износа $h_f = 0,2$ мм по сравнению с неизношенным резцом, а также при $h_f = 0,2$ мм по сравнению с сильно изношенным резцом ($h_f = 1,2$ мм) при обработке с разной толщиной среза a :

а) при $a = 0,11$ мм:

$$K_{\sigma_{\text{экв max}} h=0,2} = \sigma_{\text{экв max}} h=0,2 / \sigma_{\text{экв max}} h=0 = 2634,7 / 1760,1 = 1,50;$$

$$K_{\sigma_{\text{ЭКВ max } h=1,2}} = \sigma_{\text{ЭКВ max } h=1,2} / \sigma_{\text{ЭКВ max } h=0,2} = 2634,7 / 2293,6 = 1,15.$$

б) при $a = 0,21$ мм:

$$K_{\sigma_{\text{ЭКВ max}}} = \sigma_{\text{ЭКВ max } h=0,2} / \sigma_{\text{ЭКВ max } h=0} = 3184,8 / 1811,4 = 1,76;$$

$$K_{\sigma_{\text{ЭКВ max } h=1,2}} = \sigma_{\text{ЭКВ max } h=1,2} / \sigma_{\text{ЭКВ max } h=0,2} = 3184,8 / 2860,9 = 1,11.$$

в) при $a = 0,41$ мм:

$$K_{\sigma_{\text{ЭКВ max}}} = \sigma_{\text{ЭКВ max } h=0,2} / \sigma_{\text{ЭКВ max } h=0} = 3773,2 / 1948,4 = 1,94 \approx 2;$$

$$K_{\sigma_{\text{ЭКВ max } h=1,2}} = \sigma_{\text{ЭКВ max } h=1,2} / \sigma_{\text{ЭКВ max } h=0,2} = 3773,2 / 3550,7 = 1,063.$$

Анализ полученных результатов показывает, что при появлении фаски на задней поверхности фаски длиной 0,2 мм наибольшие эквивалентные напряжения в режущем клине существенно увеличиваются в 1,5 – 2 раза, и чем больше подача (толщина среза), тем больше увеличение.

Однако дальнейшее увеличение длины фаски даже до очень большой величины 1,2 мм не приводит к увеличению наибольшего эквивалентного напряжения в режущем клине (в 1,063 – 1,15 раза), причём с увеличением толщины среза менее значимо. Это объясняется нами более существенным уменьшением нормальных контактных напряжений на фаске при отдалении от режущей кромки (см. рис. 4.61) и одновременно с этим увеличением поперечного сечения режущего клина за счёт увеличения длины фаски.

Это объясняет работоспособность режущего инструмента даже при очень большом его износе по задней поверхности, что наблюдается на практике при обработке титановых сплавов. Т.е. инструмент сначала интенсивно изнашивается с большой вероятностью его скола и выкрашивания, а по достижению $h_f \approx 0,2-0,5$ мм интенсивность изнашивания уменьшается, как и

вероятность скола режущей твердосплавной пластины [1, 2, 3, 4].

Уменьшение вероятности скола при этом уменьшается также из-за увеличения его температуры, что приводит к уменьшению хрупкости твёрдого сплава и явлению «самозалечивания» микротрещин режущей твердосплавной пластины из-за повышения пластичности кобальтовой связки.

В то же время увеличивается вероятности пластического деформирования режущего клина [1, 2, 3, 4] из-за большой величины нормального контактного напряжения на фаске у режущей кромки $\sigma_n = 2400 \dots 3400$ МПа (см. рис. 4.61).

5. Исследование НДС СМП

Для исследования НДС сменных многогранных пластин (СМП), широко используемых в промышленности, необходимо создать их 3D модель. Наиболее часто для черновой обработки используются квадратные СМП, поэтому было решено в первую очередь исследовать их НДС. Для создания 3D модели использовалось программное обеспечение Компас 2022 (рис. 5.1). Основные геометрические параметры квадратной СМП приведены ниже:

- 1) Ширина СМП $W = 12,8$ мм;
- 2) Длина СМП $L = 12,8$ мм;
- 3) Высота СМП $h = 5,56$ мм;
- 4) Главный угол в плане $\varphi = 45^\circ$;
- 5) Вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 45^\circ$, но для исследования влияния вспомогательного угла в плане на НДС создавались 3D модели с $\varphi_1 = 10$ и 20° , но это уже не были квадратные СМП;
- 6) Главный передний угол: $\gamma = 0^\circ$;
- 7) Главный задний угол: $\alpha = 8^\circ$;
- 8) Радиус при вершине $r = 0,1, 0,8$ и 2 мм.

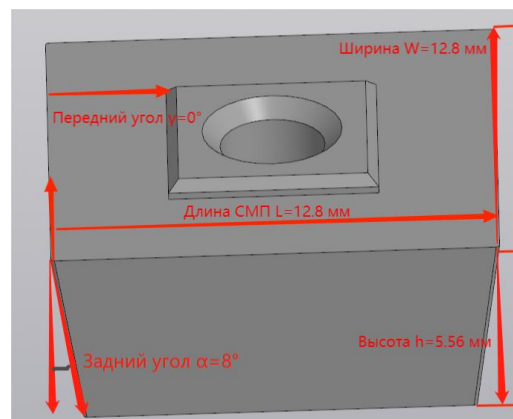


Рис. 5.1. 3D модель квадратной СМП: $\varphi=45^\circ$, $\varphi_1=45^\circ$, $\gamma=0^\circ$, $r=0,1$ мм, $\alpha=8^\circ$.

Предполагалось рассчитать НДС не только неизношенной СМП, но и при наличии искусственной фаски износа по задней поверхности $h_f = 0; 0,2; 0,4; 0,8$ и $1,2$ мм с главным задним углом на фаске $\alpha_h = 0^\circ$. Однако ограниченное время обучения в магистратуре не позволило полностью реализовать эти планы. На основании сравнения НДС СМП с полученными результатами расчёта НДС простого режущего клина при отсутствии износа можно с определённой уверенностью сказать, что износ СМП окажет аналогичное влияние и на её НДС при износе, что уже было исследовано на примере простого режущего

клина.

При расчете НДС использовались данные, измеренные при продольной подаче $s = 0,11, 0,21, 0,41$ мм/об и при износе по главной задней поверхности.

Для уменьшения объёма вычислений программы ANSYS использовались 3D модели вырезок из СМП (рис. 5.2).

Использование вырезок позволяет уменьшить размеры сетки конечных элементов, что увеличивает разрешающую способность и достоверность полученных результатов расчёта НДС.

Использование мелкой сетки на полной 3D модели СМП существенно увеличивает объём расчётов и вероятность сбоя программы при ограниченной мощности операционной системы компьютера.

Для определения минимального размера вырезки предварительно рассчитывается НДС полной модели при наихудших условиях: наибольшая подача, наибольшая длина фаски износа и пр. Анализ полученной картины НДС покажет, на каком расстоянии от режущей кромки напряжения и деформации практически отсутствуют или очень малы, т.е. вне зоны вырезки принимается абсолютно жёсткое тело, не оказывающее влияние на результаты расчётов. Так были определены размеры вырезок из СМП (рис. 5.2).

Для задания внешней нагрузки на переднюю поверхность СМП были рассчитаны средние контактные напряжения (табл. 5.1-5.3).

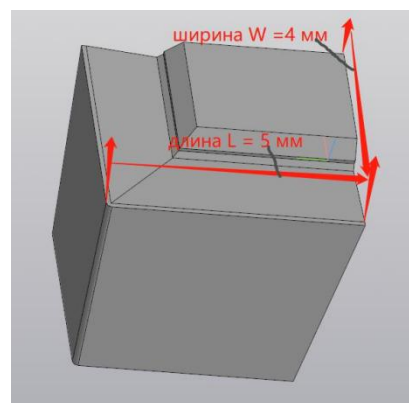


Рис. 5.2. Геометрические параметры вырезки из квадратной СМП шириной $W = 4$ мм при наибольшей длине контакта стружки $c = 0,451$ мм, длиной $L = 5$ мм при ширине среза $b = 2,3$ мм, высотой $h = 5,56$ мм, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 45^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, $r = 0,1$ мм, $\alpha = 8^\circ$.

Таблица 5.1. – Расчёт величины средних контактных напряжений на рассматриваемых участках при расчёте НДС СМП с шириной среза $b=2,3$ мм при **обработке титанового сплава**. ВТЗ-1 — ВК8, $\gamma=0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $a = 0,11$ мм, $c = 1,1 \times a = 0,121$ мм, трапецеидальный характер эпюры σ

№ участка от режущей кромки	Диапазон участка L_i , мм	$\sigma_{cp\ i}$, МПа	$\tau_{cp\ i}$, МПа
1	0-0,02	1381,9	71,8
2	0,02-0,04	1364,2	71,8
3	0,04-0,06	1346,5	71,8
4	0,06-0,08	1328,8	71,8
5	0,08-0,10	1311	71,8
6	0,10-0,121	1293,4	71,8

Таблица 5.2. – Расчёт величины средних контактных напряжений на рассматриваемых участках при расчёте НДС СМП с шириной среза $b=2,3$ мм при **обработке титанового сплава**. ВТЗ-1 — ВК8, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $a = 0,21$ мм, $c = 1,1 \times a = 0,231$ мм, трапецеидальный характер эпюры σ

№ участка от режущей кромки	Диапазон участка L_i , мм	$\sigma_{cp\ i}$, МПа	$\tau_{cp\ i}$, МПа
1	0-0,05	1420,6	75,3
2	0,05-0,10	1396,9	75,3
3	0,10-0,15	1372,8	75,3
4	0,15-0,20	1348,9	75,3
5	0,20-0,231	983,3	75,3

Таблица 5.3. – Расчёт величины средних контактных напряжений на рассматриваемых участках при расчёте НДС СМП с шириной среза $b=2,3$ мм при **обработке титанового сплава**. ВТЗ-1—ВК8, $\gamma=0^\circ$, $\alpha= 8^\circ$, $a = 0,41$ мм, $c = 1,1 \times a = 0,451$ мм, трапецеидальный характер эпюры σ

№ участка от режущей кромки	Координаты участка L_{ni} , мм	Величину $\sigma_{ср\ i}$ МПа	τ_i МПа
1	0-0,1	1516,9	57,6
2	0,1-0,2	1490,2	57,6
3	0,2-0,3	1464,7	57,6
4	0,3-0,4	1438,6	57,6
5	0,4-0,451	884,9	57,6

Были созданы 3D модели СМП с различными радиусами при вершине (см. рис. 5.3) и вырезки из СМП (см. рис. 5.4). Аналогичные 3D модели вырезок из СМП были созданы при различных вспомогательных углах в плане $\varphi_1 = 10$ и 20° , но это уже не были квадратные СМП.

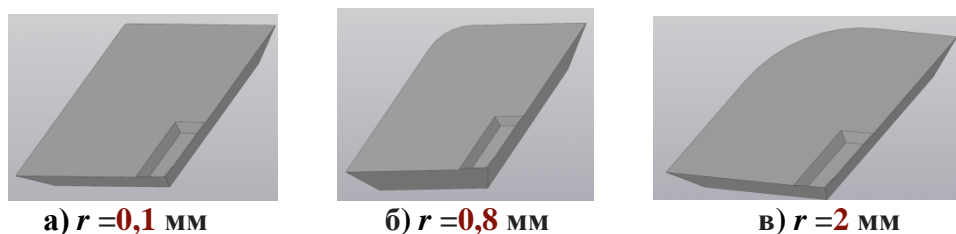


Рис. 5.3 – 3D модель вырезки из СМП при постоянном главном угле в плане $\varphi = 45^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $\varphi_1 = 45^\circ$, радиус при вершине а) $r = 0,1$ мм, б) $r = 0,8$ мм, в) $r = 2$ мм.

Для определения длины контакта по вспомогательной режущей кромке l_1 и радиусному участку при вершине СМП были рассмотрены схемы положения режущих кромок через один оборот заготовки в зависимости от подачи s , вспомогательного угла в плане φ_1 и радиуса при вершине r (см. табл. 5.4 – 5.6).

Таблица 5.4 – Схемы для определения длины контакта l_1 (мм) по вспомогательной режущей кромке при радиусе при вершине $r = 0,1$ мм при различной подаче s и вспомогательного угле в плане φ_1 .

$s, \text{ мм/об}$ \ φ_1°	$\varphi_1 = 10^\circ$	$\varphi_1 = 20^\circ$	$\varphi_1 = 45^\circ$
0,11	0,07	0,06	0,06
0,21	0,15	0,13	0,12
0,41	0,32	0,29	0,26

Таблица 5.5 – Схемы для определения длины контакта l_1 (мм) по вспомогательной режущей кромке при радиусе при вершине $r = 0,8$ мм при различной подаче s и вспомогательном угле в плане φ_1 .

