

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 материаловедения

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Исследование прочности сменных многогранных пластин методом конечных элементов при обработке стали</b>

УДК 539.4:621.9.06:669.146:517.962

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4AM01	Хэ Лин		04.06.22

Руководитель ВКР

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

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор социально гуманитарных наук ШБИП	Гасанов Магеррам Али оглы	д.э.н.		04.06.22

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение общетехнических дисциплин ШБИП, доцент	Антоневич Ольга Алексеевна	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 Вероника Евгеньевна	к.ф.н.		04.06.22

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
15.04.01 Машиностроение, доцент ОМ ИШНПТ	Мартюшев Н.В.	к.т.н.		04.06.22

**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 материаловедения 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	Хэ Лин

Тема работы:

**Исследование прочности сменных многогранных пластин методом конечных элементов при обработке стали**

Утверждена приказом директора ИШНПТ (дата, номер) 24.02.2022 №55-45/с

Срок сдачи студентом выполненной работы: 04.06.2022

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Повысить надёжность работы сменных многогранных пластин при обработке стали
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	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 стали. Исследование длины контакта стружки с передней поверхностью при переднем угле от -10 до +35° при обработке стали 40Х с толщиной среза от 0,05 до 0,368 мм. Проведение экспериментов по измерению технологических составляющих силы резания. Расчёт физических составляющих силы резания и определение распределения контактных напряжений на

	<p>передней поверхности и фаске износа по задней поверхности.</p> <p>Построение эпюр контактных напряжений и определение зависимости их основных параметров от толщины среза и величины переднего угла.</p> <p>Исследование напряжённно-деформированного состояния режущего инструмента с помощью программы ANSYS при переднем угле от <math>-10^\circ</math> до <math>+35^\circ</math> при обработке стали 40X с толщиной среза от 0,05 до 0,368 мм.</p> <p>Исследование НДС квадратных и трёхгранных сменных многогранных пластинах при несвободном косоугольном точении стали 40X.</p> <p>Исследование НДС при постоянном главном угле в плане <math>\varphi = 45^\circ</math>, переднем угле <math>\gamma = +7^\circ</math>, главном заднем угле <math>\alpha = 8^\circ</math>, при величине вспомогательного угла в плане <math>\varphi_1 = 10, 20</math> и <math>45^\circ</math>, при различном радиусе при вершине <math>r = 0,1; 0,8</math> и <math>2</math> мм и подачи <math>s = 0,07, 0,34</math> и <math>0,52</math> мм/об.</p>
<b>Перечень графического материала</b>	Слайды по литературному обзору, графики влияния толщины среза и переднего угла на длину контакта стружки, эпюры контактных напряжений на передней и задней поверхностях, влияние переднего угла и толщины среза на картины НДС режущих пластин.
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Гасанов Магеррам Али оглы
Социальная ответственность	Антоневич Ольга Алексеевна
Раздел ВКР на иностранном языке	Миронова Вероника Евгеньевна
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:</b>	
<b>Investigation of the Strength of Interchangeable Multifaceted Plates (CMP) by Finite Element Method in Steel Machining</b>	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	25.12.2020
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ01	Хэ Лин		25.12.2020

**Результаты обучения по ООП Автоматизация технологических процессов и производств в машиностроении**

<b>Код компетенции</b>	<b>Наименование компетенции</b>
<b>Универсальные компетенции</b>	
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
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
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
<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК(У)-1	Способность разрабатывать технические задания на проектирование и изготовление машин, приводов, оборудования, систем и нестандартного оборудования и средств технологического оснащения, выбирать оборудование и технологическую оснастку
ПК(У)-2	Способность разрабатывать нормы выработки и технологические нормативы на расход материалов, заготовок, топлива и электроэнергии в машиностроении
ПК(У)-3	Способность оценивать технико-экономическую эффективность проектирования, исследования, изготовления машин, приводов, оборудования, систем, технологических процессов, принимать участие в создании системы менеджмента качества на предприятии
ПК(У)-4	Способность подготавливать заявки на изобретения и промышленные образцы, организовывать работы по осуществлению авторского надзора при изготовлении, монтаже, наладке, испытаниях и с даче в эксплуатацию выпускаемых изделий и объектов машиностроения

ПК(У)-5	Способность разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности на предприятии, оценивать инновационные и технологические риски при внедрении новых технологий, организовывать повышение квалификации и тренинг сотрудников подразделений в области инновационной деятельности и координировать работу персонала при комплексном решении инновационных проблем в машиностроении
ПК(У)-6	Способность разрабатывать мероприятия по комплексному использованию сырья, по замене дефицитных материалов и изысканию способов утилизации отходов машиностроительного производства
ПК(У)-7	Способность организовать развитие творческой инициативы, рационализации, изобретательства, внедрение достижений отечественной и зарубежной науки, техники, использование передового опыта, обеспечивающих эффективную работу подразделения, предприятия
ПК(У)-8	Способность организовать и проводить научные исследования, связанные с разработкой проектов и программ, проводить работы по стандартизации технических средств, систем, процессов оборудования и материалов
ПК(У)-9	Способность разрабатывать физические и математические модели исследуемых машин, приводов, систем, процессов, явлений и объектов, относящихся к профессиональной сфере, разрабатывать методики и организовывать проведение экспериментов с анализом их результатов
ПК(У)-10	Способность и готовность использовать современные психолого-педагогические теории и методы в профессиональной деятельности
ПК(У)-11	Способность подготавливать технические задания на разработку проектных решений, разрабатывать эскизные, технические и рабочие проекты технических разработок с использованием средств автоматизации проектирования и передового опыта разработки конкурентоспособных изделий, участвовать в рассмотрении различной технической документации, подготавливать необходимые обзоры, отзывы, заключения в области профессиональной деятельности
ПК(У)-12	Способность составлять описания принципов действия и устройства проектируемых изделий и объектов с обоснованием принятых технических решений в области профессиональной деятельности
ПК(У)-13	Способность применять новые современные методы разработки технологических процессов изготовления изделий и объектов в сфере профессиональной деятельности с определением рациональных технологических режимов работы специального оборудования в машиностроении

## РЕФЕРАТ

выпускной квалификационной работы студента гр. 4АМ01 Хэ Лин

### **Исследование прочности сменных многогранных пластин методом конечных элементов при обработке стали**

Выпускная квалификационная работа выполнена на 165 страницах, содержит: 82 рисунков, 54 таблицы, 17 источников, 1 приложение.

**Ключевые слова:** сменная многогранная пластина, обрабатываемость стали, 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".

В процессе исследования выполнен обзор и анализ научно-технической литературы по теме магистерской работы, сформулированы цели и задачи исследования. В работе представлены результаты экспериментального исследования влияние толщины среза и переднего угла на технологические и физические составляющие силы резания при использовании сменных многогранных пластин (СМП), которые будут использованы при токарной обработке. Рассмотрено влияние толщины среза и переднего угла на длину контакта стружки, параметры эпюр контактных напряжений на передней и задней поверхностях, 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 стали 40Х для повышения работоспособности режущих пластин.

Область применения: производство машиностроительной продукции.

Экономическая значимость работы достаточно высокая.

В будущем планируется участвовать в организации производства режущих твердосплавных пластин.

## SUMMARY

final qualifying work of the student gr. 4AM01 He Ling

### **Investigation of the strength of replaceable polyhedral plates by the finite element method in steel machining**

The Final Qualifying Work (Diploma Thesis) is executed on 165 pages of the explanatory note, contains: 82 figures, 54 tables, 17 sources, 1 appendix.

Key words: replaceable polyhedral plates, steel machining, contact stresses, tool wear, tool strength, tool stress strain state.

**The object of the study** is a replaceable polyhedral 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".

In the course of the research, a review and analysis of scientific and technical literature on the topic of the master's thesis was carried out, the goals and objectives of the research were formulated. The paper presents the results of an experimental study of the effect of the uncut chip thickness and the rake (front) angle on the technological and physical components of the cutting force when using replaceable polyhedral plates (RPP), which will be used in turning. The influence of the uncut chip thickness and the rake angle on the chip contact length, the parameters of the contact stress diagrams on the rake and flank (rear) surfaces, the stress-state condition (SSC) of the cutting plates are considered. Experimental data on the cutting tool life of the RPP are presented, optimal cutting modes are determined.

During the experiments, a 1K62 lathe, a three-component Kistler turning dynamometer, as well as the ANSYS program for calculating the SSC of cutting plates were used.

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

The results of the work will make it possible to use rational geometric parameters of the RPP and cutting modes when machining 40X steel to improve the performance of the cutting plates.

**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

<b>Введение .....</b>	<b>12</b>
<b>1. Цель и задачи исследования.....</b>	<b>13</b>
<b>2. Литературный обзор .....</b>	<b>15</b>
2.1. Исследования сил резания и распределения контактных напряжений .....	15
2.2. Анализ напряжённо-деформированного состояния режущего клина при обработке стали .....	24
<b>3. Методика выполнения работы .....</b>	<b>29</b>
3.1. Измерение составляющих силы резания .....	29
3.2. Расчёт физических составляющих сил резания .....	29
<b>4. Исследования по теме ВКР .....</b>	<b>33</b>
4.1. Измерение технологических составляющих силы резания и длины контакта стружки с передней поверхностью .....	33
4.2. Построение эпюр контактных напряжений на передней поверхности и определение их основных параметров .....	39
4.3. Исследование распределения контактных напряжений на фаске износа по задней поверхности при обработке стали .....	47
4.4. Расчёт НДС неизношенного простого режущего клина при прямоугольном свободном резании .....	50
4.5. Исследование влияние износа по задней поверхности на НДС режущего клина .....	67
4.6. Напряжения в режущей пластине при несвободном резании стали .....	74
4.6.1. Исследование НДС целых трёхгранных СМП.....	78
4.6.2. Исследование НДС вырезов из СМП.....	87
<b>Заключение .....</b>	<b>99</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>102</b>
<b>5. Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»....</b>	<b>104</b>
Введение.....	105
5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	106
5.1.1 Анализ конкурентных технических решений.....	106

5.1.2 SWOT-анализ .....	107
5.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	112
5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования .....	112
5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения.....	113
5.3 Бюджет научно-технического исследования.....	117
5.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования.....	118
5.3.2 Расчет амортизации специального оборудования .....	120
5.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы .....	121
5.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	123
5.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды .....	124
5.3.6 Накладные расходы .....	125
5.3.7 Бюджетная стоимость НИР.....	125
5.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	127
5.4.1 Интегральный показатель финансовой эффективности .....	127
5.4.2 Интегральные показатели ресурсоэффективности.....	129
5.4.3 Интегральные показатели эффективности всех вариантов .....	130
Выводы по разделу.....	131
<b>6. Раздел «Социальная ответственность».....</b>	<b>133</b>
Введение.....	135
6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	136
6.2. Производственная безопасность.....	139
6.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	140
6.2.2. Расчет уровня производственного фактора .....	145
6.3. Экологическая безопасность.....	149
6.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	151
6.4.1. Наиболее типичной ЧС в 1-ом этаже корпуса 16А, ТПУ .....	151
6.4.2. Рассматриваем две ситуации ЧС .....	151

6.4.3. Разработка превентивных мер по предупреждению ЧС.....	153
6.5. Выводы по разделу.....	154
<b>Приложение II - Раздел на иностранном языке .....</b>	<b>155</b>
Introduction .....	156
The nature of the process .....	156
Conclusion.....	165
References .....	165

## Введение

Проблема прочности режущих инструментов особенно актуальна при черновой обработке, при которой для увеличения производительности стараются использовать наибольшую возможную подачу и глубину резания. Поэтому важно знать эти допустимые пределы с учётом геометрических параметров режущего инструмента. В настоящее время в режущих инструментах используются сменные многогранные пластины (СМП), которые позволяют быстро сменить изношенную вершину без необходимости снятия державки со станка.

В представленном исследовании описана общая процедура измерения и расчёта технологических и физических составляющих силы резания, построения эпюр контактных напряжений на передней поверхности и на фаске износа по задней поверхности режущего инструмента при различной величине переднего угла и толщины среза, приведены результаты расчёта напряжено-деформированного состояния (НДС) СМП с использованием программного обеспечения ANSYS, выполнен анализ полученных картин НДС, даны рекомендации по выбору геометрии и режимах резания при обработке стали 40Х.

Использование в качестве одного из элементов режима резания толщины среза вместо подачи позволяет использовать полученные в проведённых исследованиях данные при любой величине главного угла в плане и любых видах обработки, а не только при точении.

## **1. Цель и задачи исследования**

**Цель работы:** Исследовать прочность сменных многогранных пластин методом конечных элементов при обработке стали.

### **Задачи исследования:**

1. Определить длину контакта стружки с передней поверхностью режущего инструмента при разных передних углах и режимах резания при обработке стали 40Х, вывести эмпирические формулы для её расчёта;

2. Измерить технологические составляющие силы резания и рассчитать её физические составляющие при обработке стали 40Х;

3. Построить эпюры контактных напряжений при обработке стали при разных передних углах и режимах резания;

4. Рассчитать напряжённно-деформированное состояние (НДС) режущего инструмента при разной толщине среза от 0,05 до 0,368мм и передних углах от +35 до -10° ;

5. Определить эмпирические формулы для расчёта основных параметров эпюр контактных напряжений на передней поверхности резца при разных передних углах и режимах резания;

6. Исследовать влияние износа на НДС сменных многогранных пластин (СМП) при обработке стали 40Х;

7. Исследовать влияние подачи, вспомогательного угла в плане и радиуса при вершине на НДС СМП при обработке стали 40Х;

8. Дать рекомендации по применению геометрии, режимов резания и допустимой величине износа по задней поверхности при обработке незакалённой стали 40Х.

### **Научная новизна выполненных исследований**

1. Анализ полученных результатов расчёта НДС простого режущего клина при прямоугольном свободном резании стали 40Х показывает, что увеличение количества участков, на которые разбивается участок контакта стружки с передней поверхностью для задания внешней нагрузки, не влияет на результаты расчёта.

2. Выявлено влияние толщины среза, переднего угла инструмента и длины фаски износа на НДС СМП при обработке стали 40Х;

3. Выявлено влияние подачи, вспомогательного угла в плане и радиуса при вершине на НДС СМП при обработке стали 40Х;

4. Выявлено влияние формы СМП на их НДС при обработке стали 40Х.

## 2. Литературный обзор

### 2.1. Исследования сил резания и распределения контактных напряжений

Для оценки прочности режущего инструмента необходимо рассчитать его напряжённо-деформированное состояние (НДС), основными параметрами которого являются распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}$  (МПа) и нормальных напряжений по осям  $OZ$  ( $\sigma_z$ ),  $OY$  ( $\sigma_y$ ) и  $OX$  ( $\sigma_x$ ), а также распределение общих деформаций  $\varepsilon_{\text{общ}}$  [1, 2]. Принято принимать направление этих осей такое же, что и направление осей технологических составляющих  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$  силы резания (рис. 2.1.1).

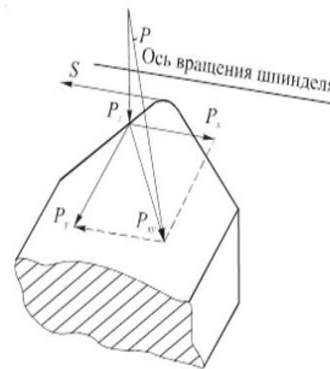


Рис. 2.1.1 – Направление технологических составляющих  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$

При анализе НДС режущей части режущего инструмента (режущего клина) рассчитываются также касательные напряжения, действующие в соответствующих плоскостях:  $\tau_{xy}$  – действуют в плоскости  $XOY$ ;  $\tau_{zy}$  – действуют в плоскости  $ZOY$ ;  $\tau_{zx}$  – действуют в плоскости  $ZOX$ .

Прочность режущей части инструмента более важна при черновой обработке, когда глубина резания  $t$  более 3 мм, а подача  $s$  (в англоязычной литературе обозначается символом  $f$ ) более 0,3 мм/об (рис. 2.1.2, а и б).

При расчёте НДС внешние нагрузки при токарной обработке неизношенным резцом прилагаются к передней поверхности со стороны главной режущей кромки **1**, а также со стороны вспомогательной режущей кромки **2** и округлённой части режущей кромки **3** с радиусом при вершине  $r$  (рис. 2.1.2, а).

При существенной глубине резания  $t$  (более 2 мм), величины вспомогательного угла в плане  $\varphi_1$  более  $20^\circ$  и подаче  $s$  менее 0,35 мм/об доля силового воздействия со стороны вспомогательной режущей кромки принимается незначительной, однако даже небольшие нагрузки от материала

заготовки со стороны вспомогательной режущей кромки приводят к всестороннему сжатию материала стружки в зоне первичной пластической деформации в области вершины инструмента, что немного уменьшает общие силы резания по сравнению со свободным косоугольным резанием [1, 2].

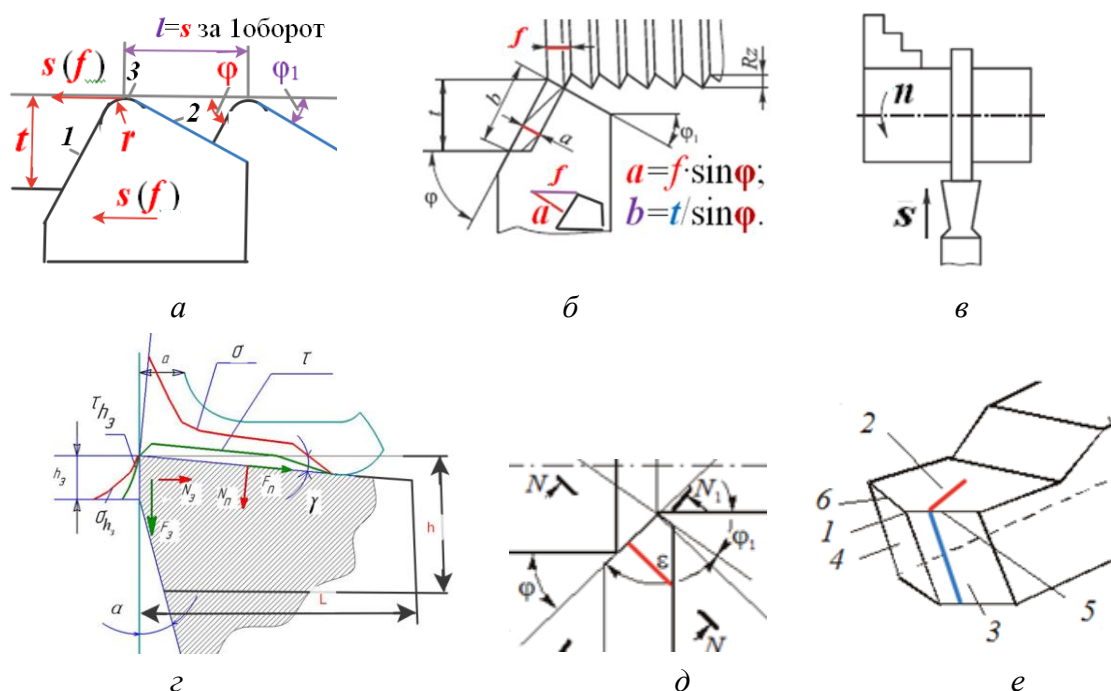


Рис. 2.1.2 – Приведение косоугольного несвободного резания (а, б) к прямоугольному свободному резанию, реализуемому при точении диска с радиальной подачей  $s$  (в) и распределение контактных напряжений на передней и задней поверхности резца (з) в главной секущей плоскости  $N-N$  (д, е).

Силовое воздействие со стороны вспомогательной режущей кромки приводит к всестороннему сжатию материала режущей части инструмента в области его вершины, что позволяет выдерживать бóльшие нагрузки при использовании достаточно хрупкого твёрдосплавного материала инструмента [1, 2].

Внешняя нагрузка может быть приложена в виде сосредоточенных составляющих  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$  (Н) силы резания в точке центра сил, под которой чаще всего принимается точка пересечения диагоналей проекции сечения срезаемого слоя на основную плоскость. Проекция сечения срезаемого слоя на основную плоскость представляет собой неполную трапецию размерами  $s \times t$  или  $a \times b$



(рис. 2.1.2, б). Неполной трапеция получается из-за наличия вспомогательного угла в плане  $\phi_1$  и радиуса при вершине  $r$ . Чем они меньше, тем ближе рассматриваемое сечение к правильной проекции.

С увеличением главного угла в плане  $\phi$  ( $^\circ$ ) уменьшается величина радиальной составляющей  $P_y$  и увеличивается величина осевой составляющей  $P_x$ , величина тангенциальной составляющей  $P_z$  изменяется незначительно и определяется площадью сечения срезаемого слоя  $S = s \times t = a \times b$ , где  $a$  – толщина среза:  $a = s \times \sin \phi$  (мм),  $b$  – ширина среза, рассчитываемая по формуле  $b = t / \sin \phi$ , (рис. 2.1.2, б).

Использование в качестве одного из элементов режима резания толщины среза  $a$  вместо подачи  $s$  (мм/об) позволяет использовать полученные в проведённых исследованиях данные при любой величине главного угла в плане  $\phi$  и любых видах обработки, а не только при точении. Например, при фрезеровании, где во время резания происходит поворот зуба фрезы и непрерывно изменяется толщина среза,  $a_i = s_z \times \sin \psi_i$ , где  $s_z$  – подача на зуб (мм);  $\psi_i$  – центральный угол положения зуба фрезы относительно точки касания его режущей кромки ( $^\circ$ ).

Приложение внешней нагрузки в виде сосредоточенных составляющих силы резания в точке центра сил приводит к нереально огромным напряжениям в точке их приложения, поэтому может быть использовано только для анализа НДС в областях, например, при расчёте прочности державки [3].

Расчёт НДС показал, что даже для этих областей нельзя применять такой вид нагружения из-за огромного отличия НДС по сравнению с реальным [3]. Приложение удельных сил  $q_{Pz} = P_z / (s \times t)$  и  $q_{Pxy} = P_{xy} / (s \times t)$  на небольшой площади размерами  $b \times 0,2c$  для уменьшения концентрации напряжений тоже не даёт приемлемых результатов при расчёте НДС [3].