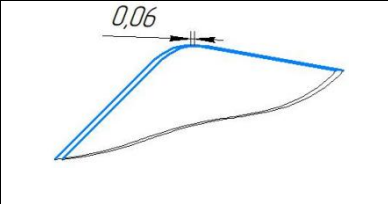
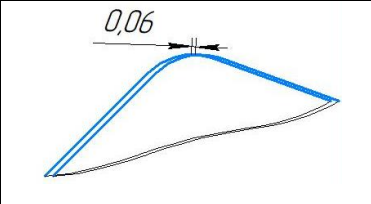
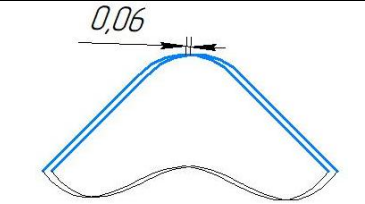
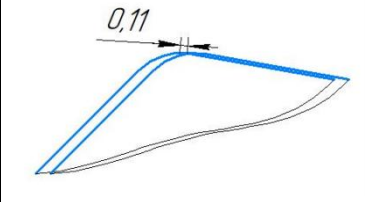
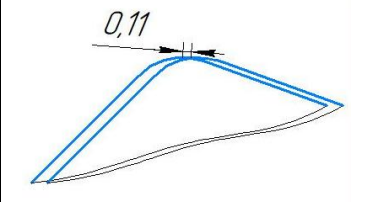
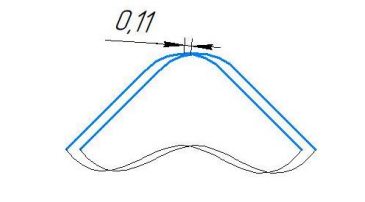
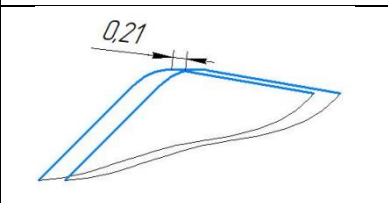
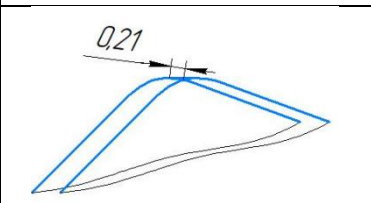
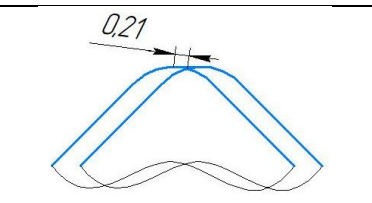
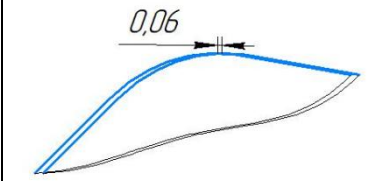
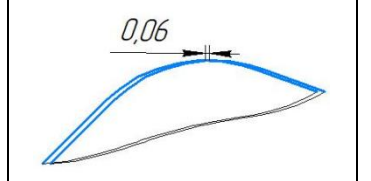
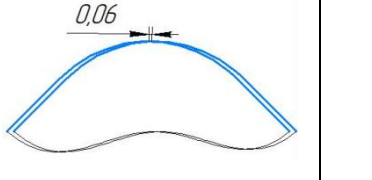
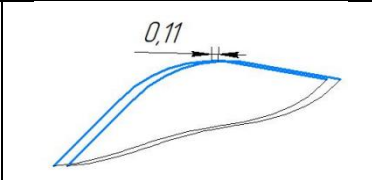
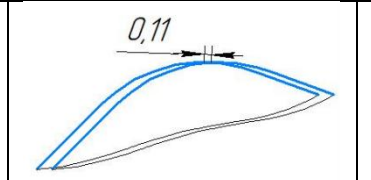
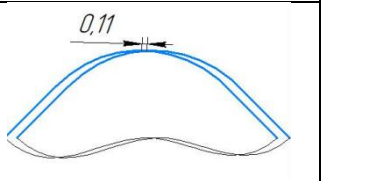
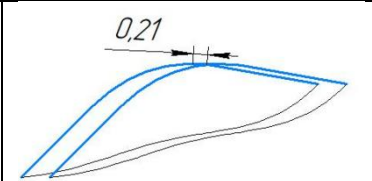
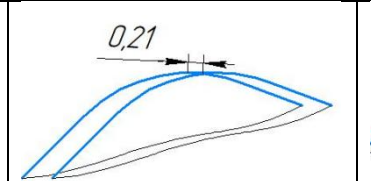
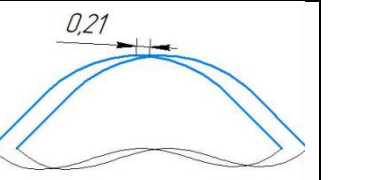
$s, \text{ мм/об}$ \ φ_1°	$\varphi_1 = 10^\circ$	$\varphi_1 = 20^\circ$	$\varphi_1 = 45^\circ$
0,11			
0,21			
0,41			

Таблица 5.6 – Схемы для определения длины контакта l_1 (мм) по вспомогательной режущей кромке при радиусе при вершине $r = 2$ мм при различной подаче s и вспомогательном угле в плане φ_1 .

$s, \text{ мм/об}$ \ φ_1°	$\varphi_1 = 10^\circ$	$\varphi_1 = 20^\circ$	$\varphi_1 = 45^\circ$
0,11			
0,21			
0,41			

Длина контакта l_1 (мм) по вспомогательной режущей кромке приведена в табл. 5.7 при различном радиусе при вершине r , подаче s и вспомогательном угле в плане φ_1 .

Табл. 5.7. – Длина контакта l_1 (мм) по вспомогательной режущей кромке при различном радиусе при вершине r , подаче s и вспомогательном угле в плане φ_1 .

r , мм	s , мм/об	$\varphi_1 = 10^\circ$	$\varphi_1 = 20^\circ$	$\varphi_1 = 45^\circ$
0,1	$s = 0,11$	0,011	0,0154	0,0288
	$s = 0,21$	0,011	0,0154	0,0288
	$s = 0,41$	0,011	0,0154	0,0288
0,8	$s = 0,11$	0,022	0,0638	0,1387
	$s = 0,21$	0,089	0,110	0,1517
	$s = 0,41$	0,157	0,191	0,231
2,0	$s = 0,11$	0,060	0,080	0,196
	$s = 0,21$	0,099	0,1489	0,339
	$s = 0,41$	0,183	0,270	0,540

Перед расчётом НДС необходимо задать свойства материала модели резца (рис. 5.4), задать (приложить) внешние нагрузки (рис. 5.5), задать сетку (рис. 5.6).

В зависимости от длины контакта по вспомогательной режущей кромке к вспомогательной режущей кромке 3D модели СМП прикладывалась нагрузки в процентах от общих составляющих P_z , P_y и P_x силы резания в виде контактных напряжений на передней поверхности у главной режущей

	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		

Рис. 5.4. Свойства сплава BK8 при задании инструментального материала в ANSYS

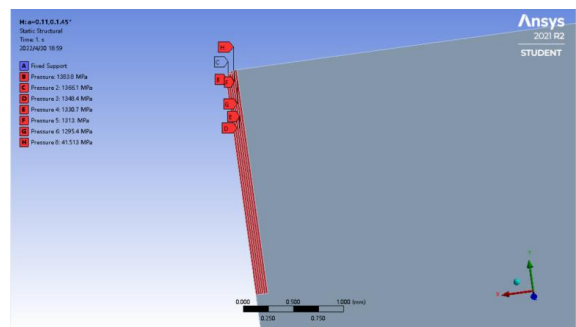


Рис. 5.5. Приложение внешних нагрузок на режущую кромку σ и τ , и у вспомогательной режущей кромки σ_1 и τ_1 (рис. 5.5). На рис. 5.8

представлены картины распределения эквивалентных напряжений в вырезках СМП при разных условиях течения титанового сплава ВТЗ-1.

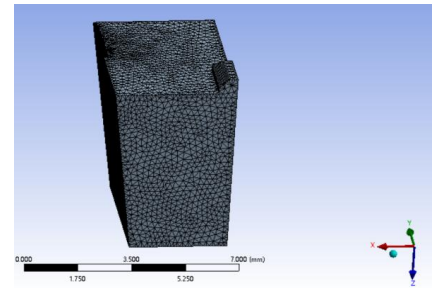
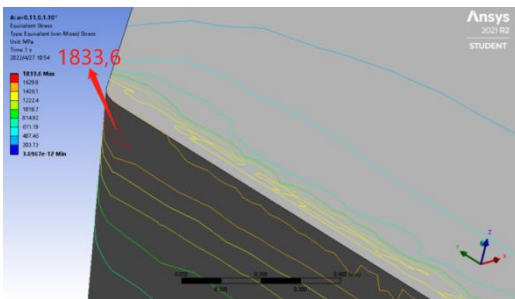
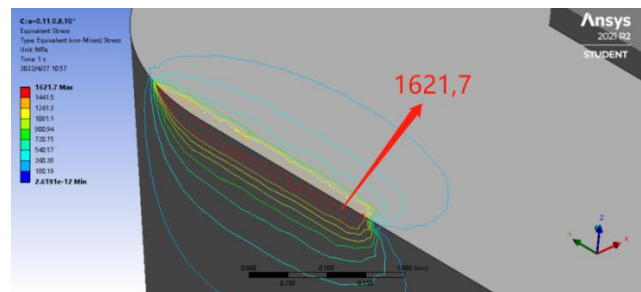


Рис. 5.6. Приложение сетки с размерами стороны 0,1 мм

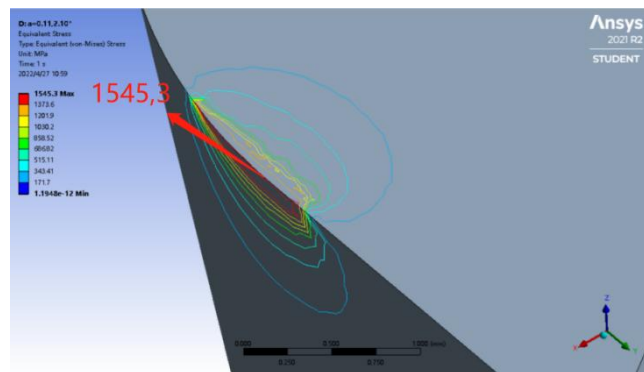
$$\varphi_1 = 10^\circ, a = 0,11 \text{ мм}$$



а) $r = 0,1$ мм, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1833,6$ МПа;



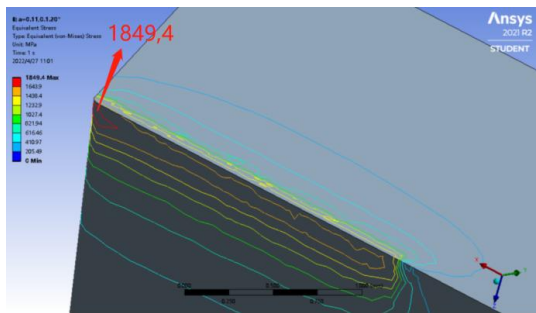
б) $r = 0,8$ мм, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1621,7$ МПа;



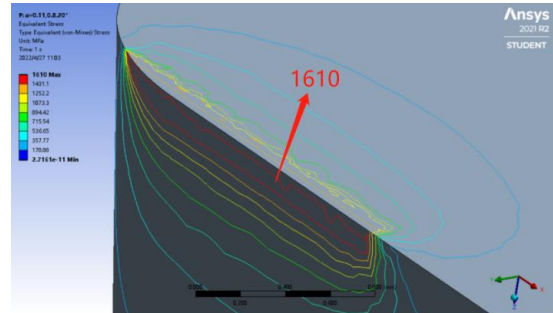
в) $r = 2$ мм, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1545,3$ МПа.

Рис. 5.7. Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ max}}$ (МПа) в вырезках СМП при различной величине радиуса при вершине r . ВТЗ-1 - ВК8, $\varphi = 45^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $b = 2,3$ мм, $s = 0,156$ мм/об, $\varphi_1 = 10^\circ$, $c = 1,1 \times a = 0,121$ мм, трапециевидальный характер эпюры σ

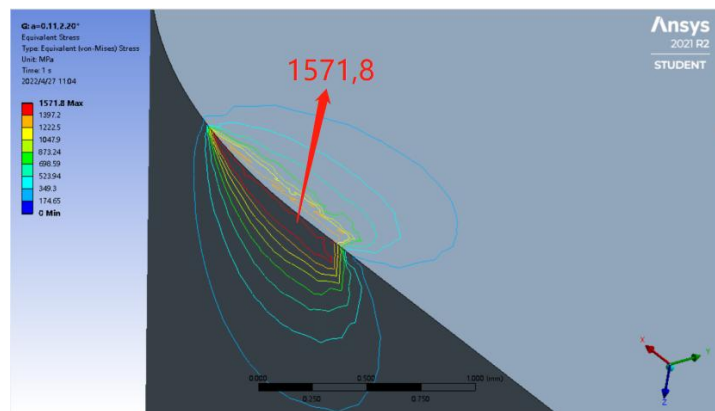
$$\varphi_1 = 20^\circ, a = 0,11 \text{ мм}$$



а) $r = 0,1$ мм, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1849,4$ МПа;



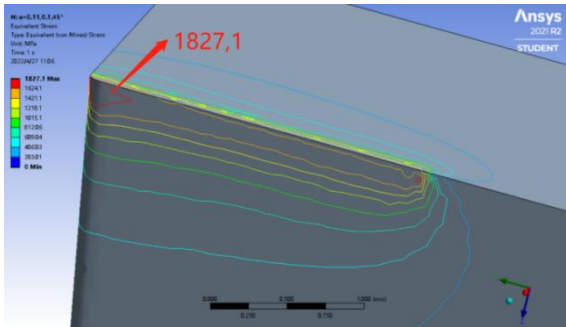
б) $r = 0,8$ мм, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1610$ МПа;



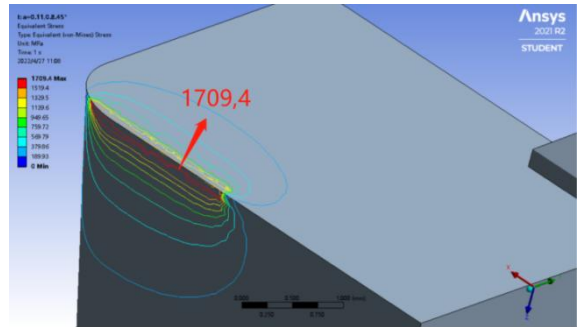
в) $r = 2$ мм, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1571,8$ МПа.

Рис. 5.8. Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ max}}$ (МПа) в вырезках СМП при различной величине радиуса при вершине r .
 ВТЗ-1 - ВК8, $\varphi = 45^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $b = 2,3$ мм, $s = 0,156$ мм/об, $\varphi_1 = 20^\circ$,
 $c = 1,1 \times a = 0,121$ мм, трапецидальный характер эпюры σ

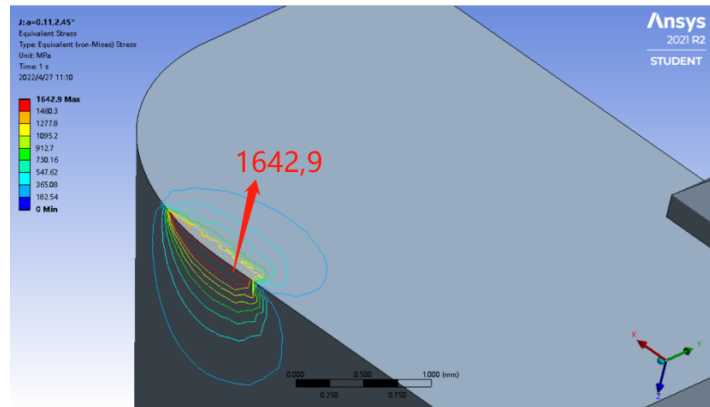
$$\varphi_1 = 45^\circ, a = 0,11 \text{ мм}$$



а) $r = 0,1 \text{ мм}$, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1827,1 \text{ МПа}$;



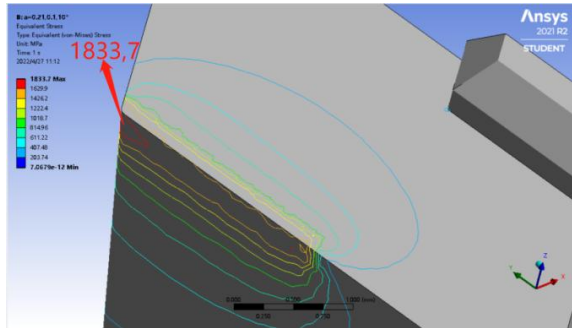
б) $r = 0,8 \text{ мм}$, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1709,4 \text{ МПа}$;



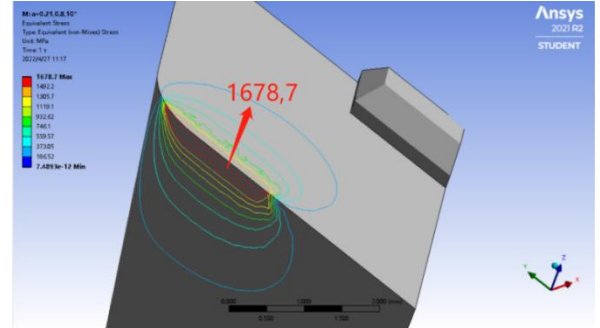
в) $r = 2 \text{ мм}$, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1642,9 \text{ МПа}$.

Рис. 5.9. Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ max}}$ (МПа) в вырезках СМП при различной величине радиуса при вершине r . ВТЗ-1 - ВК8, $\varphi = 45^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $b = 2,3 \text{ мм}$, $s = 0,156 \text{ мм/об}$, $\varphi_1 = 45^\circ$, $c = 1,1 \times a = 0,121 \text{ мм}$, трапецидальный характер эпюры σ

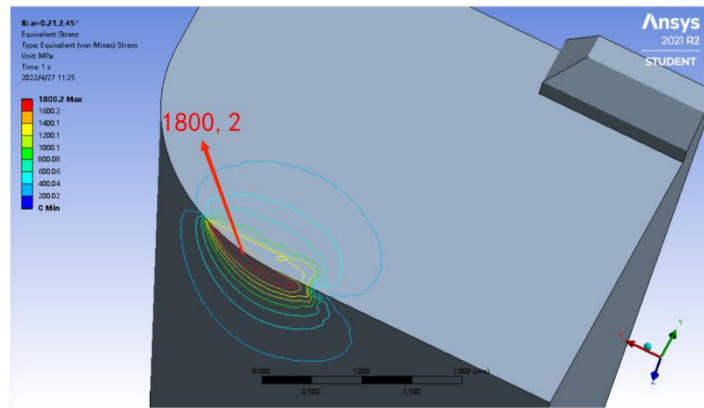
$$\varphi_1 = 10^\circ, a = 0,21 \text{ мм}$$



а) $r = 0,1$ мм, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1833,7$ МПа;



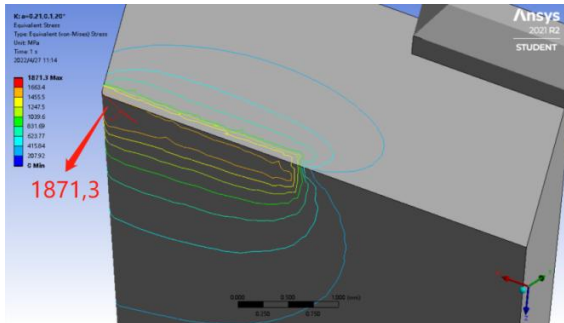
б) $r = 0,8$ мм, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1678,7$ МПа;



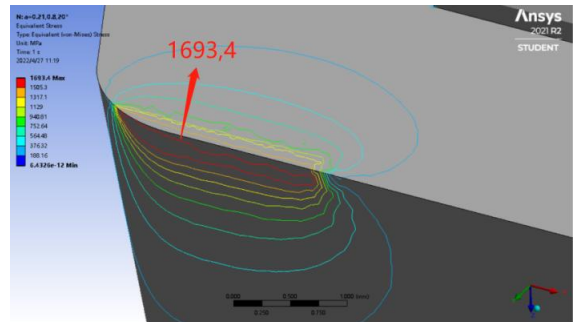
в) $r = 2$ мм, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1800,2$ МПа.

Рис. 5.10. Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ max}}$ (МПа) в вырезках СМП при различной величине радиуса при вершине r . ВТЗ-1 - ВК8, $\varphi = 45^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $b = 2,3$ мм, $s = 0,3$ мм/об, $\varphi_1 = 10^\circ$, $c = 1,1 \times a = 0,231$ мм, трапециевидальный характер эпюры σ

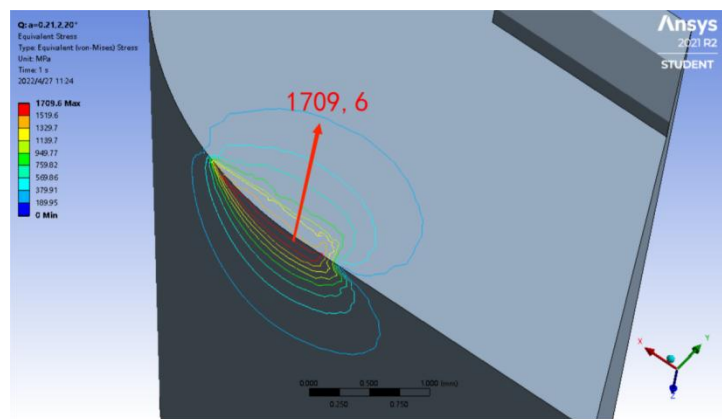
$$\varphi_1 = 20^\circ, a = 0,21 \text{ мм}$$



а) $r = 0,1 \text{ мм}$, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1871,3 \text{ МПа}$;



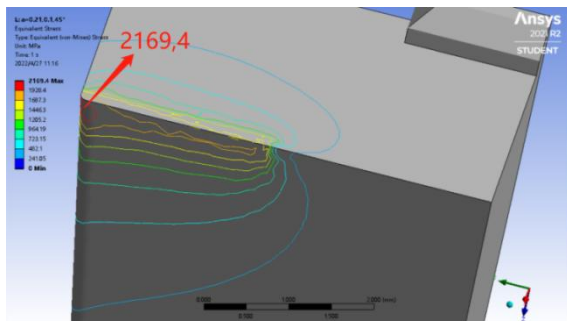
б) $r = 0,8 \text{ мм}$, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1693,4 \text{ МПа}$;



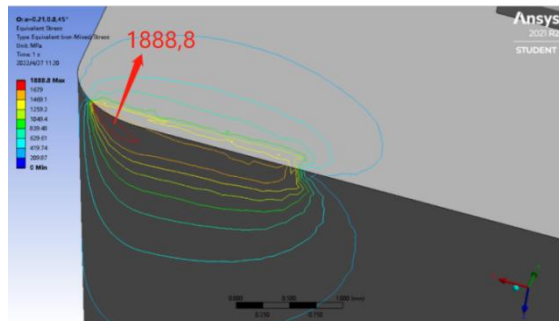
в) $r = 2 \text{ мм}$, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1709,6 \text{ МПа}$.

Рис. 5.11. Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ max}}$ (МПа) в вырезках СМП при различной величине радиуса при вершине r .
 ВТЗ-1 - ВК8, $\varphi = 45^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $b = 2,3 \text{ мм}$, $s = 0,3 \text{ мм/об}$, $\varphi_1 = 20^\circ$,
 $c = 1,1 \times a = 0,231 \text{ мм}$, трапецидальный характер эпюры σ

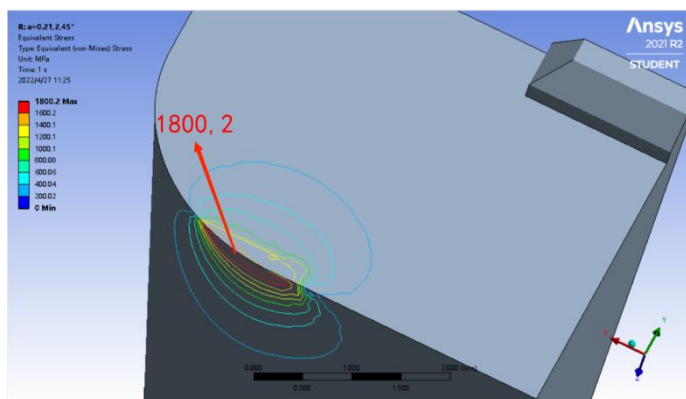
$$\varphi_1 = 45^\circ, a = 0,21 \text{ мм}$$



а) $r = 0,1$ мм, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 2169,4$ МПа;



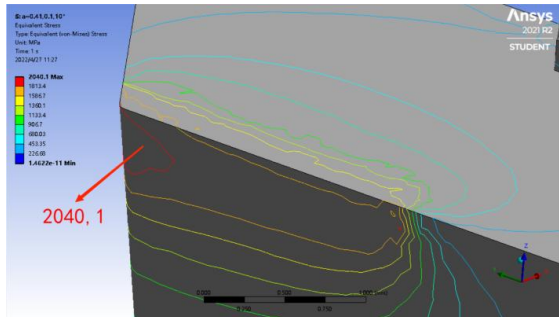
б) $r = 0,8$ мм, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1888,8$ МПа;



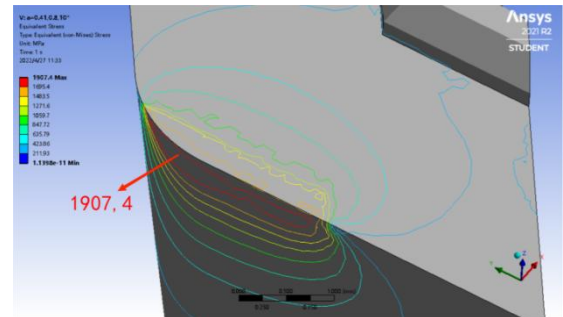
в) $r = 2$ мм, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1800,2$ МПа.