С вариантом приложения внешней нагрузки в виде эпюр контактных напряжений, имеющих реальное распределение, полученное методами разрезного резца [3], лазерной интерферометрии [4] и характеру, полученному с

использованием поляризационно-оптического метода [5]. Характер распределения эквивалентных напряжений приблизительно соответствует картине НДС при нагрузке по эпюрам на передней поверхности, но наибольшие эквивалентные напряжения на 25% меньше.

Исследования влияния величины заднего угла на силы резания при обработке стали и других материалов, при обработке которых образуется как сливная, так и элементная стружка, не выявили этого влияния. Более того, изменение заднего угла  $\alpha$  от 5 до 18° при обработке стали 40Х и титанового сплава ВТЗ-1 неизношенными резцами не показало изменений общих сил резания, а, значит, силы на задней поверхности неизношенных резцов пренебрежимо малы и, тем более, на ней не стоит исследовать распределение контактных напряжений [3].

Поэтому в данной ВКР необходимо дополнительно исследовать распределение контактных напряжений на передней поверхности и на фаске износа по задней поверхности.

Т.к. НДС в главной секущей плоскости (рис. 2.1.2, б и в) может быть принято плоским, то для упрощения создания 3Д модели резца и задания внешней нагрузки возникает желание ограничиться рассмотрением прямоугольного свободного резания, реализуемом при точении диска с радиальной подачей  $s$  (рис. 2.1.2, в).

Для принятия этой гипотезы необходимо сравнить НДС этих двух условий резания при одинаковой величине толщины среза  $a = s \times \sin \varphi$ , где  $\varphi$  – главный угол в плане (°), что будет одной из задач, решаемых в рассматриваемой выпускной квалификационной работе (ВКР).

Составляющие силы резания напрямую зависят от площади сечения срезаемого слоя  $S = s \times t = a \times b$ , где  $b$  – ширина среза, рассчитываемая по формуле  $b = t / \sin \varphi$  (рис. 2.1.2, б). При равенстве этих произведений силы будут также равны, поэтому рассчитываем ширину и толщину среза при косоугольном

резании, и принимаем ширину диска  $b_d = b = t / \sin \varphi$ , а радиальную подачу  $s_{\text{рад}} = a = s \times \sin \varphi$ .

Для реализации прямоугольного свободного резания (рис. 2.1.2, в) необходимо большое количество заготовок-дисков, что приводит к увеличению стоимости подготовки к экспериментам. При проведении экспериментов при косоугольном несвободном резании подготовка более простая и рациональная – достаточно взять прутки диаметром  $d$  (мм) не менее 40 мм, чтобы жёсткость заготовки была достаточно большая и не приходилось использовать большую частоту вращения шпинделя  $n$  для обеспечения промышленной скорости резания  $v \approx 120-300$  м/мин, т.к.  $n = 1000 \cdot v / (\pi \cdot d)$  (об/мин). К тому же при уменьшении диаметра заготовки на величину  $\Delta d$  изменение скорости резания  $\Delta v$  не будет слишком большим в процентном отношении и не потребует при обработке следующего слоя изменять частоту вращения шпинделя, для чего потребуется использовать или токарный станок с ЧПУ с бесступенчатым регулированием частоты вращения шпинделя  $n_{\text{шп}}$ , или устанавливать электродвигатель с регулируемой частотой вращения  $n_{\text{эл.дв}}$ .

По измеренным во время эксперимента технологическим составляющим  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$  силы резания при косоугольном несвободном резании рассчитываются её физические составляющие: нормальная составляющая  $N$ , действующая перпендикулярно к рассматриваемой передней поверхности, и касательная составляющая  $F$ , действующая касательно к рассматриваемой поверхности (сила трения) [1, 2, 3]. При положительном переднем угле  $\gamma$  схема действия технологических составляющих представлена на рис. 2.1.3 [3].

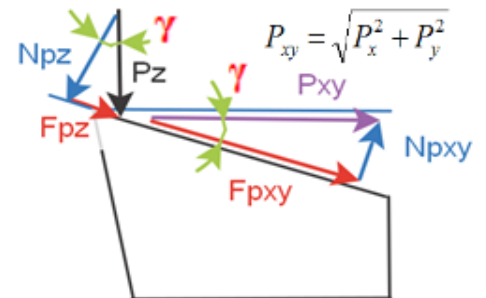


Рис. 2.1.3 – Схема действия технологических ( $P_z$  и  $P_{xy}$ ) и физических ( $N$  и  $F$ ) составляющих силы резания в главной секущей плоскости при положительном переднем угле  $\gamma$

Учитывая направление векторов составляющих силы резания используются формулы расчёта физических составляющих при положительном переднем угле ( $\gamma > 0^\circ$ ):

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

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

Используя график изменения условного коэффициента трения на передней поверхности  $\mu_i = \tau_i / \sigma_i = f(x_i)$  (рис. 2.1.4), где  $x_i$  – расстояние от режущей кромки до рассматриваемой точки  $i$  (мм) в главной секущей плоскости, можно по касательным контактным напряжениям  $\tau$  рассчитать нормальные контактные напряжения  $\sigma$  [3].

Условным коэффициент трения на передней поверхности  $\mu_i$  называется потому, что он существенно отличается от обычного коэффициента трения скольжения  $f$ , рассчитываемого по закону Амонтона-Кулона  $f = F/N$  по своей природе [1, 2, 3].

При резании нет прямого скольжения стружки вдоль передней поверхности. В результате адгезии под действием высокой температуры и большого нормального контактного напряжения прирезцовый слой стружки в области пластического контакта стружки (примерно на первой половине участка контакта) не перемещается, т.е. его скорость равна нулю ( $v_{1-0} = 0$  м/мин) [1, 2, 3].

Вышележащий слой стружки двигается вдоль нижнего «прилипшего» слоя в результате пластической деформации со скоростью  $v_{1-1}$ . Скорость этого

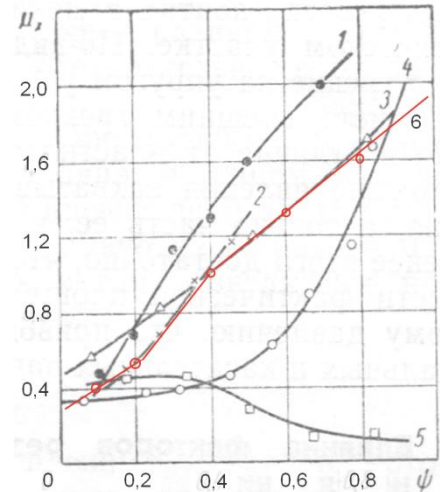


Рис. 2.1.4 – Графики изменения условного коэффициента трения  $\mu_i = \tau_i / \sigma_i$  вдоль длины контакта стружки в зависимости от относительной длины контакта  $\psi_i = x_i / c$  по данным разных авторов: 1 – М.Ф. Полетики и М.Х. Утешева; 2 – Г.С. Андреева и В.М. Заварцевой; 3 – В. Катвинкеля; 4 – Х. Такеямы и С. Усуи; 5 – Х. Чандрешекарана и

движения  $v_{1-1}$  существенно меньше скорости перемещения основного слоя стружки  $v_{стр} (v_1)$ , но больше скорости нижележащего слоя  $v_{1-0}$ , т.е.  $v_{1-0} < v_{1-1} \ll v_1$  (рис. 2.1.5) [1, 2, 3].

Выше лежащий слой стружки перемещается уже относительно этого слоя, но тоже со скоростью, существенно меньшей скорости  $v_1$ , т.е.  $v_{1-0} < v_{1-1} < v_{1-2} \ll v_1$ . Это приводит к искривлению текстуры стружки.

Поэтому в этой области нет постоянного коэффициента трения  $f = F/N = const$ , как при обычном трении скольжения. Условный коэффициент трения на передней поверхности  $\mu_i$  называется только по аналогии с обычным трением, т.к. рассчитывается как отношение касательного контактного напряжения  $\tau_i$  (МПа) к нормальному контактному напряжению  $\sigma_i$  (МПа) в рассматриваемой точке  $i$ :  $\mu_i = \tau_i / \sigma_i \neq const$  [1, 2, 3]. Часто говорится, что в области контакта стружки при  $0 < x_i < c_1$  происходит «внутреннее» трение, т.е. пластическая деформация.

Величина касательного контактного напряжения  $\tau_i$  не зависит от величина нормального контактного напряжения  $\sigma_i$ , а в условиях пластического характера контакта она равна пределу прочности на сдвиг обрабатываемого материала  $\tau_{пред сдв}$  или  $\tau_{пред среза}$  при температуре в рассматриваемой точке  $i$  [1, 2, 3]. Определить экспериментально этот предел прочности на сдвиг для условий резания сложно, т.к. скорость деформаций в зоне контакта стружки с инструментом на несколько порядков больше, чем при традиционных испытаниях [1, 2, 3]. Чем больше скорость деформации, тем больше будет этот параметр, но неизвестно на сколько, т.к. сложно при традиционных испытаниях на прочность создать условия, близкие к резанию [1, 2, 14].

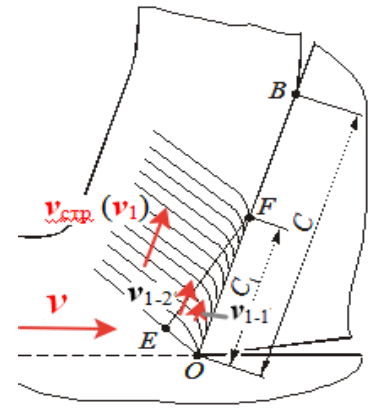


Рис. 2.1.5 – Искривление текстуры из-за застойной зоны **OEF** (зоны вторичных пластических деформаций) (строгание)

Температура в прирезцовом слое стружки очень высокая, до 800°C, что уменьшает прочностные характеристики, но неизвестно на сколько, т.к. это происходит с некоторым замедлением в силу инертности [14].

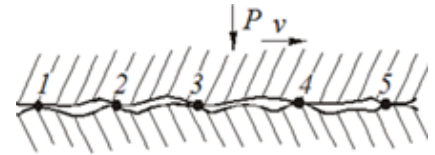


Рис. 2.1.6 – Схватывание приконтактного слоя стружки с передней поверхностью инструмента в местах адгезионного контакта 1-5

На участке контакта стружки при  $x_i > c_1$ , т.е. вне зоны пластического контакта, всё равно нет внешнего трения скольжения: из-за высокой температуры приконтактного слоя стружки и его химической активности из-за чистоты, т.к. он ещё не окислен, происходит периодическое «схватывание» (прилипание, приваривание) с поверхностью инструмента и последующий отрыв (рис. 2.1.6) [1, 2, 3]. Поэтому на этом участке условный коэффициент трения гораздо больше обычного коэффициента трения скольжения «сталь-по стали»  $f = 0,1-0,15$  и составляет  $\mu_{cp} = 1,1-1,9$ .

По нашему мнению, увеличение условного коэффициента трения  $\mu_i$  при отдалении от режущей кромки связано с уменьшением температуры, что приводит к увеличению предела прочности материала приконтактного слоя стружки, в том числе и в местах «схватывания» с поверхностью инструмента.

Исследования удельной силы трения  $q_F$  (МПа) показали, что она существенно зависит от обрабатываемого материала, но не зависит от скорости резания и мало зависит от переднего угла (рис. 2.1.7 и 2.1.8), что говорит о пластическом характере контакта стружки [1].

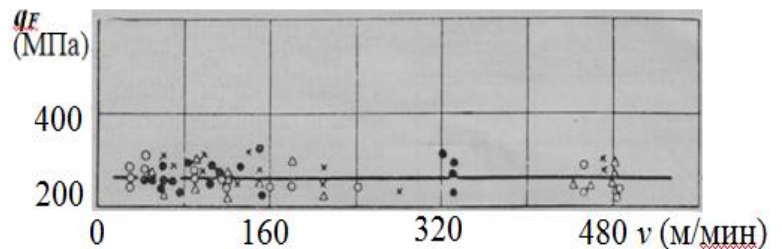


Рис. 2.1.7. Зависимость удельной силы трения  $q_F$  от скорости резания  $v$  при обработке стали 12ХН3 резцом с различными передними углами  $\gamma$ :

○ -  $\gamma = -10^\circ$ ;  $\Delta$  -  $\gamma = 0^\circ$ ;  $\square$  -  $\gamma = +10^\circ$ ;  $+$  -  $\gamma = +20^\circ$  [1].

При увеличении прочности обрабатываемого материала удельная сила трения  $q_F$  увеличивается прямо пропорционально [1].

Для расчёта касательного контактного напряжения на передней поверхности  $\tau$  на первом участке, где оно неизменно (рис. 2.1.2, *з*). Учитывая, что при обработке стали длина этого участка пластического

контакта стружки  $c_1$  равна половине длине контакта стружки  $c$  [1, 2, 3], т.е.  $c_1 = 0,5 \cdot c$ , и простой характер эпюры касательных контактных напряжений  $\tau$  (рис. 2.1.9), можно использовать формулу [3]:

$$\tau_{\max} = \tau_{\text{const}} = F / (c \times 0,75 \times b) \text{ (Н/мм}^2\text{) или (МПа)}.$$

Эпюра нормальных контактных напряжений  $\sigma$  строится относительно эпюры касательных контактных напряжений  $\tau$  с учётом изменения условного коэффициента трения  $\mu_i = \tau_i / \sigma_i = f(\psi_i)$ , где  $\psi$  – относительная длина контакта,  $\psi_i = x_i / c$  (рис. 2.1.4) [2, 6].

Построение эпюр контактных напряжений очень трудоёмкий процесс, который сводится к определению величины наибольшего нормального контактного напряжения  $\sigma_{\max}$  непосредственно у режущей кромки путём сравнения нормальной силы  $N_\sigma$ , полученной по эпюре  $\sigma$ , с величиной нормальной силы  $N_{\text{эксп}}$ , полученной экспериментально, т.е. чтобы  $N_\sigma \approx N_{\text{эксп}}$  [3].

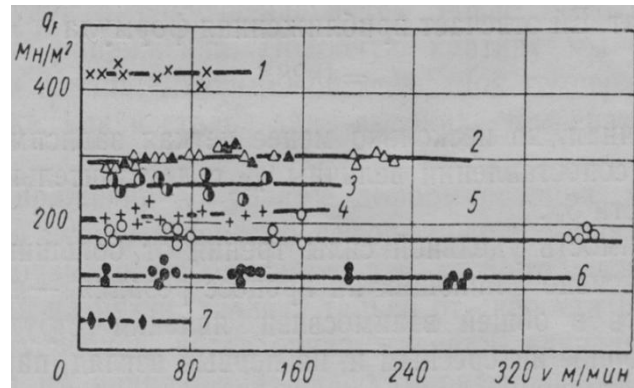


Рис. 2.1.8. Влияние скорости резания  $v$  на удельную силу трения  $q_F$  ( $1 \text{ MN/m}^2 = 1 \text{ МПа}$ ) при обработке различных материалов: 1 – бронза БрБ2,  $HB$  320; 2 – бронза Бр.Б2,  $HB$  200 и сталь У12 (отожженная); 3 – сталь 12ХН3 ( $q_F \approx 262 \text{ МПа}$ ); 4 – бронза Бр.Б2,  $HB$  110; 5 – железо Армко; 6 – медь; 7 – кадмий [1].

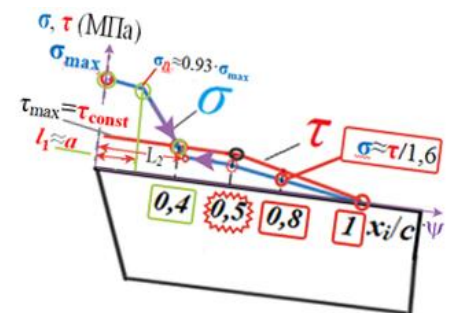


Рис. 2.1.9 – Основные опорные точки при построении эпюр и их параметры:  $\sigma_{\text{const}} = \sigma_{L_2}$ ,  $L_2$ ,  $\tau_{\text{const}}$ ,  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{II}$

Определение  $\sigma_{\max}$  представляет особый интерес, т.к. определить экспериментально этот параметр невозможно ни одним способом: метод разрезного резца [1, 2, 3] не позволяет это сделать из-за выкрашивания или даже поломки режущих пластин при попытках приблизиться ближе 0,2 мм к режущей кромке, а методы лазерной интерферометрии [4] и поляризационно-оптический [1, 2, 5] не позволяют получить чёткую картину разделения полос у режущей кромки.

Остальные основные параметры эпюры  $\sigma$  ( $\sigma_{\text{const}} = \sigma_{L_2}$ ,  $L_2$ ) (рис. 2.1.9) определяются однозначно через условный коэффициент трения  $\mu_i$  относительно эпюры касательных контактных напряжений  $\tau$ , т.е.  $\sigma_i = \tau_i / \mu_i$  [2, 6].

## 2.2. Анализ напряжённо-деформированного состояния режущего клина при обработке стали

При косоугольном несвободном резании особое внимание уделяется напряжениям в главной секущей плоскости (рис. 2.2.1).

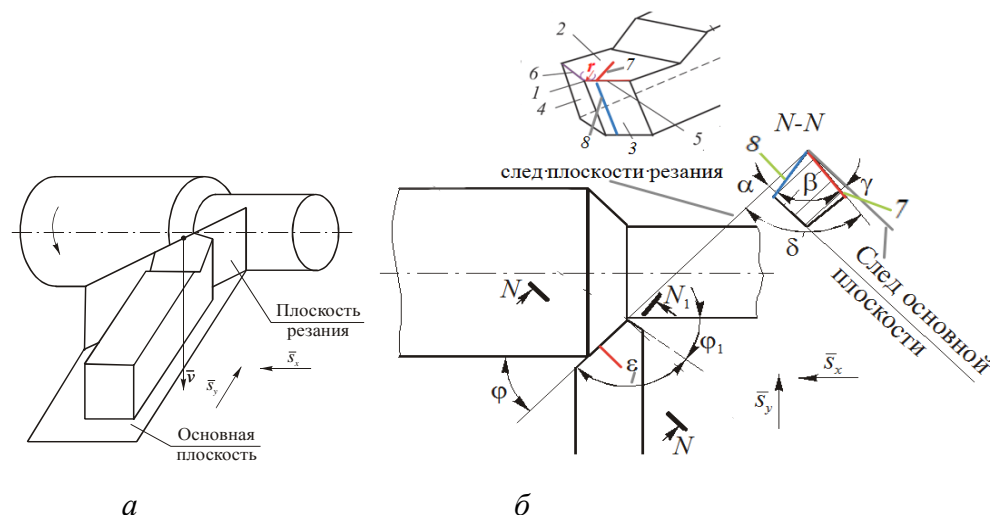


Рис. 2.2.1 – Положение основной плоскости и плоскости резания (а) и

При расположении этой плоскости на расстоянии более двух-трёх радиусов при вершине  $r$  от вершины инструмента напряжённое состояние



считается приближённым к плоскому, т.е. во всех главных секущих плоскостях, за исключением участка контакта режущей кромки с необработанной поверхностью, наблюдается одинаковое НДС [1, 2].

Поскольку основная внешняя нагрузка от силы резания приходится на главную режущую кромку, т.е. на 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 нагрузки, действующей со стороны вспомогательной режущей кромки б (рис. 2.2.1, б).

Неопределённость нагрузки со стороны вспомогательной режущей кромки вызвана сложностью **экспериментального** исследования её влияния на контактные напряжения в этой области из-за объёмного деформированного состояния вблизи вершины [1, 2]. С другой стороны, это влияние на НДС режущей части незначительно из-за меньшей, по сравнению с главной режущей кромки, внешней нагрузки, особенно при небольшой подаче  $s$  (в англоязычной литературе  $f$ ) (менее 0,3 мм/об) и большом вспомогательном угле в плане  $\varphi_1$  (более  $20^\circ$ ).

Расчёт НДС режущего клина обычно выполняется МКЭ с использованием программы Ansys (ANSYS). После создания 3D модели с необходимыми размерами задаются направления осей, которые соответствуют направлению осей технологических составляющих силы резания (рис. 2.2.2).

Основные этапы использования программы:

- 1) Создание 3D модели и задание физико-механических свойств её материала;
- 2) Задание формы и размеров конечных элементов;
- 3) Задание направления осей OZ, OY, OX (OXY);
- 5) Задание внешних связей (опорных поверхностей), т.е. закрепление модели;

- 6) Приложение внешних нагрузок;
- 7) Задание исследуемых параметров (напряжений по осям, эквивалентных напряжений, деформаций, температуры и т.п.)
- 8) Расчёт распределения напряжений, деформаций, температур, их анализ.

Если рассматривается прямоугольное свободное резание диска с радиальной подачей  $s$ , то направление оси  $OX$  задаётся вдоль режущей кромки. Разбивка 3Д модели на конечные элементы выполняется таким образом, чтобы их размеры не превышали 0,1 мм в области контакта стружки и заготовки с режущей частью.

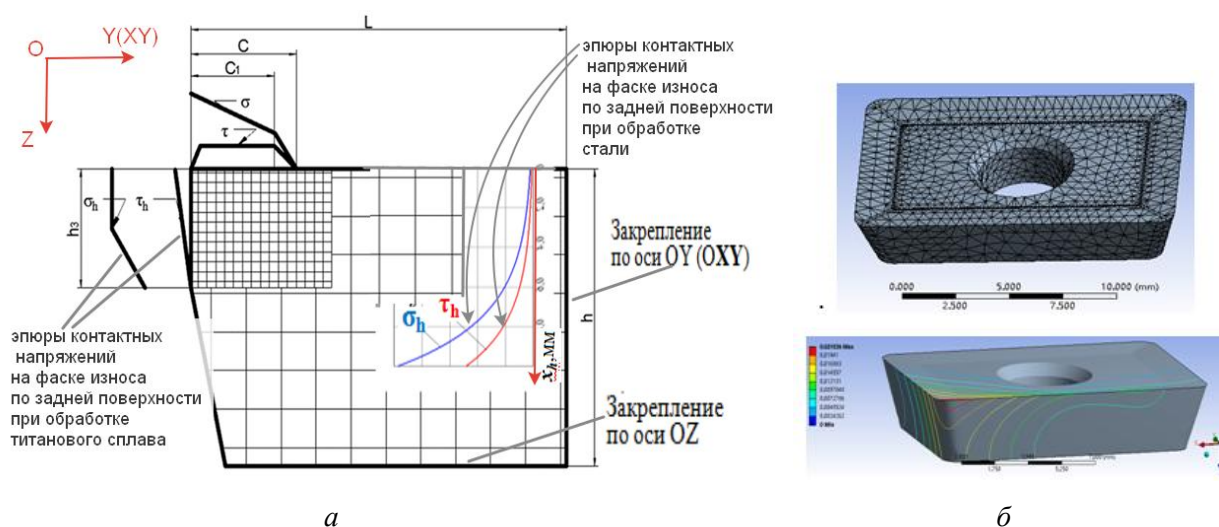


Рис. 2.2.2 – Схема 3Д модели резца, закрепление и приложение внешней нагрузки (а), пример выбора сетки конечных элементов и результат расчёта (б)

В результате анализа литературы по теме ВКР были определены следующие задачи, которые пока не были в достаточной степени изучены отечественными и зарубежными исследователями. В качестве обрабатываемого материала была выбрана сталь 40Х, т.к. эта марка стали широко используется в промышленности для изготовления деталей различного назначения как в незакалённом, так и в закалённом состоянии.

### **Задачи исследований**

1. Определить длину контакта стружки с передней поверхностью режущего инструмента при разных передних углах и режимах резания при обработке стали 40Х, вывести эмпирические формулы для её расчёта;

2. Измерить технологические составляющие силы резания и рассчитать её физические составляющие при разных передних углах при обработке стали 40Х;

3. Построить эпюры контактных напряжений при обработке стали при разных передних углах и режимах резания;

4. Рассчитать напряжённо-деформированное состояние (НДС) режущего инструмента при обработке стали 40Х при разной толщине среза от 0,05 до 0,368мм и передних углах от +35 до -10°;

5. Определить эмпирические формулы для расчёта основных параметров эпюр контактных напряжений на передней поверхности резца при разных передних углах и режимах резания при обработке стали 40Х;

6. Исследовать влияние износа на НДС сменных многогранных пластин (СМП) при обработке стали 40Х;

7. Исследовать влияние подачи, вспомогательного угла в плане и радиуса при вершине на НДС СМП при обработке стали 40Х;

8. Дать рекомендации по применению геометрии, режимов резания и допустимой величине износа по задней поверхности при обработке незакалённой стали 40Х.

### 3. Методика выполнения работы

#### 3.1. Измерение составляющих силы резания

Точное, быстрое и удобное измерение силы резания оказывает большое влияние на качество рабочего процесса и результаты работы. В исследовании, представленном в данной работе, использовался динамометр Kistler модели 9257B с комплектом аппаратуры (рис. 3.1.1.) с компьютером и монитором, позволяющим не только измерять силу резания, но и получать график ее изменения, запоминать результаты измерений.



Рис. 3.1.1 – Установка режущего инструмента в динамометр Kistler 9257B на станке и используемый измерительный комплекс для измерения технологических составляющих  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$  силы резания

#### 3.2. Расчёт физических составляющих сил резания

При экспериментальном исследовании осуществляется точение заготовки с использованием динамометра и измеряются технологические составляющие  $P_z$ ,  $P_x$  и  $P_y$  силы резания (Н).

Составляющие  $P_x$  и  $P_y$  складываясь, дают промежуточную равнодействующую  $P_{xy}$ , лежащую в основной плоскости, т.е.

$$\vec{R}_{xy} = \vec{P}_x + \vec{P}_y \quad P_{xy} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$$

Для всех подачи рассчитать физические составляющие силы резания  $N$  и  $F$  по технологическим составляющим  $P_z$  и  $P_{xy}$  при разном переднем угле  $\gamma$  по формулам.

1. При переднем угле  $\gamma > 0^\circ$ :

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

$$N = N_{Pz} - N_{Pxy} = P_z \times \cos \gamma - P_{xy} \times \sin \gamma; \quad (1)$$

$$F = F_{Pxy} - F_{Pz} = P_{xy} \times \cos \gamma - P_z \times \sin \gamma. \quad (2)$$

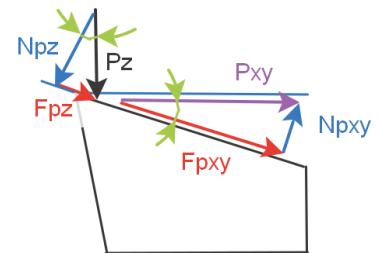


Рис. 3.2.1 – Составляющие силы резания в главной секущей плоскости при  $\gamma > 0^\circ$

2. При переднем угле  $\gamma = 0^\circ$  физические составляющие силы резания  $N$  и  $F$  равны технологическим составляющим  $P_z$  и  $P_{xy}$ :  $N = P_z, F = P_{xy}$ .

3. При переднем угле  $\gamma < 0^\circ$ :

$$N = N_{Pz} + N_{Pxy} = P_z \times \cos \gamma + P_{xy} \times \sin \gamma; \quad (3)$$

$$F = F_{Pxy} - F_{Pz} = P_{xy} \times \cos \gamma - P_z \times \sin \gamma. \quad (4)$$

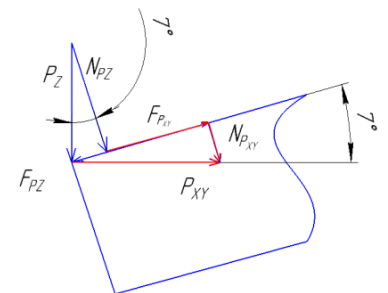


Рис. 3.2.2 – Составляющие силы резания в главной секущей плоскости при  $\gamma < 0^\circ$

Если известна удельная сила резания, то можно рассчитать составляющие силы резания без измерения динамометром. Удельная сила резания может быть задана на единицу длины режущей кромки (линейная удельная сила резания):  $q_{Pxy} = P_{xy}/b$  (Н/мм длины реж. кромки) и  $q_{Pz} = P_z/b$

(Н/мм длины реж. кромки), где  $b$  – длина контакта режущей кромки с поверхностью резания  $b = t/\sin\varphi$ .

В этом случае составляющие силы резания можно рассчитать по формулам:  $P_{xy} = q_{P_{xy}} \times b$  (Н), а также  $P_z = q_{P_z} \times b$  (Н).

Если удельная сила резания задана на площадь срезаемого слоя, т.е.  $q_{P_{xy}} = P_{xy}/(s \times t)$  (Н/мм<sup>2</sup>) или  $q_{P_{xy}} = P_{xy}/(a \times b)$  (Н/мм<sup>2</sup>);  $q_{P_z} = P_z/(s \times t)$  (Н/мм<sup>2</sup>), то силы рассчитываются по формулам:  $P_{xy} = q_{P_{xy}} \times s \times t$  (Н),  $P_z = q_{P_z} \times s \times t$  (Н).

Удельная сила резания может быть рассчитана по экспериментальным данным, т.е. после измерения сил резания, или определена по справочнику для соответствующего обрабатываемого материала, геометрии инструмента, режимов резания, степени износа инструмента, используемой марки смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ).

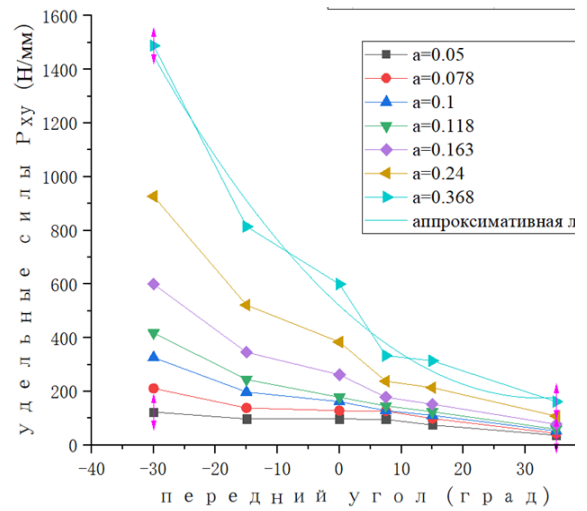


Рис. 3.2.3 – Влияние переднего угла  $\gamma$  (°) на удельную силу резания,  $q_{P_{xy}}$  (Н/мм) при разных толщинах среза  $a$  (мм)

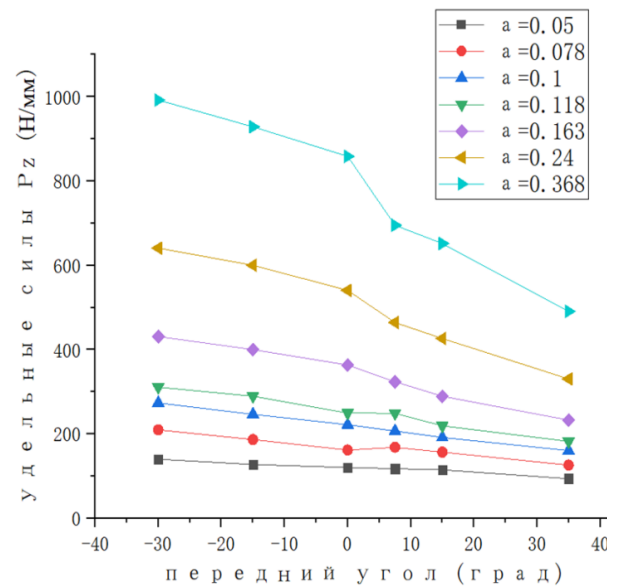


Рис. 3.2.4 – Влияние переднего угла  $\gamma$  (°) на удельную силу резания,  $q_{P_z}$  (Н/мм) при разных толщинах среза  $a$  (мм)

На рис. 3.2.3 представлены графики влияния толщины среза  $a$  (мм) и величины переднего угла  $\gamma$  на величину удельной силы  $P_{xy}$ .

По графикам рис. 3.2.3 были определены уравнения  $q_{P_{xy}} = f(a)$  для наибольшей толщины среза  $a$ , т.к. основной интерес представляет черновая обработка. Для  $a = 0,368$  мм/об с помощью программного обеспечения OriginLab было получено уравнение, довольно хорошо определяющее график  $q_{P_{xy}} = f(a)$  (изображён сплошной кривой линией):

$$q_{P_{xy}} = 519,7 - 21,2a + 0,326a^2 \text{ (Н/мм)} \quad (5)$$

По графикам рис. 3.2.4 были построены графики влияния толщины среза  $a$  (мм) и величины переднего угла  $\gamma$  на величину удельных сил  $P_z$ , были определены уравнения  $q_{P_z} = f(a)$  для  $a = 0,368$  мм с помощью программного обеспечения OriginLab:

$$\text{Для } a = 0,368 \text{ мм и } \gamma = +7...+35(^{\circ}), \quad q_{P_z} = -8,045a + 772,375 \text{ (Н/мм)}; \quad (6)$$

$$\text{Для } a = 0,368 \text{ мм и } \gamma = -30...+0(^{\circ}), \quad q_{P_z} = -4,45a + 859,6 \text{ (Н/мм)}. \quad (7)$$

При выполнении работы помимо измерения технологических составляющих  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  (Н) силы резания измерялась длина контакта стружки  $c$  (мм) с использованием микроскопа «Мир».



## 4. Исследования по теме ВКР

### 4.1. Измерение технологических составляющих силы резания и длины контакта стружки с передней поверхностью

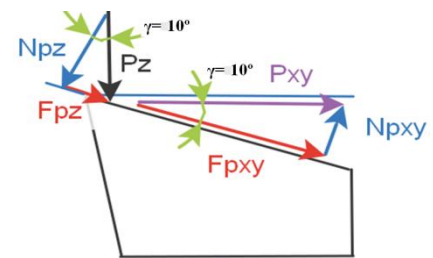
При обработке стали 40Х, наиболее часто используемом в производстве, наибольшая доля нагрузки от силы резания приходится на главную режущую кромку, что позволяет рассматривать напряжённо-деформированное состояние (НДС) режущего инструмента в главной секущей плоскости как плоское (см. рис. 4.1.1 б), и поэтому её параметры могут быть рассчитаны по уравнению

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

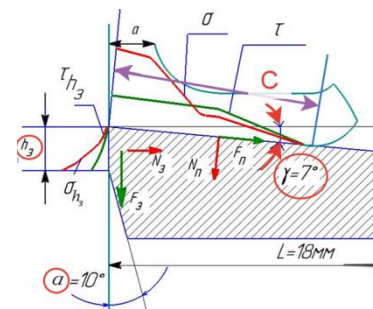
После измерения технологических составляющих  $P_z$ ,  $P_x$  и  $P_y$  силы резания рассчитывалась результирующая радиальной  $P_y$  и осевой  $P_x$  сил, действующих в основной плоскости, сила  $P_{xy}$ :  $P_{xy} = (P_x^2 + P_y^2)^{1/2}$ , которая принималась как действующая в главной секущей плоскости.

Одна из физических составляющих силы резания – касательная к передней поверхности сила  $F$ , рассчитывается исходя из схемы действия технологических и физических составляющих силы резания (см. рис. 4.1.1 а). При положительном переднем угле  $\gamma$ :

$$F = F_{P_{xy}} + F_{P_z} = P_{xy} \times \cos \gamma + P_z \times \sin \gamma, \quad (4.1.1)$$



а



б

Рис. 4.1.1 – Составляющие силы резания (а), и распределение контактных напряжений на поверхностях резца (б).

Другая **физическая** составляющая силы резания – **нормальная** (**перпендикулярная** к передней поверхности) сила  $N$ , также рассчитывается исходя из схемы действия технологических и физических составляющих силы резания (см. рис. 4.1.1 а). При положительном переднем угле  $\gamma$ :

$$N = N_{Pz} - N_{Pxy} = P_z \times \cos \gamma - P_{xy} \times \sin \gamma. \quad (4.1.2)$$

При **отрицательной** величине переднего угла  $\gamma$  используются немного другие уравнения, полученные из рис. 4.1.2:

$$N = N_{Pz} + N_{Pxy} = P_z \times \cos \gamma + P_{xy} \times \sin \gamma; \quad (4.1.3)$$

$$F = F_{Pxy} - F_{Pz} = P_{xy} \times \cos \gamma - P_z \times \sin \gamma. \quad (4.1.4)$$

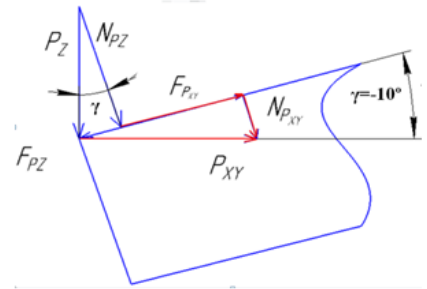


Рис. 4.1.2 – Составляющие силы резания на передней поверхности.

Результаты измерения технологических составляющих силы резания с использованием динамометра Kistler и расчёта физических составляющих представлены в таблице 4.1.1.

Табл. 4.1.1 –Силы резания, рассчитанные по удельным силам резания, полученных из экспериментов при постоянной условной глубине резания  $t=2$  мм. Сталь 40Х-Т15К6,  $v=120$  м/мин,  $t=1,99$  мм,  $\varphi=45^\circ$ ,  $b=2,82$ мм,  $\varphi_1=45^\circ$ ,  $\lambda=0^\circ$ ,  $r=0,1$  мм,  $\alpha=8^\circ$ .

$a$ , мм	$s$ , мм/об	Технологические средние силы при устан. резании при $t=1,99$ мм и $\gamma = +7^\circ$ , Н			Физические составляющие силы при устан. резании при $t=1,99$ мм $\gamma = +7^\circ$ , Н			Технологические силы (Н) при устан. резании при $t=1,99$ мм, $\gamma = +15^\circ$ , Н			Физические составляющие силы при устан. резании при $t=1,99$ мм $\gamma = +15^\circ$ , Н		
		$P_{xy\text{cp}}$	$P_{z\text{cp}}$	$\mu_{\text{cp}}$	$F$	$N$	$\mu_{\text{cp}}$	$P_{xy}$	$P_z$	$\mu_{\text{cp}}$	$F$	$N$	$\mu_{\text{cp}}$
0,05	0,07	286	443	0,646	338	405	0,83	223	433	0,516	327	360	0,909
0,078	0,11	396	619	0,640	469	566	0,83	309	577	0,536	448	477	0,939
0,163	0,23	742	1216	0,610	885	1117	0,79	635	1087	0,584	894	886	1,010
0,240	0,34	961	1735	0,554	1165	1606	0,73	864	1592	0,543	1247	1314	0,949
0,368	0,52	1144	2370	0,483	1425	2214	0,64	1078	2222	0,485	1616	1867	0,866
$a$ , мм	$s$ , мм/об	Технологические средние силы (Н) при устан. резании при $t=1,99$ мм и $\gamma = +25^\circ$ , Н			Физические составляющие силы при устан. резании при $t=1,99$ мм и $\gamma = +25^\circ$ , Н			Технологические силы (Н) при устан. резании при $t=1,99$ мм и $\gamma = +35^\circ$ , Н			Физические составляющие силы при устан. резании при $t=1,99$ мм и $\gamma = +35^\circ$ , Н		
		$P_{xy\text{cp}}$	$P_{z\text{cp}}$	$\mu_{\text{cp}}$	$F$	$N$	$\mu_{\text{cp}}$	$P_{xy}$	$P_z$	$\mu_{\text{cp}}$	$F$	$N$	$\mu_{\text{cp}}$
0,05	0,07	167	394	0,646	318	286	1.111	110	354	0.313	294	226	1.298
0,078	0,11	223	520	0,640	422	377	1.119	137	463	0.295	378	301	1.255
0,163	0,23	479	981	0,610	849	686	1.237	324	874	0.370	767	530	1.445
0,240	0,34	650	1414	0,554	1187	1007	1.179	436	1234	0.353	1065	761	1.400
0,368	0,52	817	1948	0,483	1564	1420	1.101	556	1674	0.332	1416	1059	1.346

Табл. 4.1.2 – Силы резания, рассчитанные по удельным силам резания, полученных из экспериментов при постоянной глубине резания  $t=1,99$  мм при  $\gamma=-10^\circ$ , Сталь 40X - Т15К6,  $v=120$  м/мин.

$a$ , мм	$s$ , мм/об	Технологические средние силы при устан. резании при $t=1,99$ мм и $\gamma = -10^\circ$ , Н			Физические составляющие силы при устан. резании при $t=1,99$ мм $\gamma = -10^\circ$ , Н		
		$P_{xy\text{cp}}$	$P_{z\text{cp}}$	$\mu_{\text{cp}}$	$F$	$N$	$\mu_{\text{cp}}$
0,05	0,07	429,4	463	0,927	342	530	0,645
0,078	0,11	592	706	0,840	460	798	0,576
0,163	0,23	960	1516	0,633	682	1660	0,411
0,240	0,34	1410	2068	0,543	1029	2281	0,451
0,368	0,52	2155	2641	0,816	1664	2975	0,559

Табл. 4.1.3 – Силы резания, рассчитанные по удельным силам резания, полученных из экспериментов при постоянной глубине резания  $t=1,99$  мм при  $\gamma=0^\circ$ , Сталь 40X - Т15К6,  $v=120$  м/мин.

$a$ , мм	$s$ , мм/об	Технологические средние силы при устан. резании при $t=1,99$ мм и $\gamma = 0^\circ$ , Н			Физические составляющие силы при устан. резании при $t=1,99$ мм $\gamma = 0^\circ$ , Н		
		$P_{xy\text{cp}}$	$P_{z\text{cp}}$	$\mu_{\text{cp}}$	$F$	$N$	$\mu_{\text{cp}}$
0,05	0,07	341	451	0,756	341	451	0,756
0,078	0,11	472	656	0,720	472	656	0,720
0,163	0,23	836	1328	0,630	836	1328	0,630
0,240	0,34	1162	1859	0,625	1162	1859	0,625
0,368	0,52	1587	2500	0,635	1587	2500	0,635

Длина контакта  $c$  стружки с передней поверхностью резца измерялась экспериментально после резания, после чего были построены графики, которые показывают изменение длины контакта  $c$  (мм) в зависимости от переднего угла  $\gamma$  ( $^\circ$ ) (рис. 4.1.2) и толщины среза  $a$  (мм):  $a=s \times \sin\varphi$ , где  $s$  – подача (мм/об) ;  $\varphi$  – главный угол в плане.

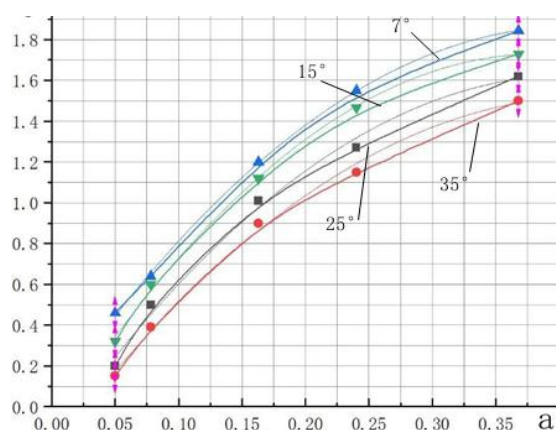


Рис. 4.1.3 – Влияние толщины среза и переднего угла на длину контакта стружки с передней поверхностью резца при обработке стали 40X.