Рис. 5.12. Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ max}}$ (МПа) в вырезках СМП при различной величине радиуса при вершине r . ВТЗ-1 - ВК8, $\varphi = 45^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $b = 2,3$ мм, $s = 0,3$ мм/об, $\varphi_1 = 45^\circ$, $c = 1,1 \times a = 0,231$ мм, трапецидальный характер эпюры σ

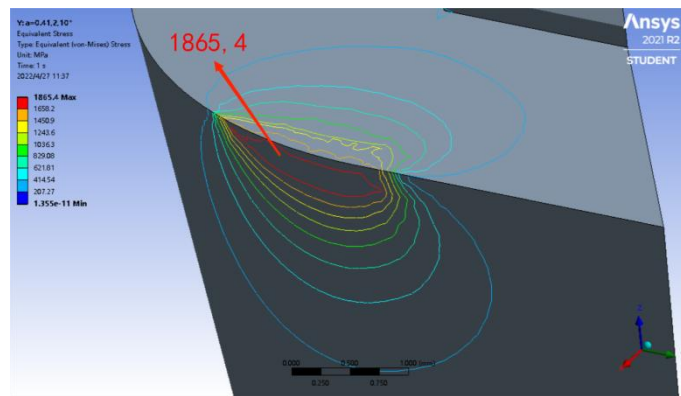
$$\varphi_1 = 10^\circ, a = 0,41 \text{ мм}$$



а) $r = 0,1$ мм, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 2040,1$ МПа;



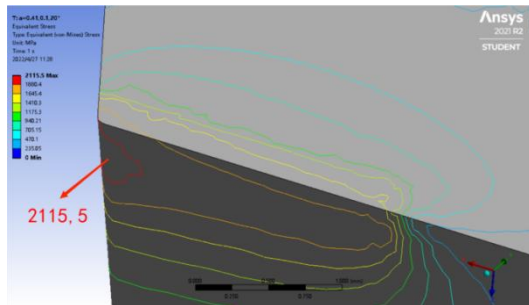
б) $r = 0,8$ мм, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1907,4$ МПа;



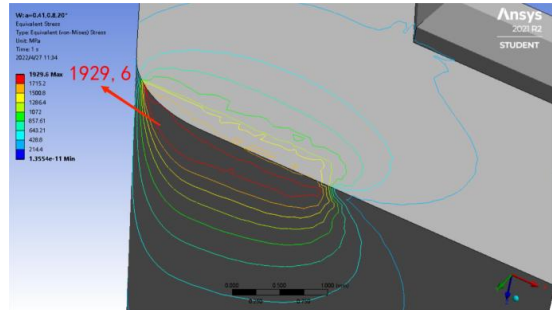
в) $r = 2$ мм, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1865,4$ МПа.

Рис. 5.13. Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ max}}$ (МПа) в вырезках СМП при различной величине радиуса при вершине r .
 ВТЗ-1 - ВК8, $\varphi = 45^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $b = 2,3$ мм, $s = 0,58$ мм/об, $\varphi_1 = 10^\circ$,
 $c = 1,1 \times a = 0,451$ мм, трапецидальный характер эпюры σ

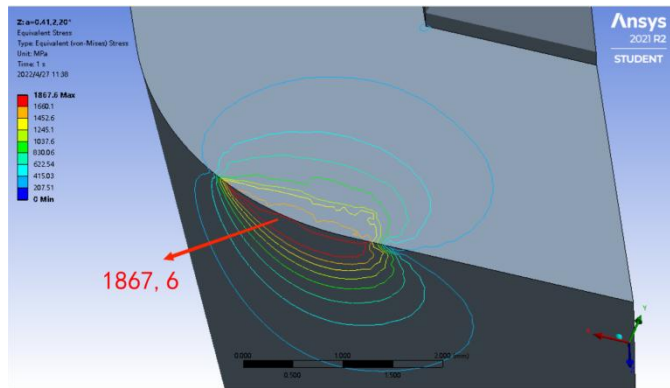
$$\varphi_1 = 20^\circ, a = 0,41 \text{ мм}$$



а) $r = 0,1$ мм, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 2115,5$ МПа;



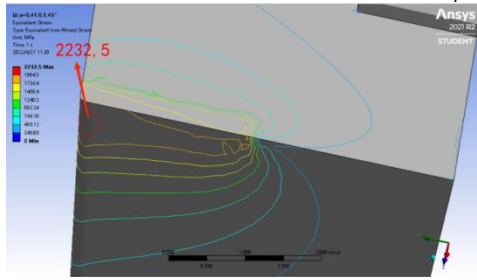
б) $r = 0,8$ мм, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1929,6$ МПа;



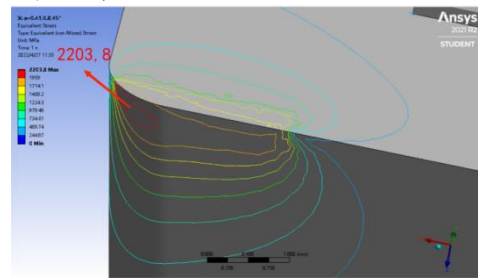
в) $r = 2$ мм, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1867,6$ МПа.

Рис. 5.14. Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ max}}$ (МПа) в вырезках СМШ при различной величине радиуса при вершине r .
 ВТЗ-1 - ВК8, $\varphi = 45^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $b = 2,3$ мм, $s = 0,58$ мм/об, $\varphi_1 = 20^\circ$,
 $c = 1,1 \times a = 0,451$ мм, трапецидальный характер эпюры σ

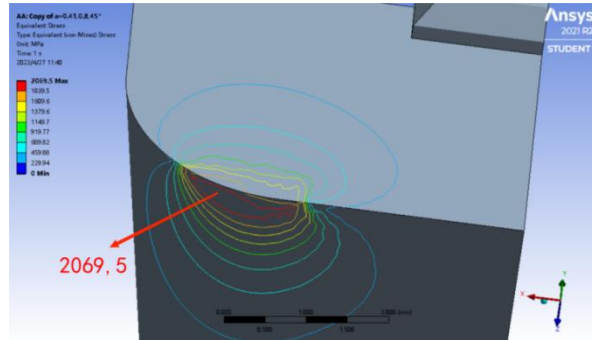
$\varphi_1 = 45^\circ, a = 0,41 \text{ мм}$



а) $r = 0,1 \text{ мм}$, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 2232,5 \text{ МПа}$;



б) $r = 0,8 \text{ мм}$, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 2203,8 \text{ МПа}$;



в) $r = 2 \text{ мм}$, $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 2069,5 \text{ МПа}$.

Рис. 5.15. Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ max}}$ (МПа) в вырезках СМП при различной величине радиуса при вершине r . ВТЗ-1 - ВК8, $\varphi = 45^\circ, \gamma = 0^\circ, \alpha = 8^\circ, b = 2,3 \text{ мм}, s = 0,58 \text{ мм/об}, \varphi_1 = 45^\circ, c = 1,1 \times a = 0,451 \text{ мм}$, трапецидальный характер эпюры σ

Таблица 5.8 – Величина наибольших эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ max}}$ (МПа) в вырезке из СМП при различном радиусе при вершине r , подаче s и вспомогательном угле в плане φ_1 . ВТЗ-1 - ВК8, $\varphi = 45^\circ, \gamma = 0^\circ, \alpha = 8^\circ, b = 2,3 \text{ мм}, c = 1,1 \times a$, трапецидальный характер эпюры σ

Радиус при вершине r , мм	s , мм/об	$\varphi_1 = 10^\circ$	$\varphi_1 = 20^\circ$	$\varphi_1 = 45^\circ$
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
0,1	0,156	1833,6	1849,4	1827,1
	0,3	1833,7	1871,3	2169,4
	0,58	2040,1	2115,5	2232,5
0,8	0,156	1621,7	1610	1709,4
	0,3	1678,7	1693,4	1888,8
	0,58	1907,4	1929,6	2203,8
2,0	0,156	1545,3	1571,8	1642,9
	0,3	1644,4	1709,6	1800,2
	0,58	1865,4	1867,6	2069,5

На рис. 5.16 - 5.20 представлены графики влияния толщины среза a (мм) на величину наибольшего эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{ЭКВ max}}$ (МПа) при

различной величине радиуса при вершине r , вспомогательного угла в плане φ_1 .

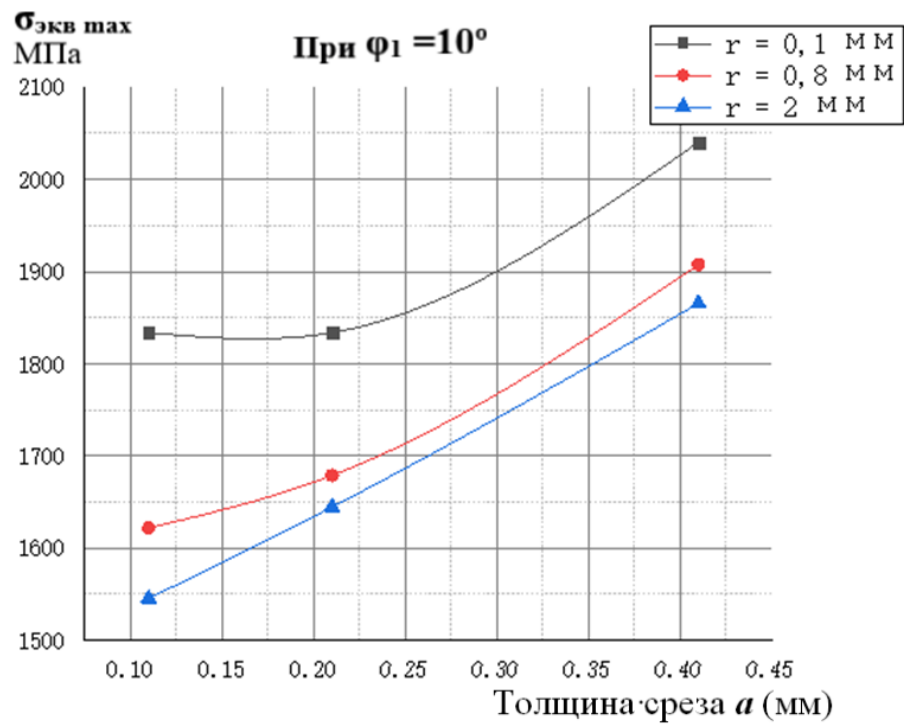


Рис. 5.16. Влияние толщины среза a (мм) на величину наибольшего эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экв max}}$ (МПа) при различной величине радиуса при вершине r при вспомогательном угле в плане $\varphi_1 = 10^\circ$. ВТЗ-1 - ВК8, $\varphi = 45^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $\varphi_1 = 10^\circ$, $b = 2,3$ мм, $c = 1,1 \times a$, трапецидальный характер эпюры σ

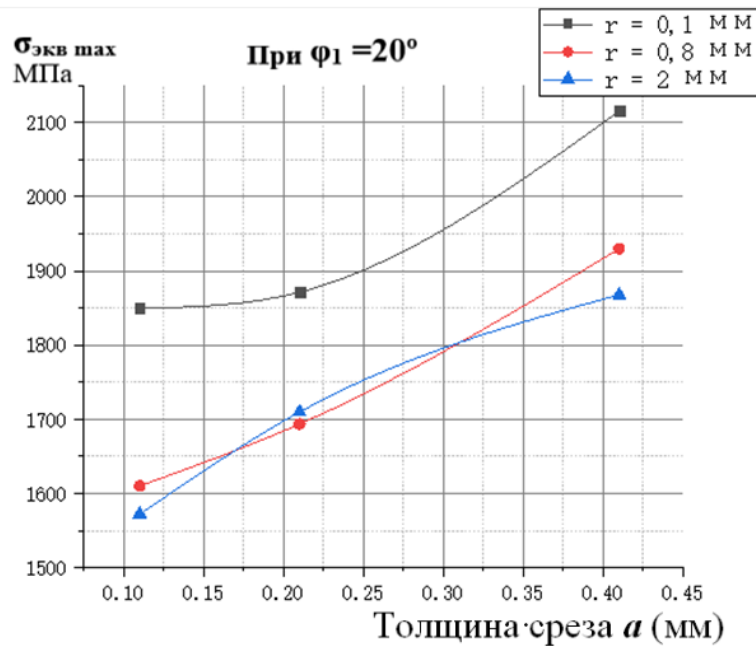


Рис. 5.17. Влияние толщины среза a (мм) на величину наибольшего эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экв max}}$ (МПа) при различной величине радиуса при вершине r при вспомогательном угле в плане $\varphi_1 = 20^\circ$. ВТ3-1 - ВК8, $\varphi = 45^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $\varphi_1 = 20^\circ$, $b = 2,3$ мм, $c = 1,1 \times a$, трапецидальный характер эпюры σ

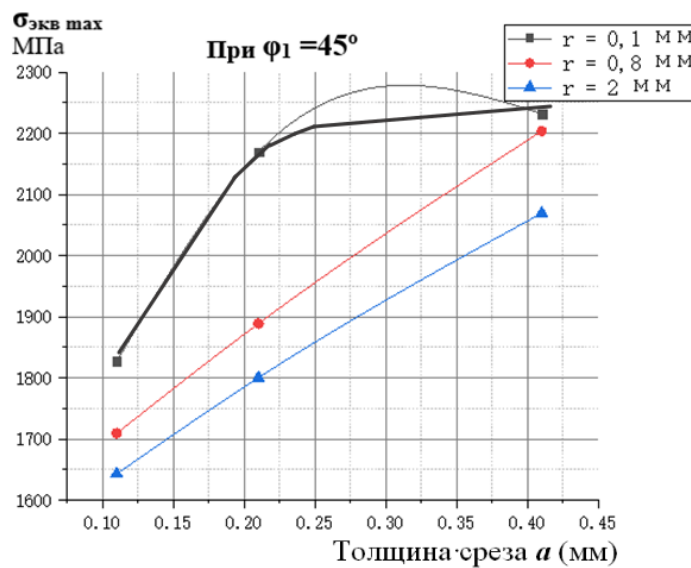
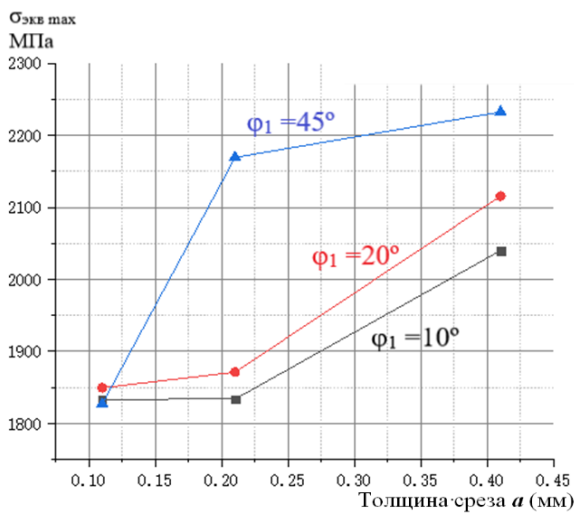
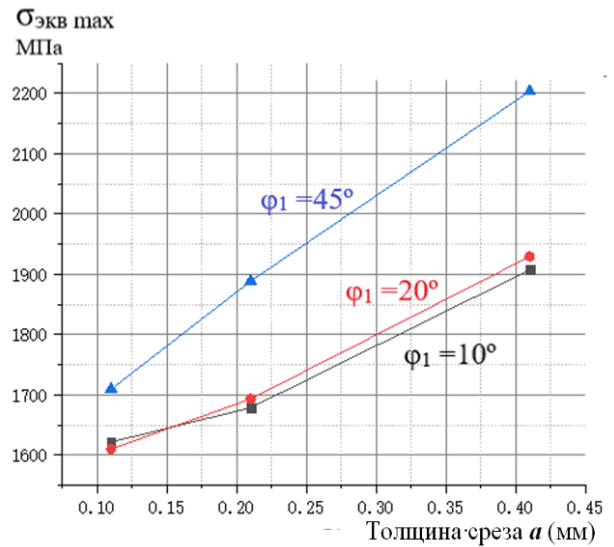