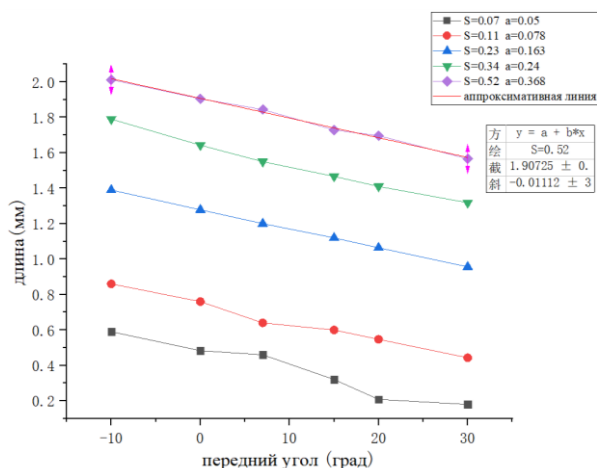


Рис. 4.1.4 – Графики изменения длины контакта стружки  $c$  (мм) с передней поверхностью резца в зависимости от переднего угла  $\gamma$  ( $^\circ$ ) и толщины среза  $a$  (мм) при  $\varphi = 45^\circ$

По графикам рис 4.1.3 были определены уравнения  $c = f(a)$  с помощью программного обеспечения **OriginLab**:

$$\text{Если } \gamma=7^\circ, \text{ длина контакта } c=0,026+8,955a-10,903a^2 \text{ (мм);} \quad (4.1.5)$$

$$\text{Если } \gamma=15^\circ, \text{ длина контакта } c=-0,103+9,564a-12,483a^2 \text{ (мм);} \quad (4.1.6)$$

$$\text{Если } \gamma=25^\circ, \text{ длина контакта } c=-0,016+8,728a-10,638a^2 \text{ (мм);} \quad (4.1.7)$$

$$\text{Если } \gamma=35^\circ, \text{ длина контакта } c=-0,205+8,105a-9,507a^2 \text{ (мм).} \quad (4.1.8).$$

Также были построены графики изменения длины контакта стружки  $c$  при изменении переднего угла  $\gamma$  при разной толщине среза  $a$  (рис. 4.1.4). На этом рисунке более чётко видно увеличение длины контакта  $c$  при уменьшении

переднего угла  $\gamma$  и при увеличении толщины среза  $a$ , видна прямо пропорциональная зависимость.

По графикам рис. 4.1.4 были определены уравнения  $c = f(\gamma)$  для  $s = 0,07-0,52$  мм/об с помощью программного обеспечения **OriginLab**:

Для подачи  $s=0,07$  мм/об и  $\varphi = 45^\circ$   $a=0,05$  мм, длина контакта  $c = 0,5 - 0,01 \cdot \gamma$  (мм); (4.1.9)

Для  $s = 0,11$  мм/об ( $a=0,078$  мм), длина контакта  $c = 0,75 - 0,01015 \cdot \gamma$  (мм); (4.1.10)

Для  $s = 0,23$  мм/об ( $a=0,163$  мм), длина контакта  $c = 1,28 - 0,01074 \cdot \gamma$  (мм); (4.1.11)

Для  $s = 0,34$  мм/об ( $a=0,24$  мм), длина контакта  $c = 1,55 - 0,01137 \cdot \gamma$  (мм); (4.1.12)

Для  $s = 0,52$  мм/об ( $a=0,368$  мм), длина контакта  $c = 1,907 - 0,0115 \cdot \gamma$  (мм). (4.1.13)

При  $\varphi = 45^\circ$  и  $s = 0,52$  мм/об толщина среза  $a = s \cdot \sin \varphi = 0,368$  мм, при  $\varphi = 90^\circ$  подача принималась  $s = 0,368$  мм/об, чтобы была такая же толщина среза  $a = 0,368$  мм для равнозначности сравнения: чтобы были одинаковые эпюры контактных напряжений, которые зависят от толщины среза  $a$ , а не от подачи  $s$ .

Длину контакта стружки  $c$  при разной толщине среза  $a$  определяем по графикам рис. 4.1.3 и рис. 4.1.4:

Результаты расчётов длины контакта представлены в таблице 4.1.4.

Табл. 4.1.4 – Длина контакта стружки с передней поверхностью резца  $c$  (мм) при разном переднем угле  $\gamma$  ( $^\circ$ ) и толщине среза  $a$  (мм) при обработки стали 40Х. Сталь 40Х-Т15К6,  $v=120$  м/мин,  $t=1,99$  мм,  $\phi=45^\circ$ ,  $b=2,82$ мм,  $\phi_1=45^\circ$ ,  $\lambda=0^\circ$ ,  $r=0,1$  мм,  $\alpha=8^\circ$ .

Длина контакта $c$ (мм) при разных условиях- (переднем угол $\gamma^\circ$ и толщинах срезах $a$ , мм)						
$a$ , мм \ $\gamma^\circ$	при $\gamma=-10^\circ$	при $\gamma=0^\circ$	при $\gamma=7^\circ$	при $\gamma=15^\circ$	при $\gamma=25^\circ$	при $\gamma=35^\circ$
$a=0,05$ мм	0,6	0,5	0,46	0,32	0,4	0,18
$a=0,078$ мм	0,85	0,75	0,66	0,57	0,6	0,37
$a=0,163$ мм	1,39	1,28	1,2	1,12	1,124	0,86
$a=0,24$ мм	1,66	1,55	1,55	1,47	1,47	1,2
$a=0,368$ мм	2	1,9	1,84	1,73	1,8	1,49

## 4.2. Построение эпюр контактных напряжений на передней поверхности и определение их основных параметров

Характер эпюры касательных контактных напряжений  $\tau$  практически не зависит от режимов резания и геометрии инструмента и имеет на пластическом участке контакта стружки линию, параллельную передней поверхности. При обработке стали длина пластическом участке контакта стружки  $c_1 \approx 0,5c$ . Такой характер эпюр позволяет использовать формулу:  $\tau_{\text{const}} = F / (c \times 0,75 \times b)$ .

Эпюру нормальных контактных напряжений  $\sigma$  строим относительно эпюры  $\tau$ , используя график изменения условного коэффициента трения  $\mu = \tau/\sigma$  в зависимости от относительной длины контакта стружки с передней поверхностью  $\psi = xi/c$ . (рис. 4.2.1).

1. Сначала принимаем, что наибольшее нормальное контактное напряжение  $\sigma_{max} = 2\sigma_g$  (т.е. равно удвоенной величине предела прочности на растяжение  $\sigma_g$ ). Потом корректируем  $\sigma_{max}$ , чтобы сила по эпюре  $N_\sigma$  была равна силе по эксперименту  $N_{эксп}$ . Т.е. ищем  $\sigma_{max}$ .

2. На расстоянии  $l_1 \approx a$  (мм)  $\sigma_{l1} \approx 0,93 \cdot \sigma_{max}$ ;

3. При  $x=0,4 \times c$  условный коэффициент трения  $\mu=1$  (рис. 4.2.1), то есть там  $\sigma_i = \tau_i$ , будет пересечение эпюры  $\sigma$  с эпюрой  $\tau$  (рис. 4.2.2).

4. На участке до  $x \approx 0,5c$  горизонтальная линия у эпюры  $\sigma$ .

5. При  $x \approx 0,8c$   $\sigma_i \approx \tau_i/1,6$ .

После построения эпюры  $\sigma$  выполняется проверка правильности её построения и коррекция величины  $\sigma_{max}$ :

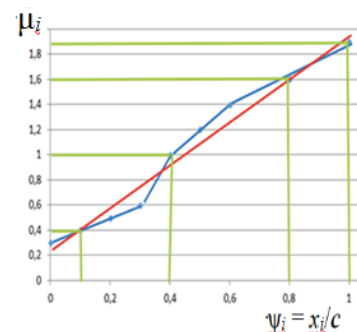


Рис. 4.2.1 – Изменение условного коэффициента трения на передней поверхности  $\mu_i = \tau_i / \sigma_i$  в зависимости от относительной длины контакта  $\psi_i = x_i/c$ . Красная линия – аппроксимация по прямолинейной зависимости

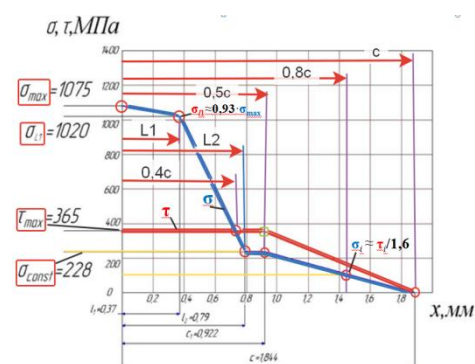


Рис. 4.2.2 – Эпюры контактных напряжений при обработке стали 40X.  $\gamma = +7^\circ$ ,  $a=0,368$  мм,  $t=1,99$  мм.  $F_{эксп}=1425$  Н,  $N_{эксп}=2213$  Н



6. Рассчитываем площадь эпюры  $\sigma$  ( $S_\sigma$ ) как сумму площадей простых геометрических фигур (прямоугольники и треугольники), которые наиболее близко вписываются в эпюру  $\sigma$ :  $S_\sigma = \sum S_{\sigma i}$  (Н/мм);

7. Выполняется проверка нормальной силы  $N_\sigma$  по эпюре  $\sigma$  её сравнением с нормальной физической составляющей  $N_{\text{эксп}}$ , рассчитанной по технологическим составляющим, измеренными при проведении эксперимента:

$$N_\sigma = S_\sigma \times b \approx N_{\text{эксп}} ;$$

8. Если  $N_\sigma < N_{\text{эксп}}$  более чем на 5%, то величина  $\sigma_{\text{max}}$ , принятая предварительно как  $\sigma_{\text{max}} = 2\sigma_e$  немного увеличивается. От этого немного увеличится и величина  $\sigma_{II} \approx 0,93 \cdot \sigma_{\text{max}}$ , но правая часть эпюры  $\sigma$  практически не изменится. После этого пересчитывается площадь эпюры  $\sigma$  ( $S_\sigma$ ) и проверяется выполнение равенства  $N_\sigma \approx N_{\text{эксп}}$ .

Если  $N_\sigma > N_{\text{эксп}}$  более чем на 5%, то величина  $\sigma_{\text{max}}$  немного уменьшается. Так продолжается до тех пор, пока  $N_\sigma \approx N_{\text{эксп}}$  с разницей не более 5%. Большую точность достигать не целесообразно из-за трудоёмкости этой процедуры, а точность измерения технологических составляющих силы резания, по нашим данным при многократном повторении измерений, составляет около 5-10%.

9. Проверка касательной силы  $F_\tau$  по эпюре  $\tau$  выполняется чисто формально, т.к. при её построении было заложено это равенство, а простая форма эпюры  $\tau$  не позволит это изменить:

$$S_\tau = \sum S_{\tau i} \text{ (Н/мм)} \rightarrow F_\tau = S_\tau \times b \approx F_{\text{эксп}}.$$

Таким образом, для построения эпюр контактных напряжений на передней поверхности необходимо знать физические составляющие силы резания, действующие на передней поверхности, и длину контакта стружки  $s$  с передней поверхностью инструмента. Силы резания для разных передних углов, полученные из экспериментов, представлены в таблице 4.1.1 – 4.1.3.

Примеры полученных эпюр контактных напряжений при толщине среза  $a = 0,05$  мм и разной величине переднего угла  $\gamma$  представлены на рис. 4.2.3. Остальные эпюры при разной величине толщины среза  $a$  и переднем угле  $\gamma$  приведены в приложении.

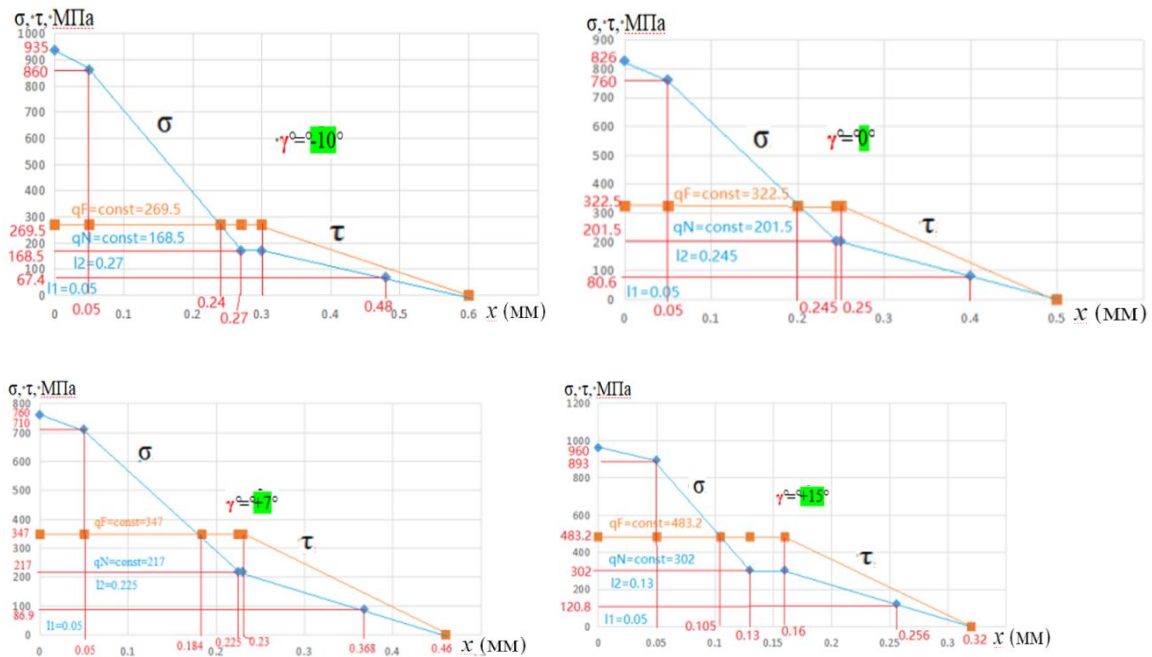


Рис. 4.2.3 – Эпюры контактных напряжений при толщине среза  $a=0,05$  мм

Для облегчения построения эпюр контактных напряжений на передней поверхности режущего инструмента при обработке стали 40X были построены графики изменения основных параметров эпюр при изменении толщины среза  $a$  и переднего угла  $\gamma$ . Эти данные представлены в таблицах 4.2.1-4.2.4 и на рис. 4.2.4-4.2.6.

Табл. 4.2.1 – Величина  $\sigma_{max}$  (см. рис. 4.2.2) при обработке стали 40Х. Сталь 40Х-Т15К6,  $v = 120$  м/мин,  $t = 1,99$  мм,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $b = 2,82$ мм,  $\varphi_1 = 45^\circ$ ,  $\lambda = 0^\circ$ ,  $r = 0,1$  мм,  $\alpha = 8^\circ$ .

$\sigma_{max}$ (МПа) при разной величине переднего угла $\gamma^\circ$ и толщины среза $a$						
$\gamma^\circ$ $a$ , мм	при $\gamma=-10^\circ$	при $\gamma=0^\circ$	при $\gamma=7^\circ$	при $\gamma=15^\circ$	при $\gamma=25^\circ$	при $\gamma=35^\circ$
$a=0,05$	935	826	760	960	540	750
$a=0,078$	1054	891	780	720	500	520
$a=0,163$	1378	1049	830	630	450	353
$a=0,24$	1435	1109	926	720	480	377
$a=0,368$	1450	1310	1058	850	602	414

Табл. 4.2.2 – Величина  $\sigma_{const}$  (см. рис. 4.2.2) при обработке стали 40Х. Сталь 40Х-Т15К6,  $v = 120$  м/мин,  $t = 1,99$  мм,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $b = 2,82$ мм,  $\varphi_1 = 45^\circ$ ,  $\lambda = 0^\circ$ ,  $r = 0,1$  мм,  $\alpha = 8^\circ$

$\sigma_{const}$ (МПа) при разной величине переднего угла $\gamma^\circ$ и толщины среза $a$						
$\gamma^\circ$ $a$ , мм	при $\gamma=-10^\circ$	при $\gamma=0^\circ$	при $\gamma=7^\circ$	при $\gamma=15^\circ$	при $\gamma=25^\circ$	при $\gamma=35^\circ$
$a=0,05$	168,5	201,5	217	302	235	482,5
$a=0,078$	160	186	210	232,3	208	302
$a=0,163$	145	193,3	218	235,9	244	264
$a=0,24$	183,3	221,5	222	250,75	248,8	262
$a=0,368$	246	247	220	276,3	257	280

Табл. 4.2.3 – Величина  $L_2$  (см. рис. 4.2.2) при обработке стали 40Х. Сталь 40Х-Т15К6,  $v = 120$  м/мин,  $t = 1,99$  мм,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $b = 2,82$ мм,  $\varphi_1 = 45^\circ$ ,  $\lambda = 0^\circ$ ,  $r = 0,1$  мм,  $\alpha = 8^\circ$ .

$L_2$ (мм) при разной величине переднего угла $\gamma^\circ$ и толщины среза $a$						
$\gamma^\circ$ \ / $a$ , мм	при $\gamma = -10^\circ$	при $\gamma = 0^\circ$	при $\gamma = 7^\circ$	при $\gamma = 15^\circ$	при $\gamma = 25^\circ$	при $\gamma = 35^\circ$
$a = 0,05$	0,27	0,245	0,225	0,13	0,18	0,072
$a = 0,078$	0,36	0,317	0,296	0,24	0,23	0,148
$a = 0,163$	0,6	0,558	0,55	0,48	0,42	0,344
$a = 0,24$	0,76	0,74	0,72	0,635	0,57	0,48
$a = 0,368$	0,9	0,858	0,81	0,772	0,63	0,745

Табл. 4.2.4 – Величина  $\tau_{max}$  (см. рис. 4.2.2) при обработке стали 40Х. Сталь 40Х-Т15К6,  $v = 120$  м/мин,  $t = 1,99$  мм,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $b = 2,82$ мм,  $\varphi_1 = 45^\circ$ ,  $\lambda = 0^\circ$ ,  $r = 0,1$  мм,  $\alpha = 8^\circ$ .

$\tau_{max}$ (МПа) ( $\tau_{max} = \tau_{const}$ ) при разной величине переднего угла $\gamma^\circ$ и толщины среза $a$						
$\gamma^\circ$ \ / $a$ , мм	при $\gamma = -10^\circ$	при $\gamma = 0^\circ$	при $\gamma = 7^\circ$	при $\gamma = 15^\circ$	при $\gamma = 25^\circ$	при $\gamma = 35^\circ$
$a = 0,05$	269,5	322,5	347	483,2	376	772
$a = 0,078$	255,9	297,6	336	371,6	333	483
$a = 0,163$	232	308,9	349	377,4	357	422
$a = 0,24$	293	354,5	355	401	382	419
$a = 0,368$	393,4	395	366	441,7	411	449,3

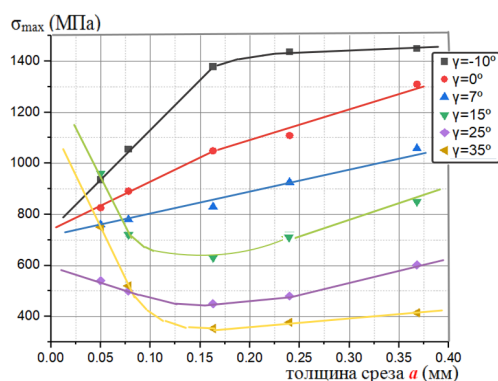


Рис. 4.2.4 – Влияние толщины среза  $a$  и переднего угла  $\gamma$  на **наибольшее нормальное** контактное напряжение  $\sigma_{max}$  на передней поверхности при обработке стали 40Х.

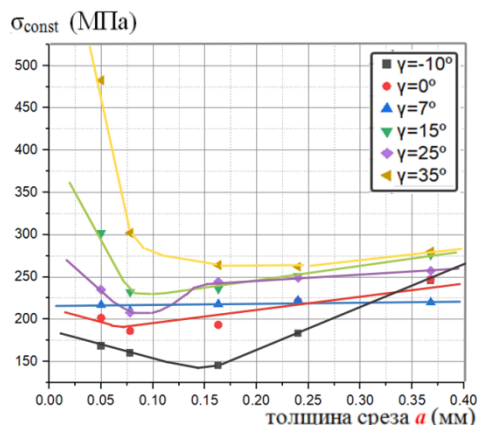


Рис. 4.2.5 – Влияние толщины среза  $a$  и переднего угла  $\gamma$  на **величину нормального** контактного напряжения на участке **равномерного** распределения  $\sigma_{const}$  на передней поверхности при обработке стали 40Х.

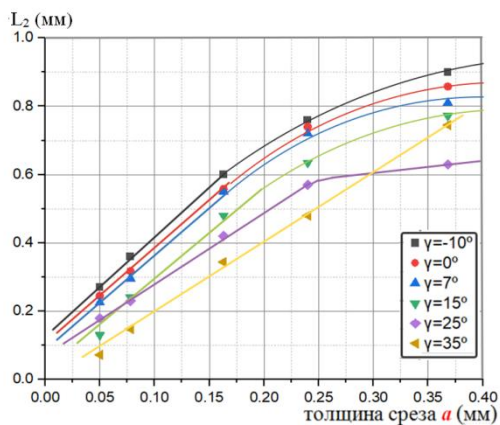


Рис. 4.2.6 – Влияние толщины среза  $a$  и переднего угла  $\gamma$  на **расстояние  $L_2$**  от режущей кромки до **начала участка равномерного** распределения  $\sigma_{const}$  на передней поверхности при обработке стали 40Х.

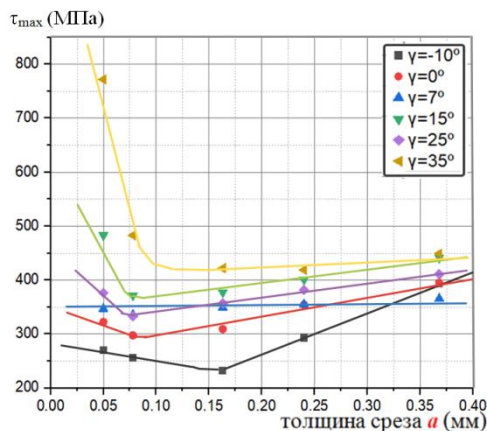


Рис. 4.2.7 – Влияние толщины среза  $a$  и переднего угла  $\gamma$  на **величину наибольшего касательного** контактного напряжения  $\tau_{max}$  на передней поверхности при обработке стали 40Х.

Анализ эпюр контактных напряжений для разных толщин среза  $a$  от 0,05 до 0,368 мм при разных передних углах  $\gamma$  от  $-10$  до  $+35^\circ$  позволил выявить закономерности изменения основных параметров эпюр ( $\sigma_{max}$ ,  $\sigma_{const}$ ,  $L_2$ ,

$\tau_{\max} = \tau_{\text{const}}$ ), по которым можно быстро и легко построить эпюры контактных напряжений при обработке стали 40Х.

Наибольший интерес представляют графики влияния толщины среза  $a$  и переднего угла  $\gamma$  на **наибольшее нормальное** контактное напряжение  $\sigma_{\max}$  на передней поверхности (рис. 4.2.4), поскольку эта величина определяет нагрузку на передней поверхности неизношенного режущего инструмента.

Из графиков рис. 4.2.4 видно, что уменьшение переднего угла от  $+35$  до  $-10^\circ$  приводит существенному увеличению  $\sigma_{\max}$  от 400 до 1400 Н в диапазоне толщины среза от 0,368 до 0,17 мм, что не вызывает противоречий с имеющимися представлениями о контактных процессах.

При толщине среза менее 0,17 мм  $\sigma_{\max}$  начинает интенсивно уменьшаться при  $\gamma = -10^\circ$ , но наоборот увеличиваться при  $\gamma = +35^\circ$  и  $+15^\circ$ .

Уменьшение  $\sigma_{\max}$  при  $\gamma = -10^\circ$  и малой величине толщины среза ( $a < 0,15$  мм) связано, на наш взгляд, с появлением небольшого нароста и увеличением действительного переднего угла. При большой толщине среза это влияние не столь существенное.

Второй фактор, способствующий уменьшению  $\sigma_{\max}$  при  $\gamma = -10^\circ$  и  $a < 0,15$  мм связан с увеличением прогиба поверхности резания [3] что, таким образом, приводит к уменьшению давления на переднюю поверхность вблизи режущей кромки за счёт **перераспределения** нормальной нагрузки на остальную часть контакта стружки с передней поверхностью.

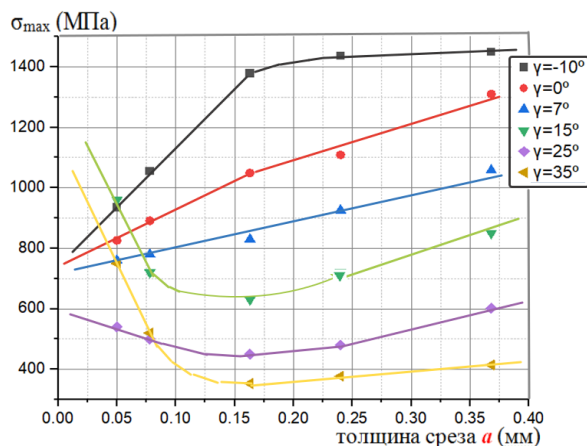


Рис. 4.2.4 (*повторение*) – Влияние толщины среза  $a$  и переднего угла  $\gamma$  на **наибольшее нормальное** контактное напряжение  $\sigma_{\max}$  на передней поверхности при обработке стали 40Х.

Поэтому парадоксальное большое увеличение  $\sigma_{\max}$  при  $\gamma = +35^\circ$  и малой величине толщины среза ( $a < 0,1$  мм) связано, на наш взгляд, также с ухудшением условий для образования малого нароста: при  $\gamma > +25^\circ$  вероятность появления нароста резко уменьшается, что приводит к увеличению  $\sigma_{\max}$ .

Увеличение  $\sigma_{\max}$  при  $\gamma = +15^\circ$  и малой величине толщины среза ( $a < 0,1$  мм) непонятно и нами объяснено не может, т.к. условия образования нароста при сравнительно небольшом переднем угле при малой толщине стружки не благоприятны, а прогиб поверхности резания не может существенно отличаться от условий при  $\gamma = +7^\circ$ , где нет увеличения  $\sigma_{\max}$  при  $a < 0,15$  мм.

#### 4.3. Исследование распределения контактных напряжений на фаске износа по задней поверхности при обработке стали

При расчёте на прочность необходимо знать распределение контактных напряжений не только на передней поверхности, но и на фаске износа по задней поверхности режущей пластины, поскольку износ протекает с неизбежным образованием этой фаски (рис. 4.3.1, *а*) [11, 12].

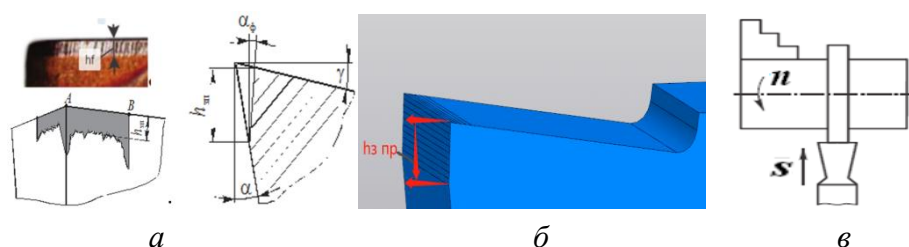


Рис. 4.3.1. Режущая пластина с износом по задней поверхности (*а*), 3Д модель режущего клина с искусственной фаской по задней поверхности (*б*) и схема прямоугольного свободного резания на примере обработки диска с радиальной подачей резца (*в*)

Как правило, объективно измеримым стандартом является максимально допустимая величина износа (показателя) – это длина фаски износа на задней поверхности.  $h_{зпр}$  (рис. 4.3.1, б) [11, 12, 6]. Увеличение  $h_3 > 0,7$  мм может привести к сколу и безвозвратной потере режущего инструмента, т.к. образующиеся при этом микротрещины резко уменьшают стойкость на оставшейся его части после переточки и увеличивают вероятность хрупкого разрушения.

Увеличение силы резания только за счет увеличения длины фаски на задней поверхности  $h_f$  при постоянном режиме резания позволяет рассчитать контактные нагрузки на искусственной фаске по задней поверхности, заточенной с задним углом  $\alpha_n=0^\circ$  [12], что является дополнением к исследованиям распределения контактных напряжений на фаске износа, выполненным с использованием метода разрезного реза [11, 12].

При обработке стали чаще всего образуется сливная стружка с постоянно действующей радиальной составляющей силы резания на передней поверхности  $P_{уп}$  (рис. 4.3.2), что приводит к упругому восстановлению поверхности резания с длиной волны  $L_{упр\ восст}$ , зависящей от толщины среза  $a$ , рассчитываемой при косоугольном резании по формуле  $a = s \cdot \sin\phi$ , где  $s$  – это подача (мм/об);  $\phi$  – главный угол в плане ( $^\circ$ ).

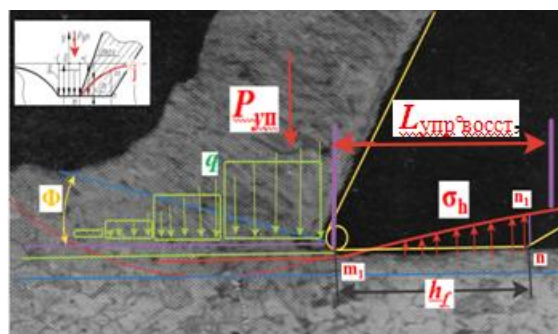


Рис. 4.3.2. Прогиб поверхности резания  $m_1n_1$  под действием радиальной составляющей  $P_{уп}$  на передней поверхности

Чем больше толщина среза  $a$ , тем больше упругая деформация поверхности среза под областью зоны первичной пластической деформации и тем больше длина волны упругого восстановления поверхности резания.



Поэтому при малой толщине среза  $a=0,05$  мм нормальные контактные напряжения на фаске задней поверхности  $\sigma_h$  сначала увеличиваются более интенсивно, чем при большой толщине среза  $a=0,368$  мм (рис. 4.3.3), но при отдалении от режущей кромки  $x_{hi}$  более 0,7 мм график  $\sigma_h$  для  $a=0,368$  мм идёт вверх круче, и при  $x_{hi}$  более 1 мм величина  $\sigma_h$  становится очень большой.

Такой характер эпюры нормальных контактных напряжений объясняет причину повышения

интенсивности износа режущего инструмента при увеличении длины фаски износа более 0,7 мм и скол режущей части при дальнейшем использовании инструмента без переточки или замены.

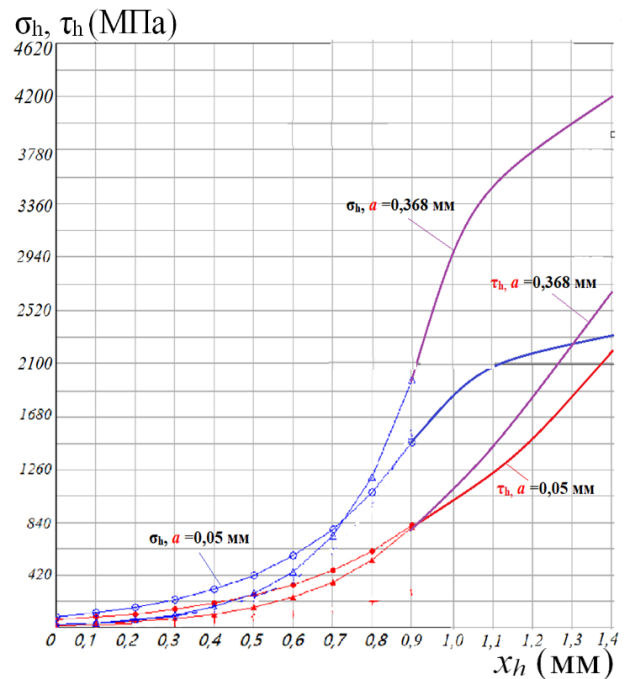


Рис. 4.3.3. Распределение нормальных  $\sigma_h$  и касательных  $\tau_h$  (МПа) контактных напряжений на искусственной фаске износа по задней поверхности резца при обработке стали 40X (образование сливной стружки). Сталь 40X-T15K6,  $\varphi=45^\circ$ ,  $v=2$  м/с,  $t=2$  мм, при толщине среза  $a$ :  $\circ, \bullet$  -  $a=0,05$  мм;  $\diamond, \blacklozenge$  -  $a=0,368$  мм.

#### 4.4. Расчёт НДС неизношенного простого режущего клина при прямоугольном свободном резании

Для проверки работы программы ANSYS и сравнения НДС СМП при сложной её геометрии и сложном нагружении рабочих поверхностей был выполнен расчёт НДС простого режущего клина при свободном прямоугольном резании периферии диска с радиальной подачей резца (см. рис. 2.1.2 в).

Была создана 3D модели простейшего резца в форме режущего клина. Для создания 3D модели использовали программное обеспечение Компас 2022 (рис. 4.4.1). Для каждого переднего угла и искусственной фаски износа по задней поверхности с задним углом  $\alpha = 0^\circ$  была создана своя модель, у которой ширина была на 0,1 мм больше, чем ширина обрабатываемого диска (ширина среза  $b_{\text{ср}} = b_{\text{диска}} = 2,81$  мм), чтобы на боковой поверхности можно было наблюдать картины распределения напряжений, деформаций или температур как бы в главной секущей плоскости.

Длина и высота 3D моделей были одинаковыми, чтобы не нарушать их жёсткость. Передний угол  $\gamma$  был равен -10, 0, 7, 15, 25 и  $35^\circ$ . Главный задний угол:  $\alpha = 8^\circ$ , ширина резца (режущего клина)  $b = 2,82$  мм, длина клина может быть принята

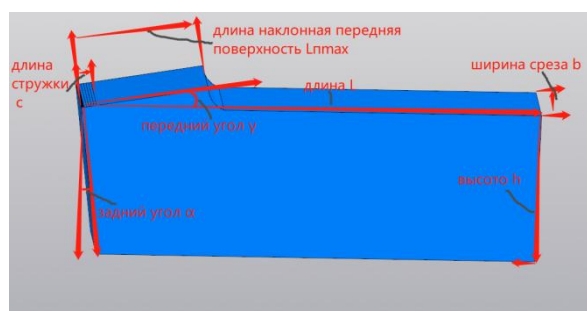


Рис. 4.4.1 – Геометрические параметры резца в форме режущего клина. Ширина  $b=2,82$  мм, толщина  $h=6$  мм, длина  $L=18$  мм,  $\varphi=90^\circ$ ,  $\lambda=0^\circ$ ,  $\alpha=8^\circ$ .

больше на 3 мм по сравнению с наибольшей длиной контакта стружки с передней поверхностью из всех толщин среза  $a$  и величин переднего угла  $\gamma$ . Для этого была составлена таблица длины контакта стружки  $c$  при обработке стали 40X при скорости резания  $v = 120$  м/мин (таблица 4.4.1).

Табл. 4.4.1 – Длина контакта стружки  $c$  (мм) с передней поверхностью при разных величинах переднего угла  $\gamma^\circ$  и толщины среза  $a$

$\gamma$ $a$ , мм	при $\gamma=-10^\circ$	при $\gamma=0^\circ$	при $\gamma=7^\circ$	при $\gamma=15^\circ$	при $\gamma=25^\circ$	при $\gamma=35^\circ$
$a=0,05$ мм	0,6	0,5	0,46	0,32	0,4	0,18
$a=0,078$ мм	0,85	0,75	0,66	0,57	0,6	0,37
$a=0,163$ мм	1,39	1,28	1,2	1,12	1,124	0,86
$a=0,24$ мм	1,66	1,55	1,55	1,47	1,47	1,2
$a=0,368$ мм	2	1,9	1,84	1,73	1,8	1,49

Исходя из наибольшей длины контакта стружки  $c_{\max} = 2$  мм (при  $\gamma = -10^\circ$  и  $a = 0,368$  мм) может быть назначена длина передней поверхности 3Д модели резца  $L_{\text{п max}} = 5$  мм (рис. 4.4.1). Исходя из

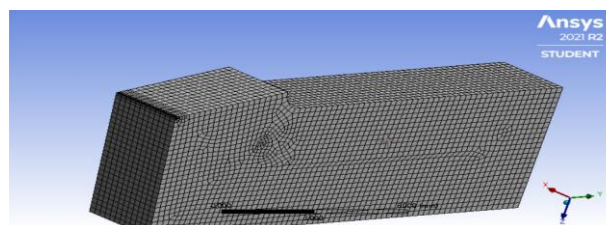


Рис. 4.4.2 – Задание размера сетки на 0,25 мм для 3Д модели резца, работающего при прямоугольном свободном резании. Указан пример для отрицательного переднего угла

других рекомендаций, наклонная передняя поверхность должна иметь длину  $L_{\text{п}}$  не менее 2-х наибольшей длины контакта стружки с передней поверхностью, т.е. для наибольшей толщины среза  $a = 0,368$  мм длина контакта стружки  $c \approx (4-6)a = 6 \times 0,368 = 2,2$  мм. Тогда  $L_{\text{п max}} = 2 \times c = 2 \times 2,2 = 4,4 = 5$  мм. Длина

передней поверхности  $L_{\text{п max}} = 5$  мм была использована при создании **всех** моделей режущего клина.

Был задан размер сетки конечных элементов (рис. 4.4.2), и направление осей действия сил внешней нагрузки (рис. 4.4.3).

В программе ANSYS задаются силы, направленные вдоль осей OZ, OY и OX (или OY'), вдоль этих же осей рассчитываются внутренние напряжения. Поэтому на рабочем столе ANSYS были заданы направления этих осей в соответствие с направлением технологических составляющих  $P_z$ ,  $P_x$  и  $P_y$  силы резания. Для режущего клина, работающего при радиальной подачи при обточке периферии диска составляющая  $P_y$  была направлена горизонтально слева на право, а составляющая  $P_x$  - вдоль режущей кромки резца к наблюдателю (рис. 4.4.3).

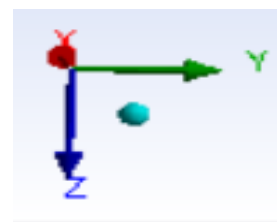


Рис. 4.4.3 –  
Направление осей

Properties of Outline Row 5: Titanium Alloy				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	11.5	g cm <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and Po...		
8	Young's Modulus	5.25E+05	MPa	
9	Poisson's Ratio	0.29		
10	Bulk Modulus	4.1667E+11	Pa	
11	Shear Modulus	2.0349E+11	Pa	
12	Tensile Yield Strength	9.3E+08	Pa	
13	Compressive Yield Strength	9.3E+08	Pa	
14	Tensile Ultimate Strength	1.07E+09	Pa	

Рис. 4.4.4 – Свойства твёрдого сплава Т15К6 при задании инструментального материала в ANSYS

На рабочем столе ANSYS были заданы свойства материала модели резца (твёрдый сплав Т15К6) (рис. 4.4.4). Обычно эти характеристики заложены в базе ANSYS, но требуется проверка и исправление при необходимости.

Были заданы (приложены) внешние нагрузки в виде средних контактных напряжений на соответствующих участках контакта стружки с передней поверхностью, рассчитанных по эпюрам

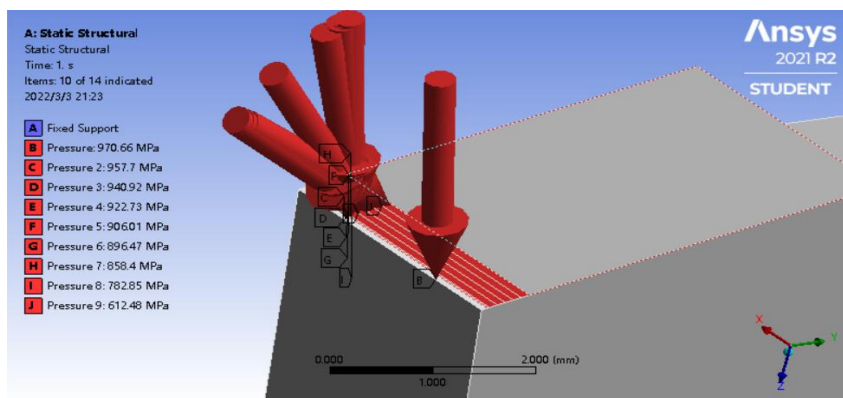


Рис. 4.4.5 – Приложение внешних равномерно распределённых в пределах каждого участка средних контактных напряжений на переднюю поверхность резца, работающего при прямоугольном свободном резании

контактных напряжений при соответствующей толщине среза и переднем угле (рис. 4.4.5).

На рабочем столе ANSYS были заданы задачи: рассчитывать эквивалентные  $\sigma_e$  и нормальные напряжения по осям OZ и OY (для косоугольного резания будет по оси OXY), деформации по осям OZ и OY.

При анализе температурного поля в инструменте дополнительно задаются тепловые источники на передней и задней поверхностях, распределение температуры на контактных поверхностях, теплофизические свойства окружающей среды.

Расчёт НДС режущей пластины выполнялся после приложения эпюр контактных напряжений на передней поверхности и на фаске по задней поверхности. Т.к. приложение внешней нагрузки в виде эпюр невозможно из-за сложного их характера, то длина контакта стружки разбивалась на небольшие

участки длиной  $L_{ni}$ , внутри которых принималось равномерное распределение с величиной контактных напряжений, равным средним на этом  $i$ -том участке, т.е.  $\sigma_{срi}$  и  $\tau_{срi}$ , но может быть задано и в виде сил  $N_1, F_1, N_2, F_2$  и т.д. на соответствующем участке  $1, 2, 3$  и т.д. (рис. 4.4.6, а). Величины средних напряжений определялись по графикам распределения контактных напряжений (по эпюрам).

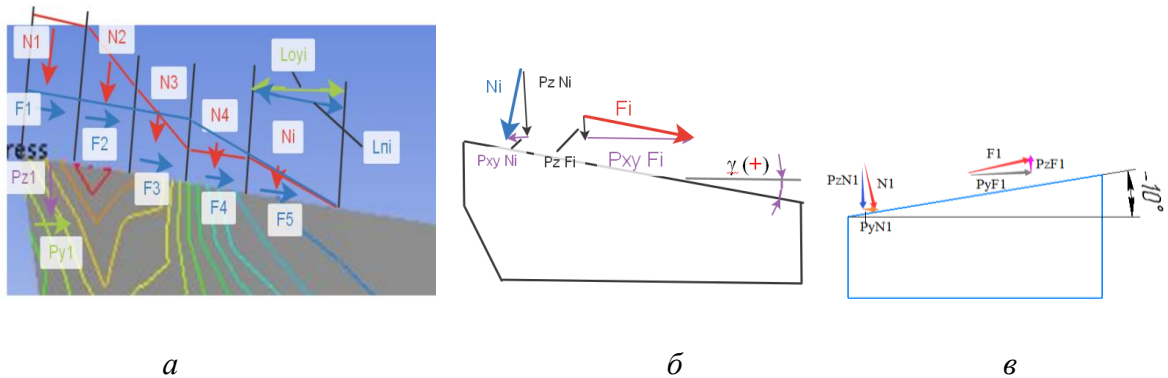


Рис. 4.4.6 – Физические составляющие  $N_i$  и  $F_i$  силы резания, действующие на  $i$ -тых участках контакта стружки с передней поверхностью режущего инструмента, определённые по эпюрам контактных напряжений при положительном переднем угле  $\gamma$  (а); направления векторов технологических составляющих  $P_{zNi}, P_{yNi}, P_{zFi}$  и  $P_{yFi}$  от действия **физических** составляющих  $N_i$  и  $F_i$  силы резания  $P$  при положительном переднем угле  $\gamma$  (б) и отрицательном угле  $\gamma$ .

С увеличением толщины среза  $a$  увеличивается и длина контакта стружки  $c$  с передней поверхностью, поэтому увеличивалось и количество участков для увеличения точности нагружения внешними нагрузками.

При приложении контактных напряжений касательное контактное напряжение  $\tau$  направлено вдоль передней поверхности, а нормальное контактное напряжение  $\sigma$  направлено перпендикулярно к передней поверхности по

направлению к ней.

Но при задании внешней нагрузки в ANSYS должны быть заданы напряжения (или силы) в направлении оси OY (при радиальной подаче при свободном прямоугольном резании перпендикулярно к плоскости OXY) и вдоль осей OZ и OX.