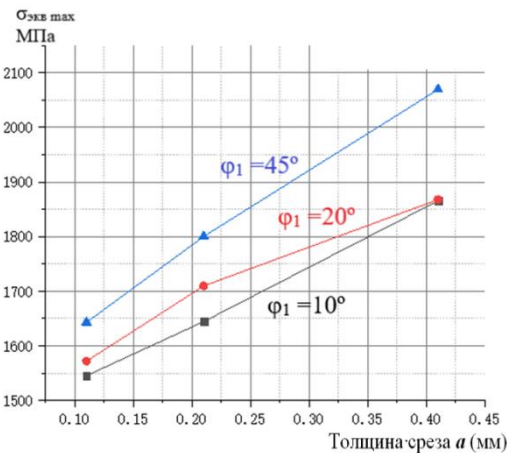
Рис. 5.18. Влияние толщины среза a (мм) на величину наибольшего эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экв max}}$ (МПа) при различной величине радиуса при вершине r при вспомогательном угле в плане $\varphi_1 = 45^\circ$. ВТ3-1 - ВК8, $\varphi = 45^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $\varphi_1 = 45^\circ$, $b = 2,3$ мм, $c = 1,1 \times a$, трапецидальный характер эпюры σ



а) $r = 0,1$ мм;



б) $r = 0,8$ мм;



в) $r = 2,0$ мм.

Рис. 5.19. Влияние толщины среза a (мм) на величину наибольшего эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экв max}}$ (МПа) при различной величине вспомогательном угле в плане ϕ_1 и радиуса при вершине r . ВТЗ-1 - ВК8, $\phi = 45^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $b = 2,3$ мм, $c = 1,1 \times a$, трапецидальный характер эпюры σ

С увеличением толщины среза a $\sigma_{\text{экв max}}$ в СМП существенно увеличивается. С увеличением радиуса при вершине величина наибольших эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв max}}$ в СМП уменьшается.

Увеличение величины вспомогательного угла в плане приводит к увеличению $\sigma_{\text{экв max}}$ и особенно существенно при больших подачах.

Заключение

1. В основе построения эпюр контактных напряжений на передней поверхности лежит определение физических составляющих N и F силы резания, длины контакта стружки с инструментом c , стабильность характера эпюры касательных контактных напряжений τ .

2. После построения эпюр обязательно должна быть выполнена проверка равенства физических составляющих силы резания, рассчитанных по эпюрам, с физическими составляющими силы резания, измеренными при резании.

3. Толщина среза мало влияет на максимальное значение нормального контактного напряжения, но длина стружки в значительной степени влияет на максимальное значение напряжения. При $c = 1,1a$ максимальное значение напряжения в 1,5...3 раза больше, чем при $c = 3a$.

4. Результаты исследований показали, что эпюра нормальных контактных напряжений σ имеет трапецеидальный характер, а длина контакта стружки $c=1,1a$.

5. Количество участков, на которые делится длина контакта стружки с передней поверхностью, мало влияет на результаты расчёта: при увеличении количества участков в 6 раз наибольшие эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв max}}$ увеличиваются в 1,01-1,1 раза и в меньшей степени при большой толщине среза;

6. Длина контакта стружки c оказывает большое влияние на максимальное значение эквивалентного напряжения при одинаковых силах на передней поверхности. При треугольном характере эпюры σ , когда $c = 1,1a$, максимальное эквивалентное напряжение почти в три раза больше, чем при $c = 3a$ при одинаковых силах на передней поверхности;

7. Расчёт эквивалентных напряжений в режущем клине при разной форме эпюры нормальных контактных напряжений дополнительно показал, что наиболее вероятен трапецеидальный характер эпюр нормальных контактных напряжений σ и длина контакта стружки $c = 1,1a$. Поэтому дальнейшие расчёты необходимо выполнять при этих условиях.

8. Эпюра нормальных контактных напряжений на фаске износа по задней поверхности имеет у режущей кромки горизонтальный участок с очень большой величиной нормальных контактных напряжений, до 3400 МПа. Но при отдалении от режущей кромки более 0,2-0,5 мм происходит интенсивное уменьшение нормальных контактных напряжений до 750-580 МПа, что связано с высокой температурой резания и дополнительным деформированием начального участка фаски поверхности резания.

9. Эпюра касательных контактных напряжений на фаске износа по задней поверхности имеет у режущей кромки участок с достаточно большой величиной касательных контактных напряжений, до 800 МПа. Но при отдалении от режущей кромки происходит интенсивное уменьшение касательных контактных напряжений до 200 МПа, что связано с высокой температурой резания и уменьшением предела прочности на сдвиг.

10. При появлении износа на задней поверхности наблюдается значительное увеличение величины наибольшего эквивалентного напряжения. При длине фаски износа по задней поверхности $h_f = 0,2$ мм величина наибольшего эквивалентного напряжения почти в два раза больше, чем при отсутствии износа. Но степень износа не оказывает большого влияния на величины наибольшего эквивалентного напряжения.

11. Наибольшая величина эквивалентных внутренних напряжений $\sigma_{\text{экв max}}$ существенно зависит от характера эпюры нормальных контактных напряжений σ , длины контакта стружки с передней поверхностью s , но несущественно зависит от толщины среза a .

12. Увеличение величины вспомогательного угла в плане приводит к увеличению $\sigma_{\text{экв max}}$ и особенно существенно при больших подачах.

13. С увеличением радиуса при вершине величина наибольших эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв max}}$ в СМП уменьшается.

14. При обработке титанового сплава ВТ3-1 не рекомендуется увеличивать скорость резания более 60 м/мин и подачу более 0,56 мм/об. Допустимый износ

инструмента по задней поверхности при черновой обработке ограничен только требованиями к качеству обработанной поверхности и может быть более 1,2 мм без опасений скола СМП.

Список литературы

1. Развитие науки о резании металлов /В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев и др. – Москва: Машиностроение, 1967. – 416 с.
2. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента/Полетика М.Ф. – Москва: Машиностроение, 1969. – 148 с.
3. 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.
4. 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.
5. Полетика М.Ф., Утешев М.Х. Исследование процесса резания поляризационно-оптическим методом. – Известия Томского политехнического института. 1964. т. 114. С. 21-32.
6. 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] .

7. 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]. — Заглавие с экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. Режим доступа:

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

Студенту:

Группа	ФИО
4АМ01	Ян Анькан

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

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

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

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

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

Перечень графического материала

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

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	14.03.2022
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН	Гасанов М.А.	Д.э.н.		14.03.2022

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ01	Ян Анькан		14.03.2022

6. 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 повышения надёжности работы сменных многогранных пластин (СМП), построить эпюры контактных напряжений при обработке титанового сплава, определить оптимальные размеры и геометрию режущих пластин.

6.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

6.1.1. Анализ конкурентных технических решений

Существуют различные материалы концевых цельных фрез на рынке:

- 1) Концевые цельные фрезы из материал P6M5;
- 2) Концевые цельные фрезы из материал BK8;

В таблице 6.1 показано сравнение различных материалов концевых цельных фрез по ресурсоэффективности с точки зрения технических и экономических критериев оценки эффективности.

Таблица 6.1 – Сравнение конкурентных технических решений (разработок)

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	0,12	5	3	4	0,72	0,72	0,81
2. Производительность устройства	0,11	5	5	3	0,4	0,48	0,64
3. Энергоэкономичность	0,06	5	5	3	0,4	0,4	0,24
4. Надежность	0,09	4	4	3	0,28	0,28	0,21
5. Уровень шума	0,12	4	4	5	0,35	0,42	0,42
6. Эффективность работы	0,1	5	5	4	0,55	0,55	0,44
7. Безопасность	0,11	5	5	4	0,45	0,45	0,36
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Цена	0,11	5	4	3	0,6	0,48	0,36
2. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	4	3	4	0,4	0,3	0,4
3. Финансирование научного исследования	0,09	5	4	4	0,32	0,5	0,52
Итого	1	47	42	37	4,47	4,57	4,4

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

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

6.1.2. 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 6.2.

Таблица 6.2 – 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 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 недопущены 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 6.3–6.6.

Таблица 6.3 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и сильные стороны».

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

Таблица 6.4 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и слабые стороны».

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

Таблица 6.5 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и сильные стороны».

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

Таблица 6.6 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и слабые стороны».

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

В рамках третьего этапа должна быть составлена итоговая матрица SWOT-анализа, которая приводится в работе(таблица 6.7).

Таблица 6.7 – Итоговая таблица SWOT-анализа

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта	Слабые стороны научно-исследовательского проекта
	<p>С1. Низкая цена исходного сырья.</p> <p>С2. Более точные экспериментальные результаты.</p> <p>С3. Более свежая информация, которая была использована для разработки проекта.</p> <p>С4. Перспективный способ для обработки данных.</p> <p>С5. Квалифицированный персонал.</p>	<p>Сл1. Отсутствие разных СМП для проведения испытания.</p> <p>Сл2. Долгое время подготовки к моделированию при проведении научного исследования.</p> <p>Сл3. Высокие требования к экспериментальному оборудованию.</p> <p>Сл4. Эксперименты имеют большие погрешности и неопределенности.</p> <p>Сл5. Высокие требования к постановке внутренних настройки в программу ANSYS..</p>
<p>Возможности</p> <p>В1. Использование оборудования ИНШПТ ТПУ</p> <p>В2. Появление потенциального спроса на новые геометрии СМП.</p> <p>В3. Повышение точности .</p> <p>В4. Уменьшение стоимости конкурентных разработок.</p> <p>В5. Привлечение других информационных технологий для решения вопросов машиностроения.</p>	<p>Направления развития</p> <p>В1С2. Более точные экспериментальные результаты с использующим новым оборудованием.</p> <p>В2В3С3С4. Свежая информация и перспективный способ изучения соответствуют потенциальному спросу в дальнейшие технологии машиностроения и внедрению технологии в аэрокосмической области.</p> <p>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>

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

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.

6.2. Планирование научно-исследовательских работ

6.2.1. 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 6.8.

Таблица 6.8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Научный руководитель
	2	Календарное планирование выполнения ВКР	Инженер, научный руководитель
Выбор способа решения поставленной задачи	3	Обзор научной литературы	Инженер
	4	Выбор методов исследования	Инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Планирование эксперимента	Инженер, научный руководитель
	6	Подготовка образцов для эксперимента	Инженер
	7	Проведение эксперимента	Инженер
Обобщение и оценка результатов	8	Обработка полученных данных	Инженер
	9	Оценка правильности полученных результатов	Инженер, Научный руководитель
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	10	Составление пояснительной записки	Инженер

6.2.2. 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:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{min}i} + 2t_{\text{max}i}}{5}, \quad (6.2)$$

где $t_{\text{ож}i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, человеко-дни;

$t_{\text{min}i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни;

$t_{\text{max}i}$ – 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_{pi} , при этом учитывается параллельность выполнения работ разными исполнителями. Данный расчёт позволяет определить величину заработной платы.

$$T_{pi} = \frac{t_{\text{ож}i}}{Ч_i}, \quad (6.3)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, рабочие дни;

$t_{\text{ож}i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, человеко-дни;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для перевода длительности каждого этапа из рабочих в календарные дни, необходимо воспользоваться формулой (4.3):

$$T_{\text{кл.инж}} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (6.4)$$

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

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

$k_{кал}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 89 - 29} = 1,48 \quad (6.5)$$

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

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

$T_{пр}$ – общее количество праздничных дней в году.

Расчеты временных показателей проведения научного исследования обобщены в таблице 6.9.

Таблица 6.9 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож}$, чел-дни			
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	1	-	2	-	1,4	-	1,4	2
2. Календарное планирование выполнения ВКР	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 резца.	-	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 6.10).