При  $\gamma = 0^\circ$  пересчитывать напряжения или силы не надо, но при  $\gamma \neq 0^\circ$  необходимо учитывать величину переднего угла (см. рис. 4.4.6, б и в). Расчёт нормальных  $N_i$  (Н) и касательных  $F_i$  (Н) сил на каждом  $i$ -том участке выполняется по формулам:  $N_i = \sigma_{icp} \times L_{ni} \times b$  (Н);  $F_i = \tau_{icp} \times L_{ni} \times b$  (Н), где  $\sigma_{icp}$  – среднее на  $i$ -том участке нормальное контактное напряжение (Н/мм<sup>2</sup>) (1 Н/мм<sup>2</sup> = 1 МПа);  $\tau_{icp}$  – среднее на  $i$ -том участке касательное контактное напряжение (Н/мм<sup>2</sup>);  $L_{ni}$  – длина  $i$ -того участка (мм);  $b$  – ширина среза (мм).

При **положительном** (см. рис. 4.4.6, б) и **отрицательном** переднем угле  $\gamma$  (рис. 4.4.6, в) от физической силы  $N_i$  будут действовать **две составляющие** (две **технологические составляющие**), направленные вдоль осей **OY** и **OZ** соответственно:  $P_{z N_i}$  (сила  $P_z$  от действия силы  $N_i$ ) и  $P_{y F_i}$  (сила  $P_y$  от действия силы  $F_i$ ), рассчитываемых по формулам, независимо от знака переднего угла  $\gamma$ :  
$$P_{z N_i} = N_i \times \cos \gamma; \quad P_{y F_i} = F_i \times \sin \gamma.$$

От физической силы  $F_i$  будут действовать тоже **две технологические составляющие**, направленные вдоль осей **OY** и **OZ** соответственно:  $P_{y F_i}$  (сила  $P_y$  от действия силы  $F_i$ ) и  $P_{z F_i}$  (сила  $P_z$  от действия силы  $F_i$ ).

При **любом знаке** переднего угла:  $P_{y F_i} = F_i \times \cos \gamma; P_{z F_i} = F_i \times \sin \gamma.$

После этого рассчитываются общие составляющие силы, действующие вдоль осей  $OZ$  и  $OY$  (как бы технологические составляющие). При

положительном переднем угле  $\gamma$ :  $P_{zi} = P_{z Ni} + P_{z Fi}$ ;  $P_{yi} = P_{y Fi} - P_{y Ni}$ .

При отрицательном переднем угле  $\gamma$ :  $P_{zi} = P_{z Ni} - P_{z Fi}$ ;  $P_{yi} = P_{y Fi} + P_{y Ni}$ .

Результаты расчётов записываются в таблицу 4.4.2.

Табл. 4.4.2 – Расчёт составляющих  $P_{zi}$  и  $P_{yi}$  силы резания, действующих на  $i$ -том участке режущего клина резца шириной  $b = 2$  мм. Сталь 40X – Т15К6,  $\gamma = -10^\circ$ ,  $a = 0,368$  мм,  $c = 2,02$  мм

№ участка от режущей кромки	Длина участка $L_{пi}$ , мм	$\sigma_i$ , МПа	$N_i \cdot H$	$P_{zNi}$ , Н	$P_{yNi}$ , Н	$T_i$ , МПа	$F_i \cdot H$	$P_{yFi}$ , Н	$P_{zFi}$ , Н	$P_{zi} \cdot H$	$P_{yi} \cdot H$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0-0,2	1300	520	512,1	90,3	395	158	155,6	27,4	484,7	245,9
2	0,2-0,37	1255	426,7	420,2	74	395	134,3	132,3	23,3	396,9	206,3
3	0,37-0,5	1100	286	281,7	49,7	395	102,7	101,1	17,8	263,9	150,8
4	0,5-0,6	890	178	175,3	31	395	79	77,8	13,7	161,6	108,8
5	0,6-0,7	690	138	136	24	395	79	77,8	13,7	122,3	101,8
6	0,7-0,887	415	149,4	147,1	26	395	142,2	140	24,7	122,4	166
7	0,887-1,01	250	60	59	10,4	395	94,8	93,4	16,5	42,5	103,8
8	1,01-1,3	215	129	127	22,4	338	202,8	199,7	35,2	91,8	222
9	1,3-1,6	150	90	88,6	15,6	230	138	135,9	24	64,6	151,5
10	1,6-2,02	60	48	42,3	8,3	90	72	70,9	12,5	29,8	79,2



Для внешней нагрузке лучше указывать не силы, а равномерно распределённую удельную нагрузку  $q_{zi}$  и  $q_{yi}$  (МПа) в направлении соответствующих осей (рис. 4.4.7).

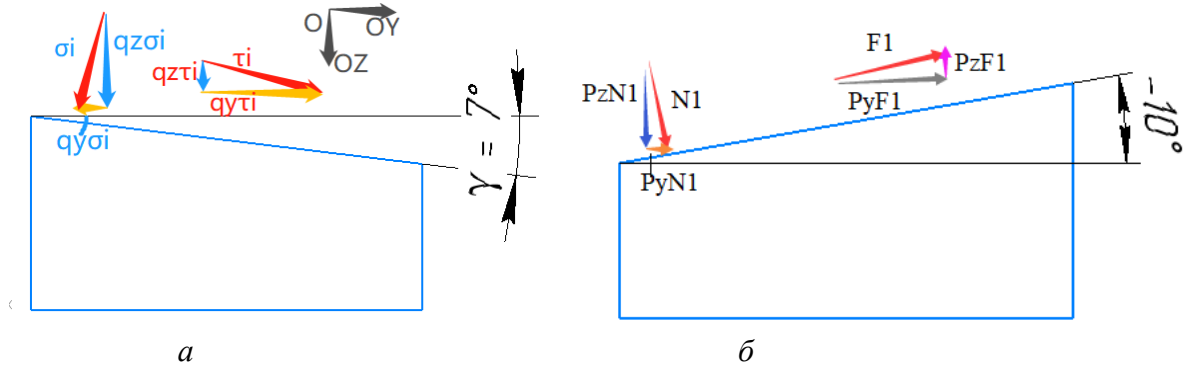


Рис. 4.4.7 – Составляющие контактные нагрузки, действующие вдоль осей  $OZ$  ( $q_{zi}$ ) и  $OY$  ( $q_{yi}$ ) при **положительном** переднем угле  $\gamma$  (а) и при **отрицательном** переднем угле  $\gamma$  (б).

Уравнения для расчёта средних контактных напряжений вдоль осей  $OZ$  ( $q_{zi}$ ) и  $OY$  ( $q_{yi}$ ) на  $i$ -том участке учитывает **направление** составляющих векторов контактных напряжений (см. **знак** перед вторым составляющим уравнения (2) при **положительном** переднем угле  $\gamma$  и уравнения (3) при **отрицательном** переднем угле  $\gamma$ ):

а) при **положительном** переднем угле  $\gamma$  (рис. 4.4.7, а):

$$1) \mathbf{q}_{zi} = q_{z\sigma i} + q_{z\tau i} = \sigma_i \times \cos \gamma + \tau_i \times \sin \gamma \quad (\text{МПа});$$

$$2) \mathbf{q}_{yi} = q_{y\tau i} - q_{y\sigma i} = \tau_i \times \cos \gamma - \sigma_i \times \sin \gamma \quad (\text{МПа}).$$

б) при **отрицательном** переднем угле  $\gamma$  (рис. 4.4.7, б):

$$3) \mathbf{q}_{zi} = q_{z\sigma i} - q_{z\tau i} = \sigma_i \times \cos \gamma - \tau_i \times \sin \gamma \quad (\text{МПа});$$

$$4) \mathbf{q}_{yi} = q_{y\tau i} + q_{y\sigma i} = \tau_i \times \cos \gamma + \sigma_i \times \sin \gamma \quad (\text{МПа}).$$

Результаты расчётов записываются в таблицу 4.4.3.

Табл. 4.4.3 – Составляющие контактные нагрузки, действующие вдоль осей  $OZ$  ( $q_{\sum zi}$ ) и  $OY$  ( $q_{\sum yi}$ ) при расчёте НДС режущего клина шириной  $b = 2,82$  мм. Сталь 40Х-Т15К6,  $v=120$  м/мин),  $\gamma = +15^\circ$ , толщина среза  $a = 0,05$  мм, 5 участков, без поворота режущего клина

№ участка от режущей кромки	Диапазон участка $L_{ni}$ , мм	$\sigma_i$ МПа	$q_{z\sigma i} = \sigma_i \cos \gamma$ МПа	$q_{y\sigma i} = \sigma_i \sin \gamma$ МПа	$\tau_i$ МПа	$q_{z\tau i} = \tau_i \sin \gamma$ МПа	$q_{y\tau i} = \tau_i \cos \gamma$ МПа	$q_{z\sum i} = q_{z\sigma i} + q_{z\tau i}$ МПа	$q_{y\sum i} = q_{y\sigma i} - q_{y\tau i}$ МПа
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
1	0-0,08	805	777,57	208,35	483,2	125,06	466,74	985,92	258,39
2	0,08-0,13	476	459,78	123,2	483,2	125,06	466,74	584,84	343,54
3	0,13-0,16	302	291,7	78,16	483,2	125,06	466,74	416,76	388,58
4	0,16-0,23	236	227,96	61,08	406,6	105,24	392,17	333,2	331,09
5	0,23-0,32	85	82,1	22	165	42,7	159,38	124,8	137,38

Для уменьшения трудоёмкости подготовки данных для внешней нагрузки было предложено повернуть режущий клин против часовой стрелки на угол  $\gamma$  при положительном его знаке (и по часовой стрелке при отрицательном переднем угле) (см. рис. 4.4.8). В этом случае передняя поверхность примет горизонтальное положение, нормальное контактное напряжение  $\sigma_i$  будет совпадать по направлению с осью  $OZ$ , а касательное  $\tau_i$  – по направлению с осью  $OY$ . В этом случае не надо будет пересчитывать контактные напряжения с учётом величины переднего угла  $\gamma$ , а в таблице 4.4.3 надо будет использовать **только** графы (колонки) **1, 2, 3 и 6**. Так как угол заострения  $\beta$  при этом не изменится, то и прочность инструмента останется неизменной.

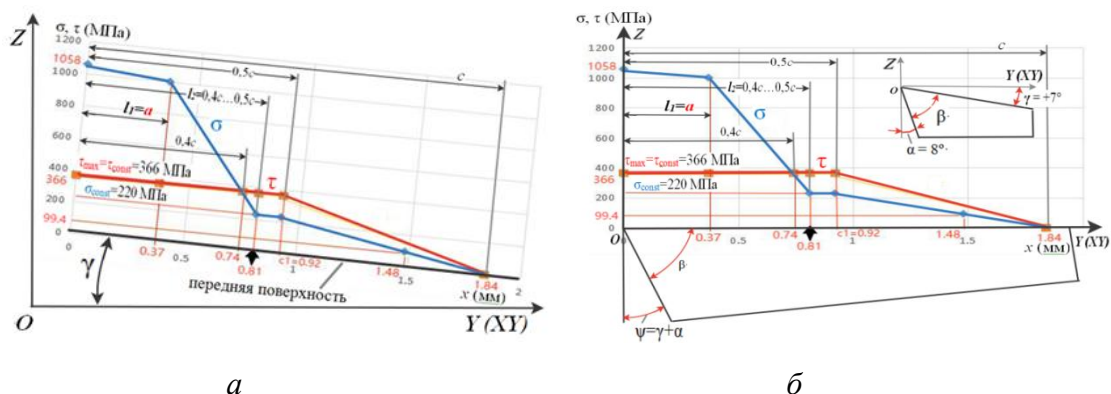


Рис. 4.4.8– Положение режущего клина при традиционной схеме расчёта (а) и после его поворота на угол  $\gamma$  против часовой стрелки (при  $\gamma > 0^\circ$ ) (б).

Для проверки идентичности НДС режущего клина без поворота (при традиционной расчётной схемы) и с поворотом (предложенная схема) был выполнен расчёт НДС, который показал малое расхождение в величине эквивалентных напряжений и других параметров (таблица 4.4.4).

Табл. 4.4.4 – Сравнение НДС режущего клина при его повороте и при его традиционном положении. Сталь 40Х-Т15К6,  $\gamma = 15^\circ$ ,  $a = 0,05$  мм,  $v = 120$  м/мин,  $\varphi = 90^\circ$ ,  $b = 2,82$  мм,  $\lambda = 0^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ .

№	Название параметра	<b>с поворотом</b>	<b>без поворота</b>	Соотношение между данными граф 4 и 3
1	2	3	4	5
1	Наибольшее эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$ (МПа)	1099,6	1141	1,04
2	Наибольшее нормальное напряжение по оси OY $\sigma_{y \text{ max}}$ (МПа)	6,26	45,57	7,3
3	Наибольшее нормальное напряжение по оси OZ $\sigma_{z \text{ max}}$ (МПа)	18,35	16,97	0,92
4	Наибольшая деформация $\epsilon_{\text{max}}$ (мм)	0,00187	0,00207	1,1
5	Наибольшее касательное напряжение в плоскости YOZ $\tau_{yz \text{ max}}$ (МПа)	9,19	12,07	1,3
6	Наибольшее касательное напряжение в плоскости XOZ $\tau_{xz \text{ max}}$ (МПа)	21,64	25,2	1,16

С увеличением количества участков, на которые делится длина контакта стружки с увеличивается трудоёмкость расчётов, т.к. увеличивается количество строк в таблице 4.4.3. Для определения погрешности расчётов было проведено сравнение нагрузки с пятью и с 35 участками, которое показало небольшое отличие данных и при малой толщине среза, и при большой (таблица 4.4.5). С увеличением толщины среза величина параметра увеличивается.

Табл. 4.4.5 – Сравнение НДС режущего клина при **малом** и **большом** количестве участков на длине контакта стружки. Сталь 40Х-Г15К6,  $\gamma = -10^\circ$ ,  $v=120$  м/мин,  $\varphi=90^\circ$ ,  $b=2,82$ мм,  $\lambda=0^\circ$ ,  $\alpha=8^\circ$ .

№	Название параметра	Толщина среза $a$ (мм)	<b>Маленькое</b> количество участков	<b>Большое</b> количество участков	Соотношение данных граф 5 и 4
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
1	Наибольшее эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв max}}$ (МПа)	$a = 0,05$	846,17	920,59	1,088
		$a = 0,368$	1400	1474,6	1,05
2	Наибольшее нормальное напряжение по оси OY $\sigma_y \text{ max}$ (МПа)	$a = 0,05$	33,4	39,1	1,17
		$a = 0,368$	84,1	99,2	1,18
3	Наибольшее нормальное напряжение по оси OZ $\sigma_z \text{ max}$ (МПа)	$a = 0,05$	5,7	6,5	1,14
		$a = 0,368$	32,6	36,5	1,12
4	4 - наибольшие деформация $\varepsilon_{\text{max}}$ (мм)	$a = 0,05$	0,0018	0,00189	1,05
		$a = 0,368$	0,007	0,0072	1,03
5	Наибольшее касательное напряжение в плоскости YOZ $\tau_{yz \text{ max}}$ (МПа)	$a = 0,05$	10,7	11,5	1,07
		$a = 0,368$	75,3	78,5	1,04
6	Наибольшее касательное напряжение в плоскости XOZ $\tau_{xz \text{ max}}$ (МПа)	$a = 0,05$	23,1	24,5	1,06
		$a = 0,368$	145,7	157,2	1,08

Некоторые картины НДС представлена на рис. 4.4.9 и 4.4.10, остальные – в приложении. Сравнение параметров НДС при разных передних углах  $\gamma$  и толщинах срезах  $a$  представлены в таблицах 4.4.6-4.4.11.

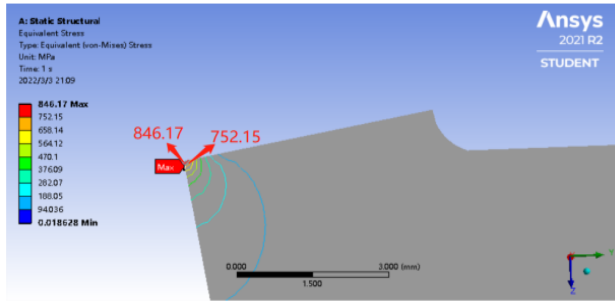


Рис. 3.3.1.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $^{\circ}40\text{X}^{\circ}\text{-}^{\circ}\text{T15K6}$ ,  $\gamma = -10^{\circ}$ ,  $a = 0,05$  мм,  $c = 0,6$  мм,  $b = 2,82$  мм,  $F = 342$  Н,  $N = 530$  Н, 5 участков.

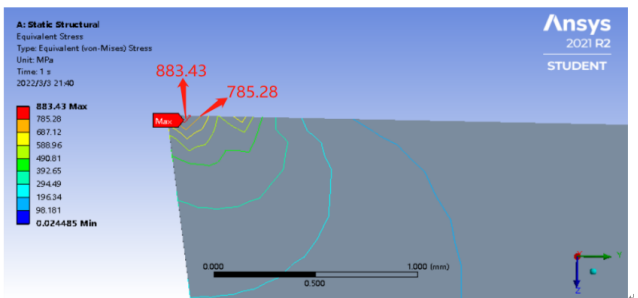


Рис. 3.3.2.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $^{\circ}40\text{X}^{\circ}\text{-}^{\circ}\text{T15K6}$ ,  $\gamma = 0^{\circ}$ ,  $a = 0,05$  мм,  $c = 0,5$  мм,  $b = 2,82$  мм,  $F = 341$  Н,  $N = 451$  Н, 5 участков.

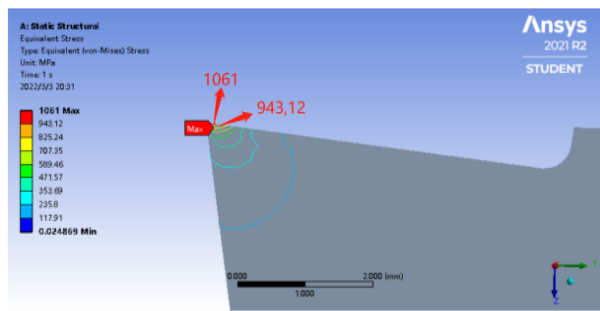


Рис. 3.3.3.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $^{\circ}40\text{X}^{\circ}\text{-}^{\circ}\text{T15K6}$ ,  $\gamma = +7^{\circ}$ ,  $a = 0,05$  мм,  $c = 0,46$  мм,  $b = 2,82$  мм,  $F = 338$  Н,  $N = 405$  Н, 5 участков.

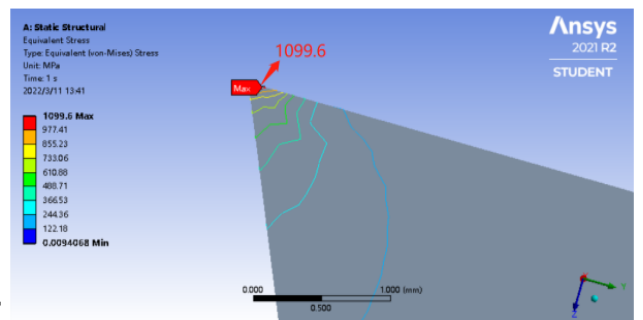


Рис. 3.3.4.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $^{\circ}40\text{X}^{\circ}\text{-}^{\circ}\text{T15K6}$ ,  $\gamma = +15^{\circ}$ ,  $a = 0,05$  мм,  $c = 0,32$  мм,  $b = 2,82$  мм,  $F = 327$  Н,  $N = 360$  Н, 5 участков.

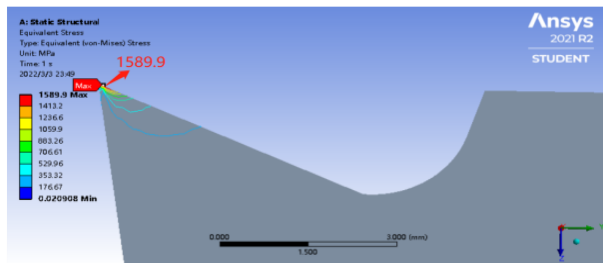


Рис. 3.3.5.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $^{\circ}40\text{X}^{\circ}\text{-}^{\circ}\text{T15K6}$ ,  $\gamma = +25^{\circ}$ ,  $a = 0,05$  мм,  $c = 0,4$  мм,  $b = 2,82$  мм,  $F = 318$  Н,  $N = 286$  Н, 5 участков.

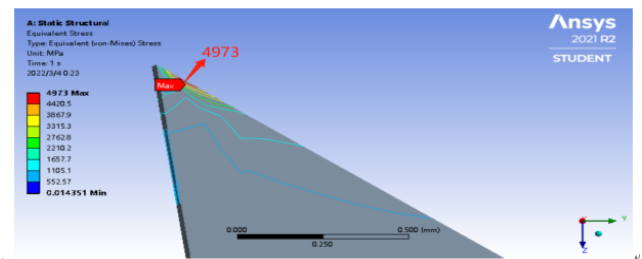


Рис. 3.3.6.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $^{\circ}40\text{X}^{\circ}\text{-}^{\circ}\text{T15K6}$ ,  $\gamma = +35^{\circ}$ ,  $a = 0,05$  мм,  $c = 0,18$  мм,  $b = 2,82$  мм,  $F = 294$  Н,  $N = 226$  Н, 5 участков.

Рис. 4.4.9 – Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}}$  (МПа) в режущем клине при свободном прямоугольном резании диска при толщине среза  $a = 0,05$  мм, при разной величине переднего угла  $\gamma = -10, 0, 7, 15, 25$  и  $35^{\circ}$ .

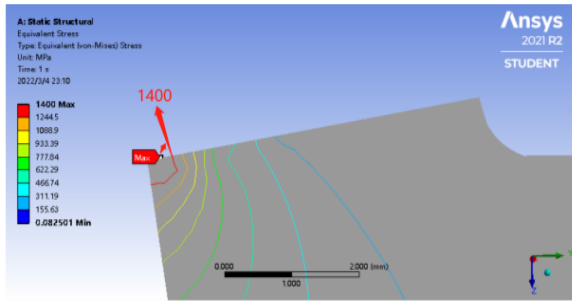


Рис. 3.3.7.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $^{\circ}40\text{X}^{\circ}\text{-}^{\circ}\text{T15K6}$ ,  $\gamma=10^{\circ}$ ;  $a^{\circ}=0,368$  мм;  $c^{\circ}=2$  мм;  $b^{\circ}=2,82$  мм;  $F=1664$  Н;  $N=2975$  Н; 10 участков.

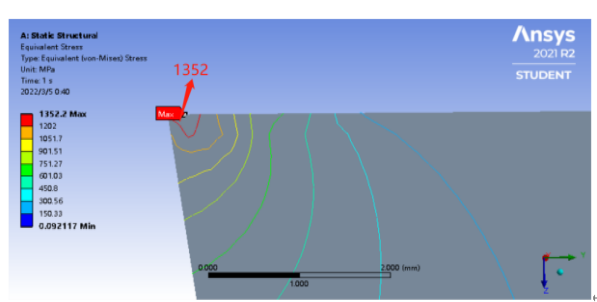


Рис. 3.3.8.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $^{\circ}40\text{X}^{\circ}\text{-}^{\circ}\text{T15K6}$ ,  $\gamma=0^{\circ}$ ;  $a^{\circ}=0,368$  мм;  $c^{\circ}=1,9$  мм;  $b^{\circ}=2,82$  мм;  $F=1587$  Н;  $N=2500$  Н; 10 участков.

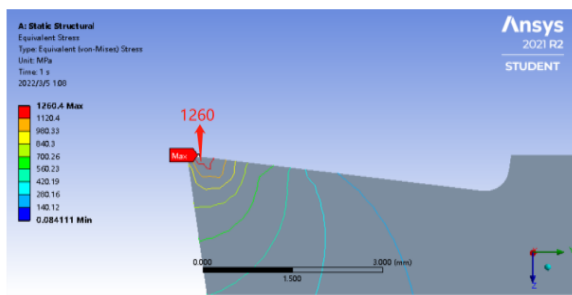


Рис. 3.3.9.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $^{\circ}40\text{X}^{\circ}\text{-}^{\circ}\text{T15K6}$ ,  $\gamma=7^{\circ}$ ;  $a^{\circ}=0,368$  мм;  $c^{\circ}=1,84$  мм;  $b^{\circ}=2,82$  мм;  $F=1425$  Н;  $N=2214$  Н; 10 участков.

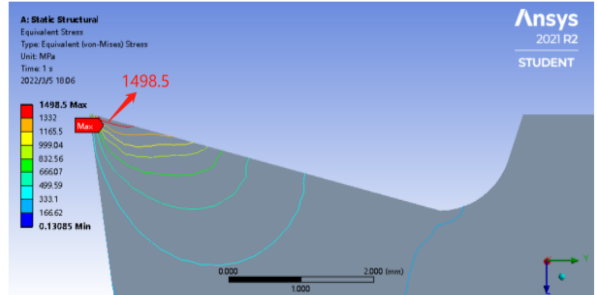


Рис. 3.3.10.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $^{\circ}40\text{X}^{\circ}\text{-}^{\circ}\text{T15K6}$ ,  $\gamma=15^{\circ}$ ;  $a^{\circ}=0,368$  мм;  $c^{\circ}=1,73$  мм;  $b^{\circ}=2,82$  мм;  $F=1616$  Н;  $N=1867$  Н; 10 участков.

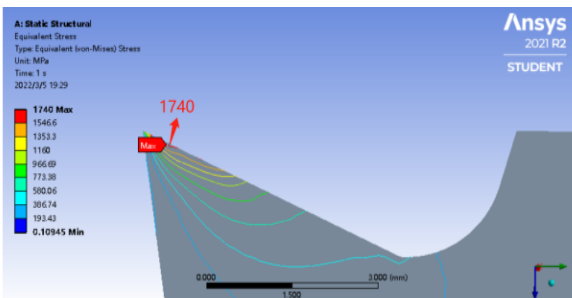


Рис. 3.3.11.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $^{\circ}40\text{X}^{\circ}\text{-}^{\circ}\text{T15K6}$ ,  $\gamma=25^{\circ}$ ;  $a^{\circ}=0,368$  мм;  $c^{\circ}=1,8$  мм;  $b^{\circ}=2,82$  мм;  $F=1564$  Н;  $N=1420$  Н; 10 участков.

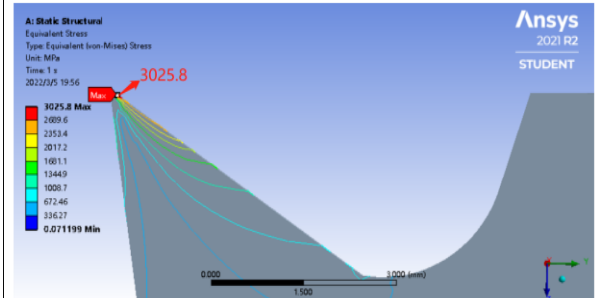


Рис. 3.3.12.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $^{\circ}40\text{X}^{\circ}\text{-}^{\circ}\text{T15K6}$ ,  $\gamma=35^{\circ}$ ;  $a^{\circ}=0,368$  мм;  $c^{\circ}=1,49$  мм;  $b^{\circ}=2,82$  мм;  $F=1416$  Н;  $N=1059$  Н; 10 участков.

Рис. 4.4.10 – Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  (МПа) в режущем клине при свободном прямоугольном резании диска при толщине среза  $a=0,368$  мм при разной величине переднего угла  $\gamma=-10, 0, 7, 15, 25$  и  $35^{\circ}$ .

На картинах распределения нормальных напряжений  $\sigma_y^{\text{max}}$  и  $\sigma_z^{\text{max}}$  по знаку (+ или -) определяются области растягивающих и сжимающих напряжений, а по распределению эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}$  ( $\sigma_e$ ) оценивается прочность режущего инструмента.

Табл. 4.4.6 – Наибольшие эквивалентные напряжения  $\sigma_{\text{экв max}}$  (МПа) при разных передних углах  $\gamma$  и толщинах срезах  $a$ . Сталь 40Х-Т15К6,  $v=120$  м/мин,  $\varphi=90^\circ$ ,  $b=2,82$ мм,  $\lambda=0^\circ$ ,  $\alpha=8^\circ$ .

$\gamma$ $a$ , мм	при $\gamma=-10^\circ$	при $\gamma=0^\circ$	при $\gamma=7^\circ$	при $\gamma=15^\circ$	при $\gamma=25^\circ$	при $\gamma=35^\circ$
$a=0,05$	846,17	883,43	1061	1099,6	1589,9	4973
$a=0,368$	1400	1352	1260	1498,5	1740	3025,8

Табл. 4.4.7 – Наибольшие нормальные напряжения по оси ОУ  $\sigma_{y \text{ max}}$  (МПа) при разных передних углах  $\gamma$  и толщинах срезах  $a$ . Сталь 40Х-Т15К6,  $v=120$  м/мин,  $\varphi=90^\circ$ ,  $b=2,82$ мм,  $\lambda=0^\circ$ ,  $\alpha=8^\circ$ .

$\gamma^\circ$ $a$ , мм	при $\gamma=-10^\circ$	при $\gamma=0^\circ$	при $\gamma=7^\circ$	при $\gamma=15^\circ$	при $\gamma=25^\circ$	при $\gamma=35^\circ$
$a=0,05$	33,39	30,84	101,41	6,26	166,7	534,41
$a=0,368$	84,14	29,55	23,21	50,35	100,85	316,79

Табл. 4.4.8 – Наибольшие нормальные напряжения по оси ОZ  $\sigma_{z \text{ max}}$  (МПа) при разных передних углах  $\gamma$  и толщинах срезах  $a$ . Сталь 40Х-Т15К6,  $v=120$  м/мин,  $\varphi=90^\circ$ ,  $b=2,82$ мм,  $\lambda=0^\circ$ ,  $\alpha=8^\circ$ .

$\gamma^\circ$ $a$ , мм	при $\gamma=-10^\circ$	при $\gamma=0^\circ$	при $\gamma=7^\circ$	при $\gamma=15^\circ$	при $\gamma=25^\circ$	при $\gamma=35^\circ$
$a=0,05$	5,67	3,05	5,72	18,35	362,16	1475,3
$a=0,368$	32,56	3,42	3,95	42,93	371,37	1231,2

Табл. 4.4.9 – Наибольшие деформации  $\varepsilon_{max}$  (мм) при разных передних углах  $\gamma$  и толщинах срезах  $a$ . Сталь 40Х-Т15К6,  $v=120$  м/мин,  $\varphi=90^\circ$ ,  $b=2,82$ мм,  $\lambda=0^\circ$ ,  $\alpha=8^\circ$ .

$\gamma^\circ$ $a$ , мм	при $\gamma=-10^\circ$	при $\gamma=0^\circ$	при $\gamma=7^\circ$	при $\gamma=15^\circ$	при $\gamma=25^\circ$	при $\gamma=35^\circ$
$a=0,05$	0,0018	0,00151	0,00149	0,00187	0,00367	0,0091
$a=0,368$	0,007	0,0061	0,00513	0,00626	0,013	0,0272

Табл. 4.4.10 – Наибольшие касательные напряжения в плоскости YOZ  $\tau_{yoz\ max}$  (МПа) при разных передних углах  $\gamma$  и толщинах срезах  $a$ . Сталь 40Х-Т15К6,  $v=120$  м/мин,  $\varphi=90^\circ$ ,  $b=2,82$ мм,  $\lambda=0^\circ$ ,  $\alpha=8^\circ$ .

$\gamma^\circ$ $a$ , мм	при $\gamma=-10^\circ$	при $\gamma=0^\circ$	при $\gamma=7^\circ$	при $\gamma=15^\circ$	при $\gamma=25^\circ$	при $\gamma=35^\circ$
$a=0,05$	10,71	6,47	35,72	9,19	201,26	792,9
$a=0,368$	75,28	59,32	46,88	54,91	110,84	513,79

Табл. 4.4.11 – Наибольшие касательные напряжения в плоскости XOZ  $\tau_{xoz\ max}$  (МПа) при разных передних углах  $\gamma$  и толщинах срезах  $a$ . Сталь 40Х-Т15К6,  $v=120$  м/мин,  $\varphi=90^\circ$ ,  $b=2,82$ мм,  $\lambda=0^\circ$ ,  $\alpha=8^\circ$ .

$\gamma^\circ$ $a$ , мм	при $\gamma=-10^\circ$	при $\gamma=0^\circ$	при $\gamma=7^\circ$	при $\gamma=15^\circ$	при $\gamma=25^\circ$	при $\gamma=35^\circ$
$a=0,05$	23,1	23,49	28	21,64	36,86	126,57
$a=0,368$	145,73	118	96,35	59,4	76,61	176,38

Зависимости  $\sigma_{\text{экв}\ max}$ ,  $\sigma_y\ max$ ,  $\sigma_z\ max$ ,  $\varepsilon_{max}$ ,  $\tau_{yoz\ max}$ ,  $\tau_{xoz\ max}$  от переднего угла  $\gamma$  от +35 до  $-10^\circ$  для толщины среза  $a = 0,05$  и  $0,368$  (мм) представлены на рис. 4.4.11.



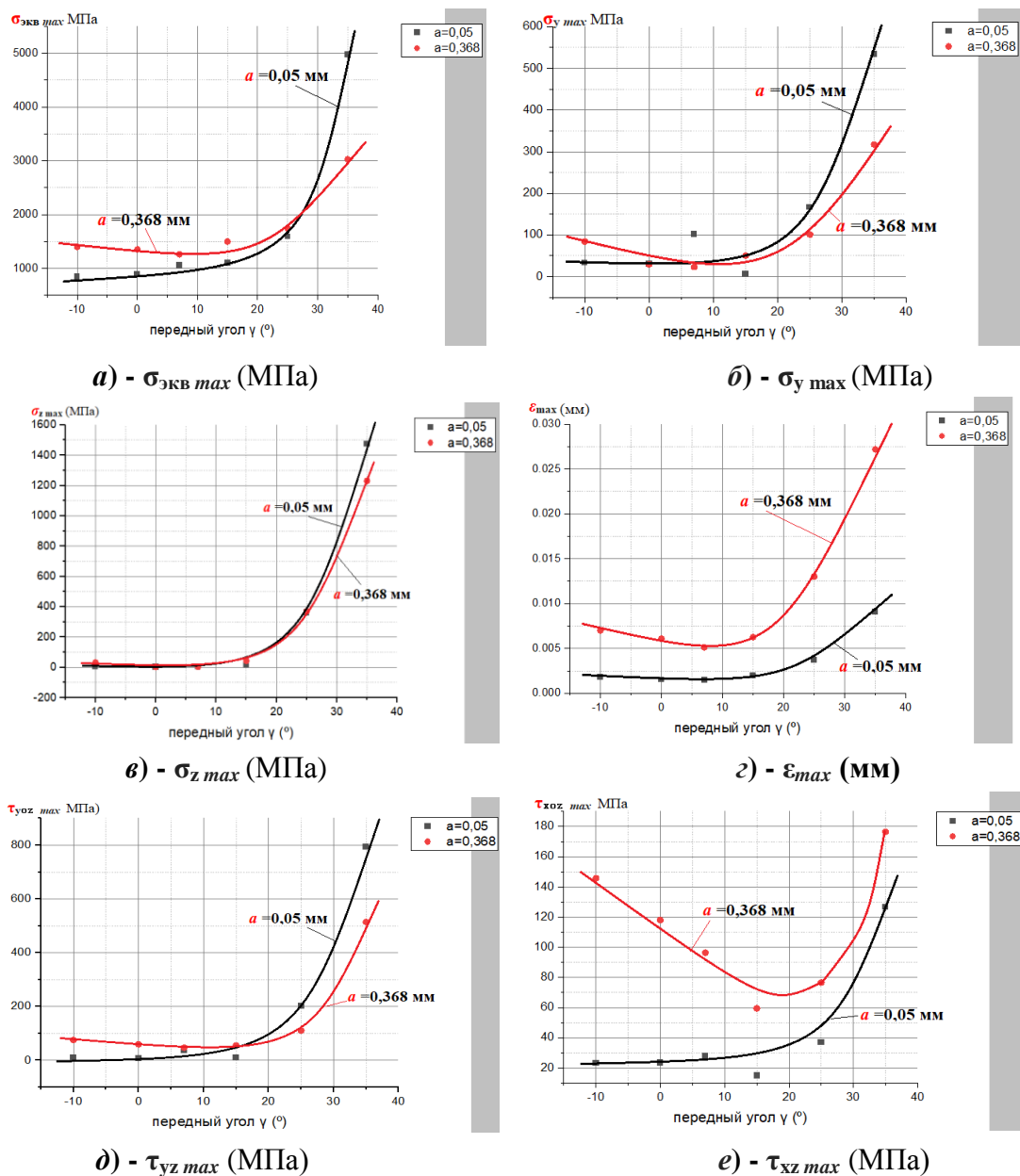


Рис. 4.4.11. Влияние толщины среза  $a$  и переднего угла  $\gamma$ : а) - на наибольшие эквивалентные напряжения  $\sigma_{\text{экв max}}$  (МПа) на передней поверхности при обработке стали 40Х; б) - на наибольшие нормальные напряжения по оси OY  $\sigma_y \text{ max}$  (МПа) на передней поверхности; в) - на наибольшие нормальные напряжения по оси OZ  $\sigma_z \text{ max}$  (МПа) на передней поверхности; г) - на наибольшие деформация  $\epsilon_{\text{max}}$  (мм) на передней поверхности; д) - на наибольшие касательные напряжения в плоскости YOZ  $\tau_{yz \text{ max}}$  (МПа) на передней поверхности; е) - на наибольшие касательные напряжения в плоскости XOZ  $\tau_{xz \text{ max}}$  (МПа) на передней поверхности.

Характер графиков при  $a = 0,05$  мм и  $a = 0,368$  мм на рис. 4.4.11 в целом совпадает. С увеличением переднего угла  $\gamma$  при обработке стали 40Х наибольшие

напряжения немного уменьшаются или остаются неизменными до  $\gamma = 15^\circ$ , после чего быстро увеличиваются с увеличением  $\gamma$ . При  $\gamma = 35^\circ$  величина  $\sigma_{\text{экв max}}$  становится больше предела прочности твёрдого сплава Т15К6 на сжатие, что говорит о недопустимости работы при переднем угле более  $25^\circ$ . Особое внимание необходимо уделить  $\sigma_{\text{экв max}}$  при  $a = 0,05$  мм: при  $\gamma > 15^\circ$   $\sigma_{\text{экв max}}$  больше, чем при  $a = 0,368$  мм, что совпадает с наблюдениями на практике обработки с большими передними углами, когда инструмент чаще ломается при малой толщине среза. Нами это объясняется особенностью уравнения (4.1.2):

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

При большом переднем угле из-за **отрицательного** знака перед второй частью уравнения нормальная сила на передней поверхности уменьшается тем больше, чем больше толщина среза  $a$ .

Общая деформация  $\varepsilon_{\text{max}}$  при  $a = 0,368$  мм существенно больше, чем при  $a = 0,05$  мм, и увеличивается с увеличением переднего угла  $\gamma$  инструмента, и при  $\gamma \geq 15^\circ$  наклон кривой резко увеличивается, и при  $a = 0,368$  мм больше, чем при  $a = 0,05$  мм. Это говорит о возможности отслаивания износостойкого покрытия при попытках использовать инструменты с большим передним углом для черновой обработки: несмотря на уменьшение силы резания деформация инструментального материала существенно увеличивается, поэтому надёжность соединения покрытия с основным материалом инструмента уменьшается.

## 4.5. Исследование влияние износа по задней поверхности на НДС режущего клина

Появление износа на задней поверхности существенно изменяет НДС режущего инструмента. К нагрузкам на передней поверхности добавляются нагрузки со стороны фаски износа. В разделе 4.3 были представлены результаты исследования распределения контактных напряжений на искусственной фаске износа по задней поверхности с задним углом на фаске  $\alpha_h = 0^\circ$ .

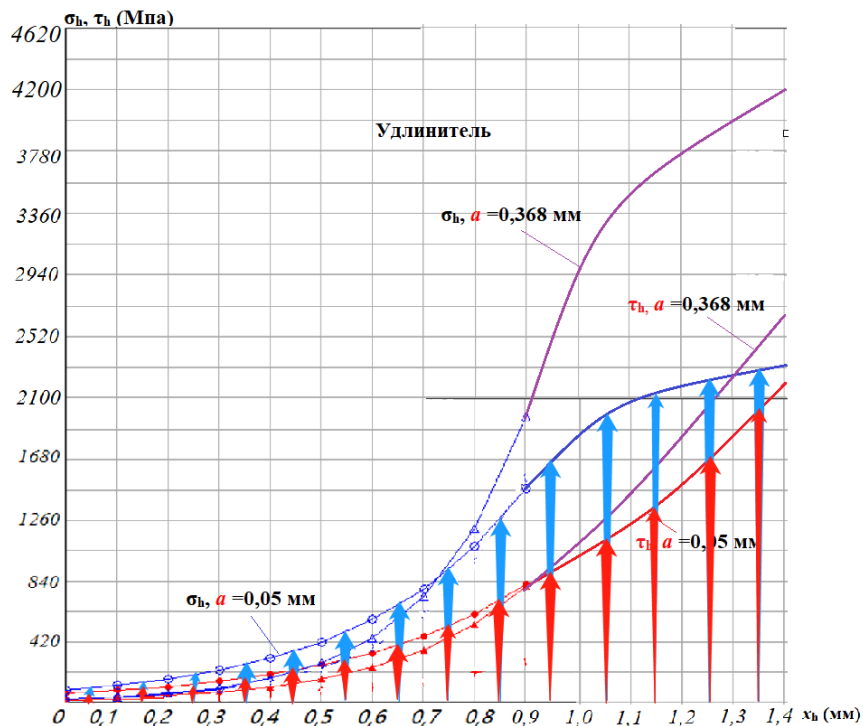


Рис. 4.5.1 – Определение средних **нормальных**  $\sigma_{hm}$  и **касательных**  $\tau_{hm}$  (МПа) контактных напряжений на фаске задней поверхности при толщине среза  $a = 0,05$  мм. Сталь 40Х-Т15К6,  $v = 120$  м/мин,  $\alpha_h = 0^\circ$ ,  $\varphi = 90^\circ$ ,  $b = 2,82$  мм, площадь участка по фаске задней поверхности с равномерным распределением контактных напряжений

Для приложения средних равномерно распределённых контактных напряжений на фаске по задней поверхности 3Д модели простого режущего клина по эюграм определялись средние **нормальные  $\sigma_{hm}$**  и **касательные  $\tau_{hm}$**  (МПа) контактные напряжения на небольших участках фаски задней поверхности (см. примеры на рис. 4.5.1 и 4.5.2), которые прикладывались к соответствующим участкам фаски по задней поверхности 3Д модели резца, как это описано в разделе 4.4 для приложения внешней нагрузки по передней поверхности. Для увеличения точности длина участков на фаске принималась  $L_{hi} = 0,1$  мм. Некоторые результаты расчёта НДС представлены на рис. 4.5.3

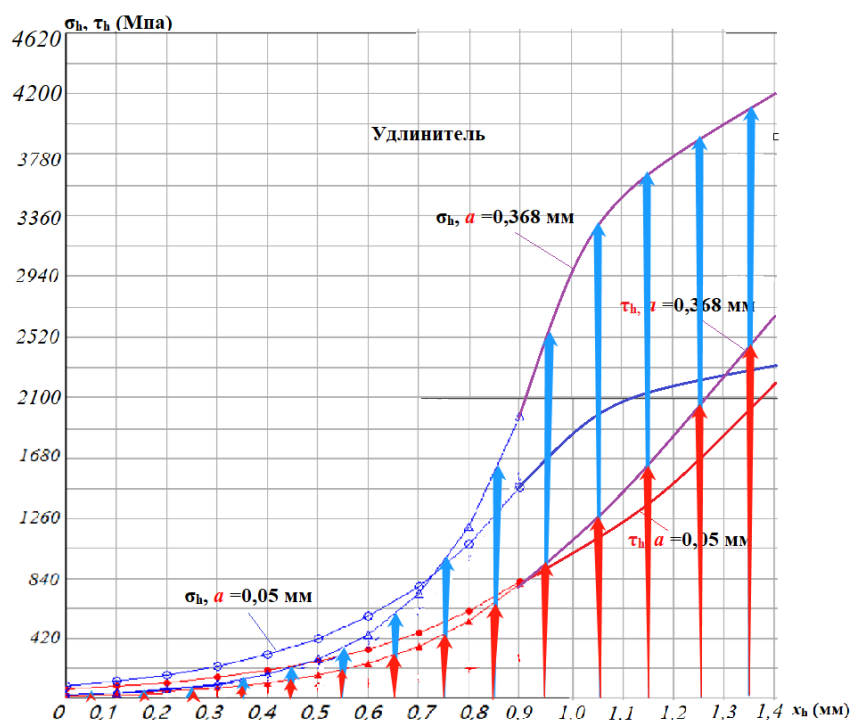


Рис. 4.5.2 – Определение средних **нормальных  $\sigma_{hm}$**  и **касательных  $\tau_{hm}$**  (МПа) контактных напряжений на фаске задней поверхности при толщине среза  $a = 0,368$  мм. Сталь 40Х-Т15К6,  $v = 120$  м/мин,  $\alpha_h = 0^\circ$ ,  $\varphi = 90^\circ$ ,  $b = 2,82$  мм, площадь участка по фаске задней поверхности с равномерным распределением контактных напряжений  $\Delta S_h = b \Delta h_f = b L_{hi} = 2,82 \cdot 0,1 = 0,282$  мм<sup>2</sup>.