Таблица 6.10 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп	T _{кп} , кал. дн.	Продолжительность работ													
				февр			март			апр			май				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Исп1	2	█													
2	Календарное планирование выполнения ВКР	Исп1 Исп2	3	█													
3	Изучение литературы по токарной обработке.	Исп2	65		█												
4	Метод разрезного реза.	Исп2	80			█											
5	Создать 3D моделей СМП, Измерить длины контакта стружки, Расчёт эпюр контактных напряжений и их параметров на передней поверхности.	Исп2	18							█							
6	Исследование НДС СМП с помощью программы ANSYS	Исп1 Исп2	63							█	█						
7	Проведение компьютерного эксперимента.	Исп2	9											█			
8	Обработка полученных данных	Исп2	14													█	
9	Оценка правильности полученных результатов	Исп1 Исп2	10													█	█
10	Составление пояснительной записки	Исп2	41														█

Примечание:



– Исп. 1 (научный руководитель),



– Исп. 2 (инженер)

6.3. 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.

6.3.1. Расчет материальных затрат научно-технического исследования

Данная часть включает затрат всех материалов, используемых при исследовании. Результаты расчета затрат представлены в таблице 6.11.

Таблица 6.11 –Расходные материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Заготовка(сплав титановый ВТЗ-1)	1230 руб/кг	800мм ~0,5кг	615
Режущие инструменты	150	3	450
Приспособление	500	1	500
Бумага для принтера формата А4	280 руб/уп	1	280
Итого:			1845

6.3.2. 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:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (6.6)$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m, \quad (6.7)$$

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

Таблица 6.12 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	Персональный компьютер (ноутбук)	1	4	50	50
Итого		50 тыс. руб.			

Рассчитаем норму амортизации для ноутбука, с учётом того, что срок полезного использования составляет 4 года:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{4} = 0,25$$

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

$$A = \frac{H_A N}{12} \times m = \frac{0,25 \times 50000}{12} \times 3,5 = 3645 \text{руб}$$

6.3.3. Основная заработная плата исполнителей темы

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

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

$$Z_{осн} = Z_{он} \cdot T_p, \quad (6.8)$$

где $Z_{он}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (по таблице 4.9 для инженера: $T_{p2} = 219$ дней, для руководителя: $T_{p1} = 42,2$ дней).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{5128 \cdot 8,1}{247} = 1681,8 \text{ руб.}, \quad (6.9)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.; $F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

– при отпуске в 28 раб. дня – $M=8,1$ месяца, 5-дневная рабочая неделя;

– при отпуске в 56 раб. дней – $M=8,1$ месяца, 6-дневная рабочая неделя.

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{12675 \cdot 8,1}{247} = 415,65 \text{ руб.},$$

Должностной оклад работника за месяц:

– для руководителя:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{мс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) k_{\text{р}} = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.} \quad (6.10)$$

– для инженера:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{мс}} \cdot (1 + K_{\text{пр}} + K_{\text{д}}) K_{\text{р}} = 6500 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 12675 \text{ руб.},$$

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

Таблица 6.13 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	52/14	104/14
- выходные дни		
- праздничные дни		
Потери рабочего времени	48/5	24/10
- отпуск		
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	213

Таблица 6.14 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{мс}, руб$	$k_{пр}$	$k_{д}$	$k_{р}$	$Z_{м}, руб$	$Z_{осн}, руб$	$T_{р}, раб.дн.$	$Z_{осн}, руб$
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	1681,8	42,2	70971,96
Инженер	6500	0,3	0,2	1,3	12675	415,6	219	91016,4
Итого:								161988,36

6.3.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы

$$Z_{доп} = k_{доп} \times Z_{осн} \quad (6.11)$$

Где:

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата;

$Z_{осн}$ – основная заработная плата;

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

По формуле 6.11 определяется дополнительная заработная плата для руководителя:

$$Z_{доп1} = k_{доп} \times Z_{осн} = 0,15 \times 70971,96 = 10645,79 \text{ руб}$$

По формуле 6.11 определяется дополнительная заработная плата для инженера:

$$Z_{доп2} = k_{доп} \times Z_{осн} = 0,15 \times 91016,4 = 13652,46 \text{ руб}$$

Таким образом, общая дополнительная заработная плата составляет:

$$Z_{доп\text{ общ}} = Z_{доп1} + Z_{доп2} = 10645,79 + 13652,46 = 24298,25 \text{ руб}$$

6.3.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле 6.12:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \times (Z_{осн} + Z_{доп}) \quad (6.12)$$

Где: $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2022 году –30% (ст. 425 НК РФ).

Отчисления во внебюджетные фонды для руководителя определяются по формуле 6.12:

$$Z_{\text{внеб1}} = k_{\text{внеб}} \times (Z_{\text{осн1}} + Z_{\text{доп1}}) = 0,3 \times (70971,96 + 10645,79) = 24485,3 \text{ руб}$$

Отчисления во внебюджетные фонды для инженера определяются по формуле 6.12:

$$Z_{\text{внеб2}} = k_{\text{внеб}} \times (Z_{\text{осн2}} + Z_{\text{доп2}}) = 0,3 \times (91016,4 + 13652,46) = 31400,65 \text{ руб}$$

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

$$Z_{\text{внеб общ}} = Z_{\text{внеб1}} + Z_{\text{внеб2}} = 24485,3 + 31400,65 = 55885,97 \text{ руб}$$

6.3.6. 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 телеграфные расходы, размножение материалов и т.д.

Величина накладных расходов определяется по формуле 6.13:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (6.13)$$

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

6.3.7. Бюджетная стоимость НИР

Таблица 6.15 – Группировка затрат по статьям

Статьи							
1	2	3	4	5	6	7	8
Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов	Накладные расходы	Стоимость бюджета
3645	1845	161988,36	24298,25	55885,97	247662,58	34887	282549,58

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется бюджет НИ «Исследование прочности сменных многогранных пластин при обработке титанового сплава» по форме, приведенной в таблице 6.16. В таблице

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

Таблица 6.16 – Группировка затрат по статьям

№	Наименование статьи	Сумма, руб.		
		Текущий Проект	Исп.2	Исп.3
1	Материальные затраты НИР	1845	9438,45	4800
2	Затраты на специальное оборудование	3645	3075	26712
3	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	161988,36	971582,82	296770,26
4	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	24298,25	145737,42	44515,54
5	Отчисления во внебюджетные фонды	55885,97	291474,84	92031,08
6	Накладные расходы	34887	84574,86	74052,62
Бюджет затрат НИР		282549,58	1506983,39	538881,50

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

6.4 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 как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{ri}}{\Phi_{\text{мах}}}, \quad (4.14)$$

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

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

$\Phi_{\text{мах}}$ – максимальная стоимость исполнения.

$\Phi_{\text{текущ.проект}} = 282549,58$ руб, $\Phi_{\text{исп.1}} = 1506983,39$ руб, $\Phi_{\text{исп.2}} = 538881,50$ руб.

$$I_{\text{финр}}^{\text{тех.пр}} = \frac{\Phi_{\text{тек.пр}}}{\Phi_{\text{мах}}} = \frac{282549,58}{1506983,39} = 0,187$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}} = \frac{\Phi_{\text{исп.2}}}{\Phi_{\text{мах}}} = \frac{538881,50}{1506983,39} = 0,357$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.3}} = \frac{\Phi_{\text{исп.3}}}{\Phi_{\text{мах}}} = \frac{1506983,39}{1506983,39} = 1$$

В результате расчета консолидированных финансовых показателей по трем вариантам разработки вариант 1 с меньшим перевесом признан считается более приемлемым с точки зрения финансовой эффективности.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов выполнения НИР (I_{ri}) определен путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 6.17).

Таблица 6.17 – Сравнительная оценка характеристик вариантов НИР

Объект 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 6.17 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 6.17 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 6.17 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 :

$$I_{\text{эф.}i} = \frac{I_p^{\text{исп.}i}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}} \quad (6.15)$$

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

разработки;

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

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

По формуле 6.15 определяется интегральный показатель эффективности для текущего проекта:

$$I_{эф \cdot текущ \cdot проект} = \frac{I_p^{текущ.проект}}{I_{финр}^{тех.пр}} = \frac{4,85}{0,187} = 25,93$$

По формуле 6.15 определяется интегральный показатель эффективности для первого конкурентного проекта:

$$I_{эф \cdot исп \cdot 1} = \frac{I_p^{исп.1}}{I_{финр}^{исп.1}} = \frac{4,45}{0,375} = 11,86$$

По формуле 6.15 определяется интегральный показатель эффективности для второго конкурентного проекта:

$$I_{эф \cdot исп \cdot 2} = \frac{I_p^{исп.2}}{I_{финр}^{исп.2}} = \frac{4,05}{1} = 4,05$$

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 6.18).

Таблица 6.18 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,187	0,357	1

2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,85	4,45	4,05
3	Интегральный показатель эффективности	25,93	11,86	4,05
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,78	0,3

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее финансово- и ресурсоэффективным является вариант 1 (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 282549,58 рублей. (требуемый затраты текущего проекта значительно меньше других конкурентных вариантов).

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

4. Результат оценки эффективности ИР показывает следующие выводы:

1) значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,187, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной по сравнению с аналогами;

2) значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,85, по сравнению с 4,45 и 4,05;

3) значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 25,93, по сравнению с 11,86 и 4,05, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа		ФИО	
4АМ01		Ян Анькан	
Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	Материаловедение
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	15.04.01 «Машиностроение»

Тема ВКР:

Исследование прочности сменных многогранных пластин при обработке титановых сплавов	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации 	<p><i>Объект исследования:</i> сменные многогранные пластины (СМП)</p> <p><i>Область применения:</i> машиностроение</p> <p><i>Рабочая зона:</i> производственное помещение</p> <p><i>Размеры помещения:</i> 6*9 м.</p> <p><i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> Станок универсальный токарно-винторезный модели 1К62, динамометр Kistler, Микроскоп.</p> <p><i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> установите динамометр, проведение экспериментов по обработке и сбор данных, отойте компьютерное программное обеспечение для анализа данных.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке 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)</p> <p>ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.</p> <p>ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.</p> <p>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:</p> <ol style="list-style-type: none"> 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; <p>Вредные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 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>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 Воздействие на литосферу: твердые металлические отходы Воздействие на гидросферу: сброс охлаждающей воды при использовании в качестве охладителя рек, прудов 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) Наиболее типичная ЧС: Пожар.</p>
<p>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику 14.03.2022</p>	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич О.А.	к.б.н.		14.03.2022

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ01	Ян Анькан		14.03.2022

Введение

Сущность проекта ВКР представляется собой определением рациональные геометрические параметры режущего инструмента и повысить надёжность работы режущего инструмента при обработке титанового сплава ВТЗ-1. Результаты работы используются для повышения надёжности инструмента. В связи с этим установлено влияние толщины резания и длины контакта стружки с передней 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 универсальный токарно-винторезный модели 1К62; 2) динамометр фирмы Kistler с интерфейсом для подключения к персональному компьютеру; 3) Микроскоп БМИ-1; 4) пруток из титанового сплава марки ВТЗ-1; 5) державка токарная с набором твёрдосплавных сменных многогранных пластин с разными передними углами; 6) напайной резец для переточки по задней поверхности.

В процессе работы измерялась длина стружки, создавалась 3D-модель инструмента и выполнялся силовой анализ модели.

7. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

7.1. 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. Вторым выходным днем при пятидневной рабочей неделе устанавливается коллективным договором или правилами внутреннего трудового распорядка. Оба выходных дня предоставляются, как правило, подряд.

Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны

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

Общие положения состоит из следующих элементов:

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

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.

7.2. Производственная безопасность

Таблица 7.1 – 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.

7.2.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов

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 7.2

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 7.2.

Таблица 7.2 – 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.

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 токарного станка ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности,(ГОСТ 30691 (ИСО 4871:1996) Шум машин. Заявление и контроль значений шумовых характеристик).Шум от источников аэродинамического шума можно уменьшить применением виброизолирующих прокладок, установленных между основанием машины,

прибора и опорной поверхностью. В качестве прокладок используют резину, войлок, пробку, амортизаторы.

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, мой рабочий 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.

Повышенная температура поверхностей и оборудования

Когда эксперимент по обработке станка проводится в комнате 101а корпус 16а. При запуске станок 1К62 нагревается, особенно коробка скоростей зона обработки, поэтому очень важно устройство отвода тепла от станка, но и человек тоже не должен перегреваться. Необходимо 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 лаборатория находится в этом диапазоне.

Схема непосредственного охлаждения – это схема охлаждения, в которой воздух кондиционируемого помещения охлаждается в теплообменнике рабочим телом (хладагентом) холодильной машины. Это решение используется в нашей небольшой лаборатории.

Эксплуатируемая (рабочая) зона – это 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)).

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

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

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

В соответствии с электрическими опасностями помещения .

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

Движущиеся машины и механизмы

В нашей небольшой заводской мастерской мы должны обеспечить выполнение требований безопасности во время процесса загрузки и разгрузки

оборудования. 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; типом 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; эксплуатацией производственного оборудования в соответствии с действующей нормативно-технической документацией и эксплуатационными документами.

7.2.2. Расчет уровня производственного фактора

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

Световой поток лампы Φ определяется по формуле:

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

где E_H – нормативная освещённость по СП 52.13330.2016, $E_H=300$ лк;

S – площадь освещаемого помещения, $S = A \times B = 54 \text{ м}^2$;

K_3 – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, светотехнической арматуры, стен и пр., т. е. отражающих

поверхностей), наличие в атмосфере цеха дыма; Z – коэффициент неравномерности освещения (для люминисцентных ламп 1.1);

$Nл$ – число ламп в помещении (необходимо учесть число ламп в светильнике);

η – коэффициент использования светового потока, который зависит от индекса помещения i , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью h и коэффициентов отражения стен Rc и потолка Rn . Индекс помещения определяется по формуле:

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

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

Основное станочное помещение с размерами: длина $A=9$ м, ширина $B=6$ м, высота $H=5$ м, высота рабочей поверхности $h_{pn}=0,8$ м.

Требуемая освещенность $E=300$ лк.

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

Коэффициент запаса $k=1,8$, коэффициент неравномерности $Z=1,1$.

Выбираем лампу дневного света ЛХБ 125, со световым потоком $\Phi_{лд}=8000$ лм.

Выбираем светильники с люминесцентными лампами типа ОДОР-2-80.

Одним из критериев оптимальности расположения светильников является величина λ , которая для люминесцентных светильников лежит в диапазоне 1,1–1,3.

Принимаем $\lambda=1,1$, расстояние светильников от перекрытия (свес) $h_c = 0,3$ м. Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p,$$

где h_n – высота светильника над полом, высота подвеса,

h_p – высота рабочей поверхности над полом.

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

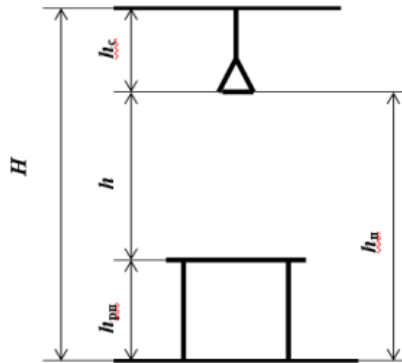


Рис. 7.1. Основные расчетные параметры

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_p - h_c = 5 - 0,8 - 0,3 = 3,9 \text{ м};$$

$$L = \lambda \cdot h = 4,29 \text{ м}$$

Число рядов светильников в помещении:

$$Nb = \frac{B}{L} = \frac{6}{4,29} = 1,4 \approx 2$$

Число светильников в ряду:

$$Na = \frac{A}{L} = \frac{9}{4,29} = 2,09 \approx 3$$

Общее число светильников:

$$N = Na \cdot Nb = 2 \cdot 3 = 6$$

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

$$l = \frac{L}{3} = \frac{4,29}{3} = 1,43 \text{ м}$$

Индекс помещения:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A+B)} = \frac{9 \cdot 6}{3,9 \cdot (9+6)} = 0,92.$$

Коэффициент использования светового потока для светильников типа

ОДОР с люминесцентными лампами при: $\rho_{\text{п}} = 70\%$; $\rho_{\text{с}} = 50\%$;

Индекс помещения $i = 1,6$ равен $\eta = 0,54$.

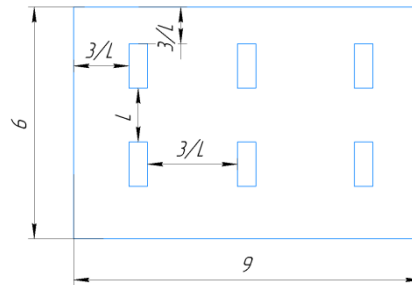


Рис. 7.2. Схема расположения светильников в производственном помещении

Потребный световой поток люминесцентной лампы светильника определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N_{\text{л}} \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 54 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{16 \cdot 0,54} = 3094 \text{ лм}$$

Делаем проверку выполнения условия:

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

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

Таким образом: $-10\% \leq -1,18\% \leq +20\%$, необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

7.3. Экологическая безопасность

Воздействие на селитебную зону. На в моем рабочем месте при выполнении эксперимента во время обработки станок будет производить некоторый шум и образовываться стружка, поэтому лаборатория должна быть достаточно далека 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 относятся к I классу - 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 точения титановых сплавов образуют много стружки, мы собираем эту стружку и переносим в специальный контейнер после эксперимента, а затем перевезут стружку в специализированный завод на переработку для повторного использования.

Изношенный в эксперименте режущий инструмент 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 смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) являются основными источниками загрязнения окружающей среды. Сточные воды предприятий содержат нефтепродукты, образующиеся из смазочно-охлаждающих жидкостей и растворов обезжиривания, ионы тяжелых металлов, они относятся ко II классу - высокоопасные отходы. Имеется 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 вопроса безопасности состоит в том, чтобы носить пылезащитную маску и иметь хорошую вентиляцию, они относятся к III классу - умеренно опасные отходы. Имеется 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)

7.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

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

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.

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 (рис. 7.3.).



Рис. 7.3. План эвакуации при пожаре и других ЧС

Вывод по разделу

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

По электробезопасности согласно правил 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 опасность 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 на иностранном языке
(справочное)

**Study of Contact Stress Distribution and Stress-Strain State of Cutting Tool
in Titanium Alloy Machining**

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4AM01	Ян Анькан		14.03.2022

Консультант отделения машиностроения ИШНПТ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Козлов В.Н.	к.т.н., доцент		14.03.2022

Консультант – лингвист ОИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОИЯ ШБИП	Миронова В.Е.	к.филол.н.		14.03.2022

INTRODUCTION

Most cutting tools today are fitted with replaceable polyhedral plates because they can be quickly replaced after maximum permissible wear. In rough cutting it is very important to ensure the strength of these inserts, especially in machining such difficult-to-process materials as titanium alloys. That is why the research of the strength of replaceable polyhedral plates is relevant and important.

Titanium alloys are difficult materials to machine. The deformation mechanisms under machining conditions (high temperatures, contact stresses, strains and strain rates) are very complex and completely different from those of conventional metals such as cast iron and steel.

In today's machining processes there is an increasing emphasis on improving machining performance and reliability of tool work.

The main focus of this work is to investigate distribution of normal and shear contact stresses on the rake surface and on the flank-land wear surface, to plot their epures for different cutting conditions and to calculate the stress-strain state of the tool during machining of titanium alloys.

The use of ANSYS software for the construction of stress distribution in the cutting tool allowed us to analyse the influence of cutting tool geometry and cutting mode on the strength of replaceable polyhedral plates (interchangeable polyhedral inserts), that allowed us in this work to write recommendation for increasing reliability of their work.

1. Determining the technological components of cutting forces

During rectangular free turning of a disc made of titanium alloy BT3-1 with radial feed s (mm/rev) the uncut chip thickness $a = s$ (mm). With the use of Kistler dynamometer we measured technological components of cutting force: tangential component P_z (N), directed tangentially to the transient surface, and radial component P_y (N), directed radially relative to the machining disk in the main plane. Main cutting edge of the cutter was installed in the axis of spindle rotation, so force vector P_z coincided in direction with cutting speed vector v .

After turning, contact length of chip with the rake (*front*) surface c (mm) was measured. However, due to segment nature of chip close to elemental, contact length is very small and unstable, poorly visible, therefore, rather big inaccuracies occur during its measurement.

Using the measured component forces when cutting with a sharp cutter, i.e. practically wear-free on the rake surface, plots of the influence of the uncut chip thickness a on the components P_z and P_y were plotted (Fig. 1).

By extrapolation to a zero uncut chip thickness ($a = 0$ mm), the forces acting on the rake (*front*) and on the rear surface were extracted. The graph $P_y = f(a)$ shows that a large force $P_{y \text{ flank}}$ ($P_{y \text{ h}+\rho}$) (with radius ρ and with wear-land length h_f) and a very small wear chamfer on the rear surface (with length h_f) acts on the cutting edge (with radius ρ) $P_{y \text{ h}+\rho} = 420$ N.

The difference in force $P_y = f(a)$ and this force on the cutting edge $P_{y \text{ h}+\rho} = 420$ N = const is the force on the rake (*front*) surface $P_{y r}$: $P_{y r} = P_y - P_{y \text{ h}+\rho}$.

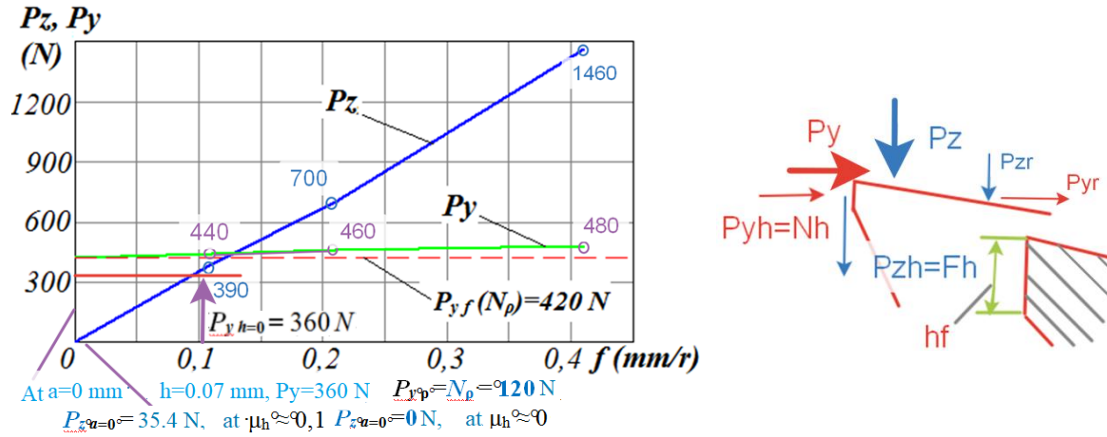


Fig. 1. Influence of uncut chip thickness a (mm) at rectangular free turning of disc with radial feed f (mm/rev) on forces on the rake (front) surface of sharp cutter in titanium alloy BT3-1 machining.
 $\gamma=0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $v = 1$ m/s, $b = 2.3$ mm.

Fig. 1 shows, that for the uncut chip thickness $a=0$ mm the tangential force on the flank surface $P_{z h+p}=F_{h+p}=0$ N, i.e. on a cutting edge is equal to zero, and normal force on a cutting edge $N_{h+p}=P_{y h+p}$ has greater value $N_{h+p}=420$ N, or specific linear force on 1 mm of the cutting edge length $q_{N_{h+p}} = N_{h+p} / \underline{b} = 182,6$ (N/mm).

The graph $P_z = f(a)$ shows that there is no significant force ($P_{z h+p} \approx 0$ N) on the cutting edge (with radius ρ and with wear-land length h_f) and a very small chamfer on the flank (rear) surface with the length h_f . Therefore, the force $P_z = f(a)$ is $P_{z r} = f(a)$.

At rake (front) angle $\gamma=0^\circ$ the normal force on the rake (front) surface $N = P_{z r}$, the tangential force, or force of friction, on the rake (front) surface $F = P_{y r}$.

Width of chip contact with the rake surface b is taken as equal to width of turning disc $b_d = 2,2$ mm, $\gamma=0^\circ$, relief angle $\alpha=18^\circ$. Technological components of cutting force

were measured by Kistler dynamometer.

Because of small contact length of chip with front surface during machining of titanium alloy BT3-1, large value of normal contact stresses and temperature in contact zone at cutting speed $v = 60$ m/min (1 m/s) used in industry for machining of titanium alloy BT3-1, great difficulties occur during research of contact stresses distribution by method of split cutter.

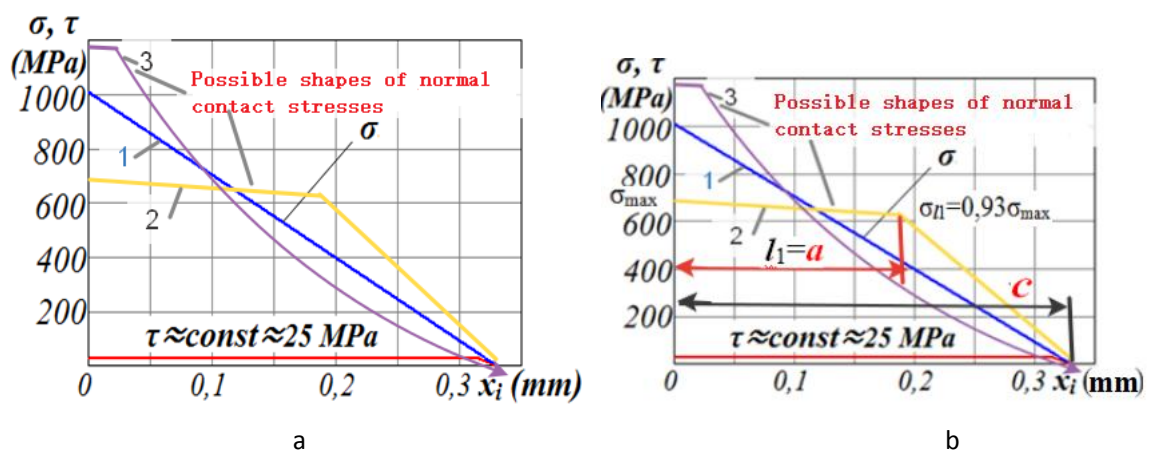


Fig. 2. Possible shapes of normal contact stresses σ on the rake surface of the cutter. BT3-1 – BK8, uncut chip thickness $a = 0.11$ mm, cutting speed $v = 1$ m/s, rake angle $\gamma=0^\circ$

To check the validity of the results, a calculation method can be applied. This assumes three possible shapes of the diagrams, which will allow the calculation of the highest contact stresses of the diagrams on the rake surface (Fig. 2).

The results of the calculation are influenced by the chip contact length c (mm), but due to the variability of its length, two extreme variants will be considered:

- 1) $c = 1.1 \times a$; 2) $c = 3 \times a$.

As a result of experiments it was measured (see Fig.1)

At $a = 0,11$ mm $P_z = 390$ N. At $\gamma=0^\circ$ $N=P_z=390$ N, $F = P_y - N_{h+p} = P_y - 420 = 440 - 420 =$

=20 N.

At $a=0,21$ mm $P_z = 700$ N, $N=P_z = 700$ N, $F = P_y - N_{h+p} = P_y - 420 = 460 - 420 = 40$ N.

At $a=0.41$ mm $P_z = 1460$ N, $N=P_z = 1460$ N, $F = P_y - N_{h+p} = P_y - 420 = 480 - 420 = 60$ N.

After calculating the physical components, the contact stresses on the rake surface can be plotted.

2. Analysis of different uncut chip thickness and contact lengths

Comparison of calculations results of the highest normal stresses σ_{\max} (MPa) on the rake surface during machining of titanium alloy BT3-1 at different shape of normal contact stress and length chip contact c ($c=1.1 \times a$, triangular shape of σ ; $c=3 \times a$, triangular shape of σ ; $c=1.1 \times a$, trapezoidal shape of σ ; $c=3 \times a$, trapezoidal shape of σ) (Fig. 3) showed that trapezoidal shape of normal contact stress σ with $c=1.1 \times a$ meets investigations of contact processes in titanium alloy cutting.

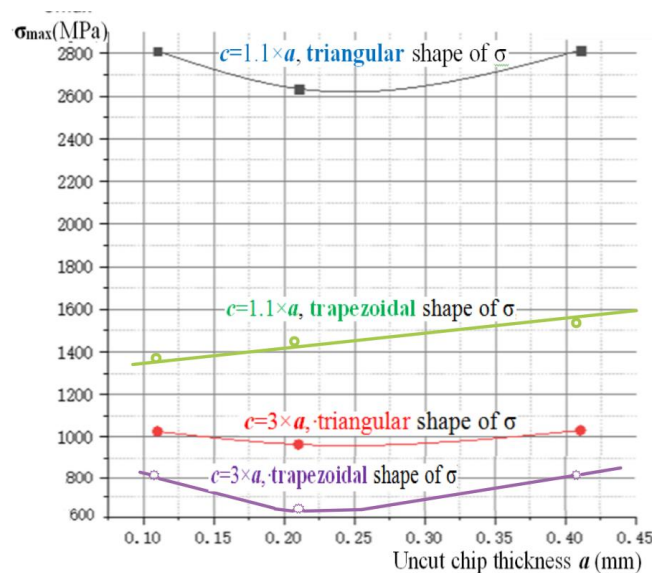


Fig. 3. Influence of the uncut chip thickness a (mm) on the highest normal stresses σ_{\max} (MPa) on the rake surface during machining of titanium alloy. BT3-1 -BK8, $v=60$ m/min, $\gamma=0^\circ$, $b = 2.3$ mm.

Comparison of calculations results of the shear contact stresses τ_{\max} (MPa) on the rake surface during machining of titanium alloy BT3-1 at different length of chip contact c ($c=1.1 \times a$, $c=3 \times a$) (Fig. 4) showed that uniform shape of shear contact stresses τ with $c=1.1 \times a$ meets investigations of contact processes in titanium alloy cutting.

Calculations of the cutting wedge's stress strain state (SSS) and comparison of calculations results of the highest equivalent stresses $\sigma_{e \max}$ (MPa) and strains ε_{\max} (mm) during machining of titanium alloy BT3-1 at different shape of normal contact stress and length of chip

contact c ($c=1.1 \times a$, triangular shape of σ ; $c=3 \times a$, triangular shape of σ ; $c=1.1 \times a$, trapezoidal shape of σ ; $c=3 \times a$, trapezoidal shape of σ) (Fig. 4) showed that trapezoidal shape of normal contact stress σ with $c=1.1 \times a$ meets investigations of SSS in titanium alloy cutting.

Comparison of calculations results

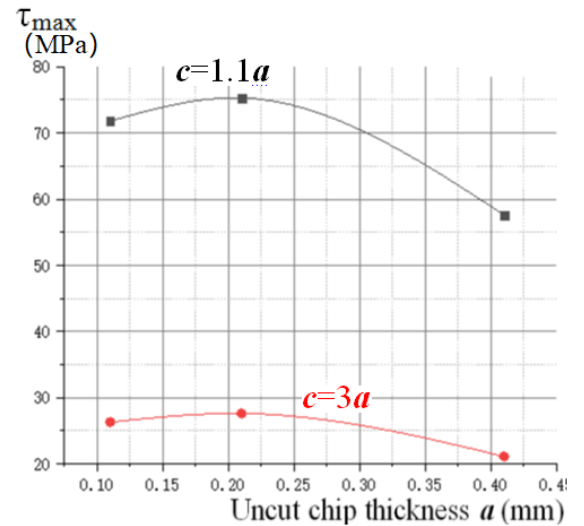


Fig. 4. Influence of the uncut chip thickness a (mm) on the highest shear stresses τ_{\max} (MPa) on the rake surface during machining of titanium alloy. BT3-1 -BK8, $v=60$ m/min, $\gamma=0^\circ$, $b = 2.3$ mm.

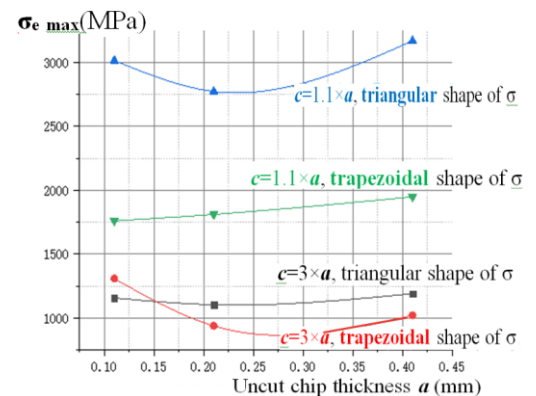


Fig. 5. Influence of the uncut chip thickness a (mm) on the highest equivalent stresses $\sigma_{e \max}$ (MPa) on the rake surface during machining of titanium alloy. BT3-1 -BK8, $v=60$ m/min, $\gamma=0^\circ$, $b = 2.3$ mm.

of the cutting wedge's SSS at different number of sections into which the length of the chip contact with the rake surface is divided for setting external load on the rake surface showed that increasing the number of sections does not significantly increase stresses and deformations in the cutting wedge. Therefore, it was accepted to use a section length of $l_i = 0.1$ mm.

Comparison of the greatest equivalent stresses $\sigma_{e \max}$ (MPa) and strains ϵ_{\max} (mm) in the cutting wedge obtained by loading the rake surface of 3D model of the cutting wedge by diagram with different shape of the diagram normal contact stress σ and the chip contact length showed that they essentially depend on the character of the diagram of normal contact stresses σ , chip contact length with the rake surface c , but do not essentially depend on the uncut chip thickness a : e.g., for the trapezoidal shape (character) of the diagram σ the uncut chip thickness a is 4-fold increased from 0.11 to 0.41 mm, $\sigma_{e \max}$ only 1.14 times more (Fig. 4).

3. A study of the VAT behaviour of a worn cutting wedge using the ANSYS software

Figure 3 shows that the largest equivalent stresses depend significantly on the nature of the diagram of normal contact stresses σ and the contact length of the chip with the rake surface c .

With the triangular shape of the normal contact stresses on the rake surface σ and the chip contact length $c=1.1 \times a$ with the uncut chip thickness $a = 0.11$ mm, the magnitude of the equivalent stresses is greater compared to the trapezoidal character of σ and is unnaturally large.

With the triangular character $c=3 \times a$ the largest equivalent stress $\sigma_{e \max}$ is very small, this is unnatural, that is we prove for the second time that the character of the diagram σ should be trapezoidal.

4. Stress-strain studies on replaceable polyhedral plates

Magnitude of the largest equivalent stresses $\sigma_{e \max}$ at constant $\varphi = 45^\circ$, $\gamma = +7^\circ$, $\alpha = 8^\circ$ at different conditions: tip radius $r = 0.1, 0.8$ and 2 mm; auxiliary angle in the plan $\varphi_1 = 10, 20$ and 45° ; feed rate $s = 0.11, 0.21$ and 0.41 mm/rev, are presented in figure 6.

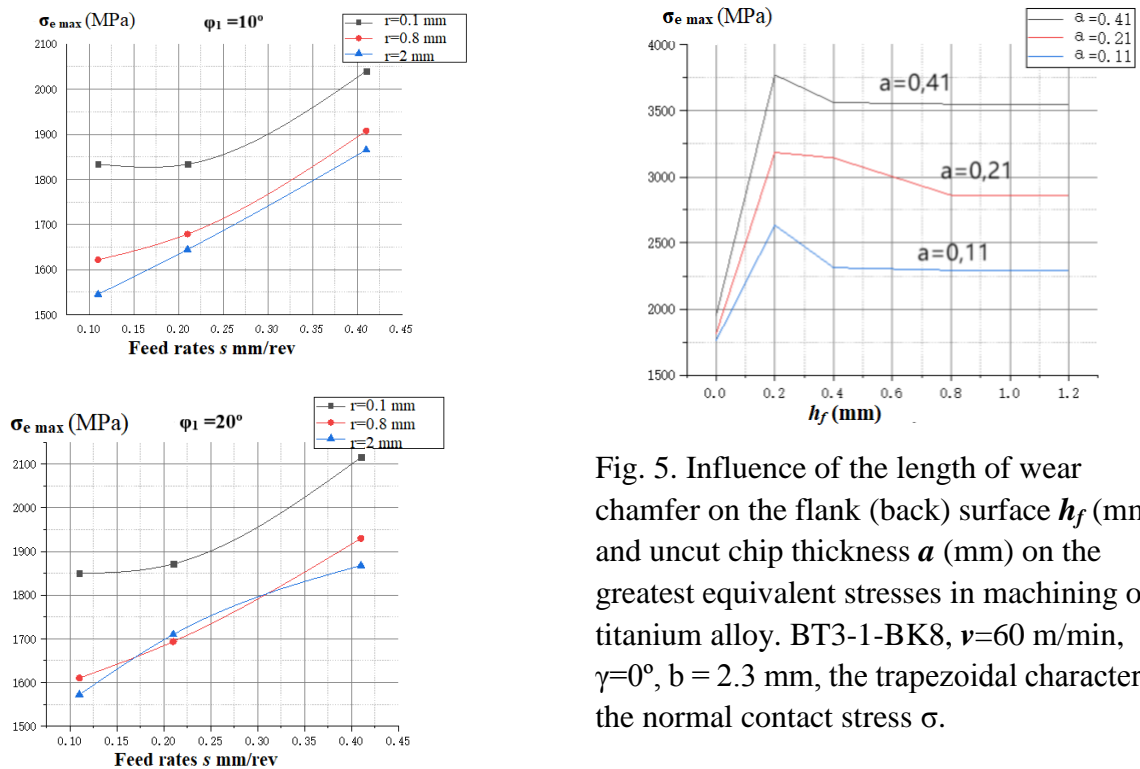


Fig. 5. Influence of the length of wear chamfer on the flank (back) surface h_f (mm) and uncut chip thickness a (mm) on the greatest equivalent stresses in machining of titanium alloy. BT3-1-BK8, $v=60$ m/min, $\gamma=0^\circ$, $b = 2.3$ mm, the trapezoidal character of the normal contact stress σ .

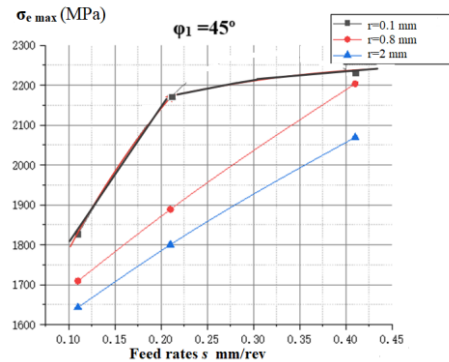


Figure 6. - Magnitude of the largest equivalent stresses $\sigma_{e \max}$ at constant $\varphi = 45^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, and variable tip radius ($r = 0.1, 0.8, 2$ mm), feed rates ($s = 0.11, 0.21$ and 0.41 mm/rev) and auxiliary angle in the plan $\varphi_1 = 10, 20$ and 45° .

With an increase in the tip radius r , the magnitude of the largest equivalent stresses $\sigma_{e \max}$ in the cutting wedge decreases. With an increase of the uncut chip thickness a the largest equivalent stresses is significantly increased.

An increase in the value of the auxiliary angle in the plan φ_1 leads to an increase in $\sigma_{e \max}$ and especially significantly with large feed rate s .

References

1. Development of Metal Cutting Science / V.F. Bobrov, G.I. Granovsky, N.N. Zorev et al. - Moscow: Mashinostroenie, 1967. - 416 p.
2. Contact loads on the cutting surfaces of the tool / Poletika M.F. - Moscow: Mashinostroenie, 1969. - 148 p.
3. Filippov A.V., Proskokov A.V. Investigation of chip formation during metal cutting by digital correlation speckle interferometry. Bulletin of N.E. Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mashinostroenie, 2014, № 2, p. 100-113.
4. Poletika M.F., Uteshev M.Kh. Investigation of cutting process by polarization-optical method. - Proceedings of the Tomsk Polytechnic Institute. 1964. T. 114. pp. 21-32.