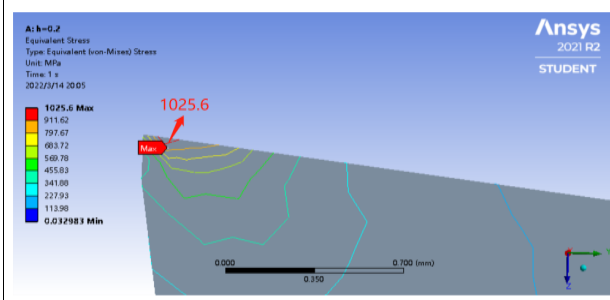


Рис. 5.3.1.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $40\text{X}^{\circ}-\text{T15K6}$ ;  $\gamma=+7^{\circ}$ ,  $a^{\circ}=0,05$  мм;  $c = 0,46$  мм;  $b \approx 2,82$  мм;  $F=338$  Н;  $N=405$  Н;  $5$  участков;  $h_f=0,2$  мм.

**a) -  $h_f=0,2$  мм**

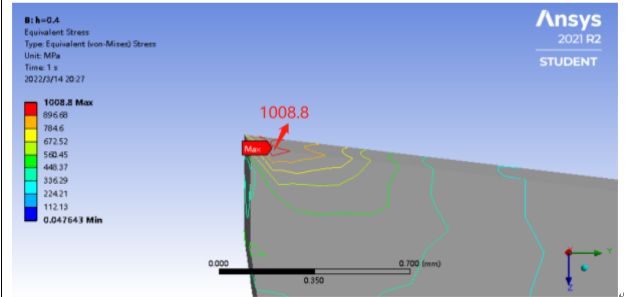


Рис. 5.3.2.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $40\text{X}^{\circ}-\text{T15K6}$ ;  $\gamma=+7^{\circ}$ ,  $a^{\circ}=0,05$  мм;  $c = 0,46$  мм;  $b \approx 2,82$  мм;  $F=338$  Н;  $N=405$  Н;  $5$  участков;  $h_f=0,4$  мм.

**б) -  $h_f=0,4$  мм**

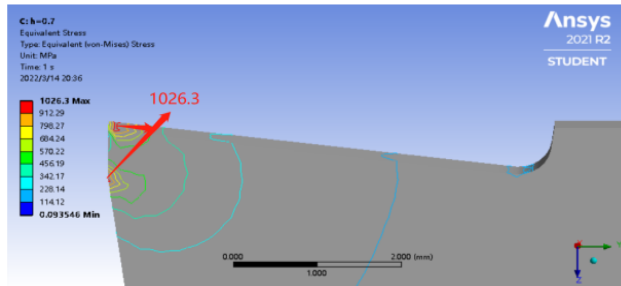


Рис. 5.3.3.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $40\text{X}^{\circ}-\text{T15K6}$ ;  $\gamma=+7^{\circ}$ ,  $a^{\circ}=0,05$  мм;  $c = 0,46$  мм;  $b \approx 2,82$  мм;  $F=338$  Н;  $N=405$  Н;  $5$  участков;  $h_f=0,7$  мм.

**в) -  $h_f=0,7$  мм**

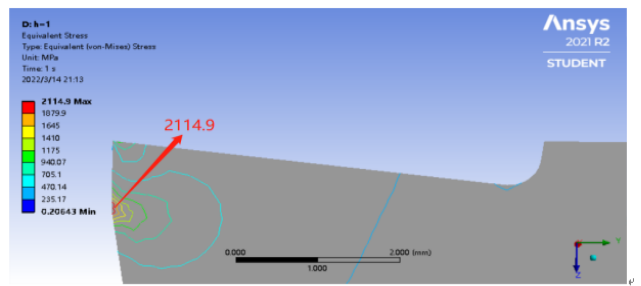


Рис. 5.3.4.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $40\text{X}^{\circ}-\text{T15K6}$ ;  $\gamma=+7^{\circ}$ ,  $a^{\circ}=0,05$  мм;  $c = 0,46$  мм;  $b \approx 2,82$  мм;  $F=338$  Н;  $N=405$  Н;  $5$  участков;  $h_f=1$  мм.

**г) -  $h_f=1$  мм**

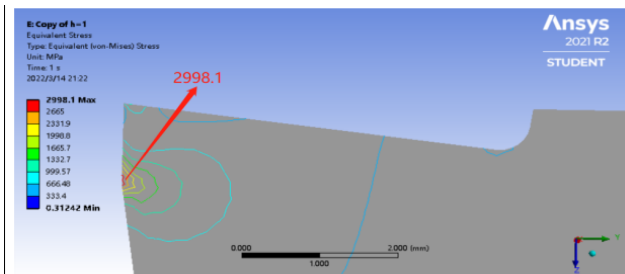


Рис. 5.3.5.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $40\text{X}^{\circ}-\text{T15K6}$ ;  $\gamma=+7^{\circ}$ ,  $a^{\circ}=0,05$  мм;  $c = 0,46$  мм;  $b \approx 2,82$  мм;  $F=338$  Н;  $N=405$  Н;  $5$  участков;  $h_f=1,2$  мм.

**д) -  $h_f=1,2$  мм**

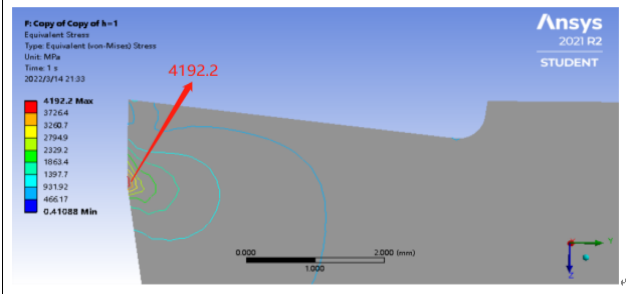


Рис. 5.3.6.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $40\text{X}^{\circ}-\text{T15K6}$ ;  $\gamma=+7^{\circ}$ ,  $a^{\circ}=0,05$  мм;  $c = 0,46$  мм;  $b \approx 2,82$  мм;  $F=338$  Н;  $N=405$  Н;  $5$  участков;  $h_f=1,4$  мм.

**е) -  $h_f=1,4$  мм**

Рис. 4.5.3 – Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  в режущем клине ( $\gamma = +7^{\circ}$ ) при прямоугольном резании диска при толщине среза  $a=0,05$  мм при различной длине фаски износа по задней поверхности  $h_f$ : а -  $h_f=0,2$  мм; б -  $h_f=0,4$  мм; в -  $h_f=0,7$  мм; г -  $h_f=1$  мм; д -  $h_f=1,2$  мм; е -  $h_f=1,4$  мм.

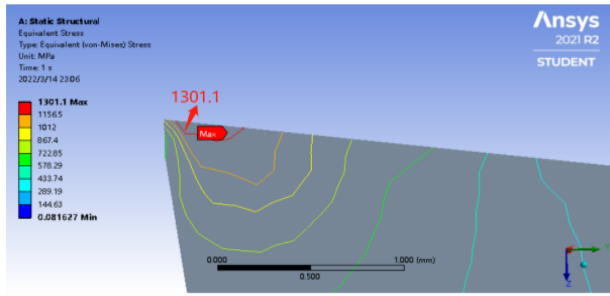


Рис. 5.3.7.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $^{\circ}40X^{\circ}\text{-}^{\circ}T15K6$ ,  $\gamma=+7^{\circ}$ ,  $a=0,368$  мм,  $c=1,84$  мм,  $b=2,82$  мм,  $F=1425$  Н,  $N=2214$  Н, 10 участков,  $h_f=0,2$  мм.

**a) -  $h_f=0,2$  мм**

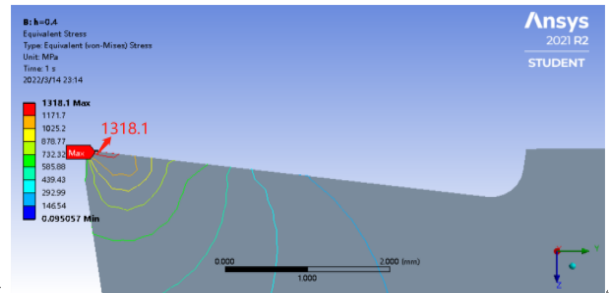


Рис. 5.3.8.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $^{\circ}40X^{\circ}\text{-}^{\circ}T15K6$ ,  $\gamma=+7^{\circ}$ ,  $a=0,368$  мм,  $c=1,84$  мм,  $b=2,82$  мм,  $F=1425$  Н,  $N=2214$  Н, 10 участков,  $h_f=0,4$  мм.

**б) -  $h_f=0,4$  мм**

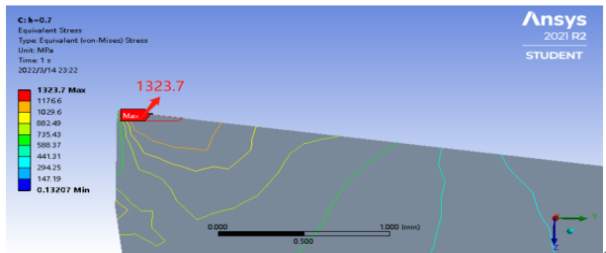


Рис. 5.3.9.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $^{\circ}40X^{\circ}\text{-}^{\circ}T15K6$ ,  $\gamma=+7^{\circ}$ ,  $a=0,368$  мм,  $c=1,84$  мм,  $b=2,82$  мм,  $F=1425$  Н,  $N=2214$  Н, 10 участков,  $h_f=0,7$  мм.

**в) -  $h_f=0,7$  мм**

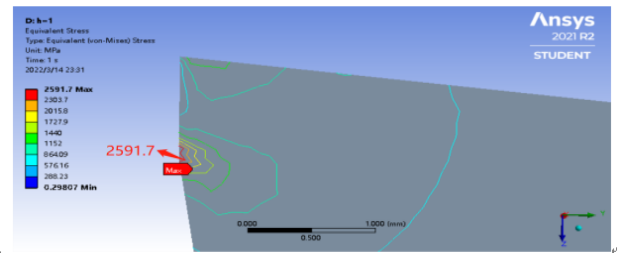


Рис. 5.3.10.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $^{\circ}40X^{\circ}\text{-}^{\circ}T15K6$ ,  $\gamma=+7^{\circ}$ ,  $a=0,368$  мм,  $c=1,84$  мм,  $b=2,82$  мм,  $F=1425$  Н,  $N=2214$  Н, 10 участков,  $h_f=1$  мм.

**г) -  $h_f=1$  мм**

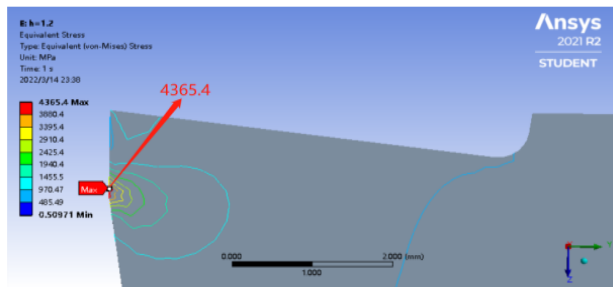


Рис. 5.3.11.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $^{\circ}40X^{\circ}\text{-}^{\circ}T15K6$ ,  $\gamma=+7^{\circ}$ ,  $a=0,368$  мм,  $c=1,84$  мм,  $b=2,82$  мм,  $F=1425$  Н,  $N=2214$  Н, 10 участков,  $h_f=1,2$  мм.

**д) -  $h_f=1,2$  мм**

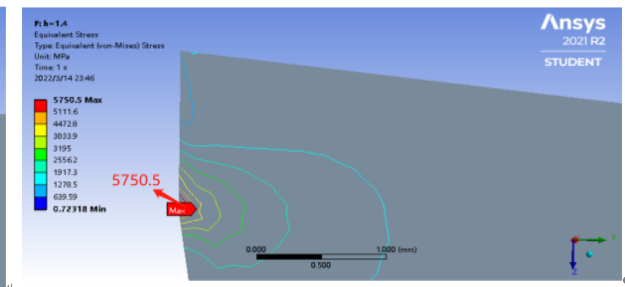


Рис. 5.3.12.1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  в режущем клине при прямоугольном резании диска. Сталь  $^{\circ}40X^{\circ}\text{-}^{\circ}T15K6$ ,  $\gamma=+7^{\circ}$ ,  $a=0,368$  мм,  $c=1,84$  мм,  $b=2,82$  мм,  $F=1425$  Н,  $N=2214$  Н, 10 участков,  $h_f=1,4$  мм.

**е) -  $h_f=1,4$  мм**

Рис. 4.5.4 – Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  в режущем клине ( $\gamma=+7$ ) при прямоугольном резании диска при толщине среза  $a=0,368$  мм при различной длине фаски износа по задней поверхности  $h_f$ : а -  $h_f=0,2$  мм; б -  $h_f=0,4$  мм; в -  $h_f=0,7$  мм; г -  $h_f=1$  мм; д -  $h_f=1,2$  мм; е -  $h_f=1,4$  мм..

При увеличении толщины среза величина наибольшего эквивалентного напряжения также увеличивается (рис. 4.5.3, *a* и рис. 4.5.4, *a*), несмотря на ещё небольшую нагрузку со стороны фаски задней поверхности, т.к. контактные напряжения ещё небольшие при длине фаски  $h_f$  менее 0,2 мм (рис. 4.5.1). Это вызвано увеличением нагрузки со стороны передней поверхности из-за бóльшей величины толщины среза.

При малой толщине среза  $a = 0,05$  мм и сравнительно небольшой длине фаски износа по задней поверхности  $h_f = 0,2$  мм (рис. 4.5.3, *a*), величина наибольшего эквивалентного напряжения почти такая же, что и при большой толщине среза  $a = 0,368$  мм (рис. 4.5.4, *a*). Это говорит о большом влиянии прогиба поверхности резания – часто изношенный инструмент чаще ломается при очень малой толщине среза  $a < 0,05$  мм, т.к. длина волны упругого восстановления мала и рост нормальных контактных напряжений на фаске происходит более интенсивно.

По данным рисунков 4.5.3, *a* и *e* и 4.5.43, *a* и *e* можно сделать три вывода:

- 1) При малой толщине среза ( $a = 0,05$  мм) с увеличением длины фаски износа  $h_f$  от 0,2 до 1,4 мм эквивалентное напряжение увеличивается в 4 раза;
- 2) При большой толщине среза ( $a = 0,368$  мм) с увеличением длины фаски износа  $h_f$  от 0,2 до 1,4 мм эквивалентное напряжение увеличивается в 4,4 раза;
- 3) При длине фаски износа  $h_f = 1,4$  мм эквивалентное напряжение при большой толщине среза ( $a = 0,368$  мм) существенно больше, чем при малой толщине среза ( $a = 0,05$  мм), что соответствует практике обработки резанием.

В таблицах 4.5.1 и 4.5.2 представлены основные результаты расчёта НДС простого режущего клина при обточке диска из стали 40Х, а на рис. 4.5.5 графики влияния длины фаски износа по задней поверхности на величину наибольшего эквивалентного напряжения и наибольшей деформации.

Табл. 4.5.1 – Наибольшее эквивалентное напряжение  $\sigma_{\text{экв max}}$  (МПа) при разной величине толщины среза  $a$  и длины фаски износа  $h_f$ . Сталь 40Х-Т15К6,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $v=120$  м/мин,  $\varphi=90^\circ$ ,  $b=2,82$  мм,  $\lambda=0^\circ$ ,  $\alpha=8^\circ$ .

$h_f$ , мм $a$ , мм	при $h_f=0$	при $h_f=0,2$	при $h_f=0,4$	при $h_f=0,7$	при $h_f=1$	при $h_f=1,2$	при $h_f=1,4$
$a=0,05$	1061	1025,6	1008,8	1026,3	2114,9	2998,1	4192,2
$a=0,368$	1260	1301,1	1318,1	1323,7	2591,7	4365,4	5750,5

Табл. 4.5.2 – Наибольшая деформация  $\varepsilon_{\text{max}}$  (мм) при разной величине толщины среза  $a$  и длины фаски износа  $h_f$ . Сталь 40Х-Т15К6,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $v=120$  м/мин,  $\varphi=90^\circ$ ,  $b=2,82$  мм,  $\lambda=0^\circ$ ,  $\alpha=8^\circ$ .

$h_f$ , мм $a$ , мм	при $h_f=0$	при $h_f=0,2$	при $h_f=0,4$	при $h_f=0,7$	при $h_f=1$	при $h_f=1,2$	при $h_f=1,4$
$a=0,05$	0,00149	0,00169	0,00198	0,00273	0,005	0,00733	0,00972
$a=0,368$	0,00513	0,00505	0,00503	0,0053	0,00715	0,0115	0,0158

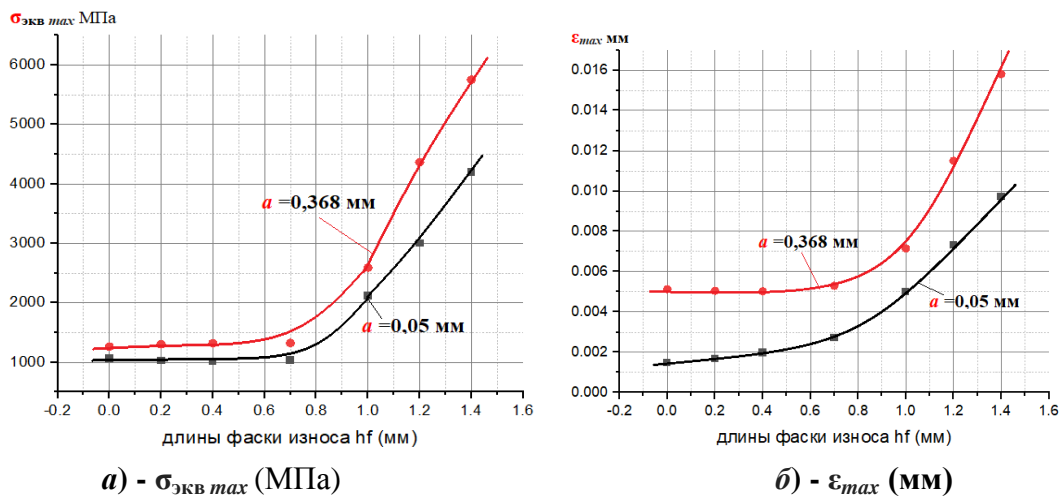


Рис. 4.5.5. Влияние толщины среза  $a$  и длины искусственной фаски износа по задней поверхности  $h_f$  на наибольшее эквивалентное напряжение  $\sigma_{\text{экв max}}$  (МПа) (а) и на наибольшую деформацию в простом режущем клине  $\varepsilon_{\text{max}}$  (мм) (б). Сталь 40Х-Т15К6,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $v=120$  м/мин,  $\varphi=90^\circ$ ,  $b=2,82$  мм,  $\lambda=0^\circ$ ,  $\alpha=8^\circ$ .

Из рисунка 4.4.5, а видно, что характер изменения  $\sigma_{\text{экв max}}$  при малой и большой толщине среза  $a$  аналогичны. При длине фаски износа  $h_f < 0,6$  мм



начальное её увеличение практически не сказывается на  $\sigma_{\text{экв max}}$ , что связано с небольшой величиной контактных напряжений на фаске у режущей кромки (см. рис. 4.5.1) из-за прогиба поверхности резания (см. рис. 4.3.2) и с увеличением поперечного сечения режущего клина с увеличением длины фаски.

Существенное увеличение  $\sigma_{\text{экв max}}$  при длине фаски износа  $h_f > 0,9$  мм связано с интенсивным увеличением контактных напряжений (и прежде всего нормальных  $\sigma_n$ ) на фаске задней поверхности (см. рис. 4.5.1) из-за упругого восстановления поверхности резания.

Аналогичные изменения происходят и с графиками наибольшей деформации  $\varepsilon_{\text{max}}$  (см. рис. 4.5.5, б). Существенная разница наблюдается в гораздо большей деформации при большой толщине среза  $a = 0,368$  мм.

Когда длина фаски износа задней поверхности  $h_f$  становится больше 1,3 мм, наибольшее эквивалентное напряжение становится больше предела прочности на сжатие, что приведёт к выкрашиванию и даже к сколу режущей части, и это подтверждается практикой обработки резанием.

#### 4.6. Напряжения в режущей пластине при несвободном резании стали

При несвободном резании (рис. 4.6.1), наиболее часто используемом в производстве, наибольшая доля нагрузки от силы резания приходится на главную режущую кромку, что позволяет рассматривать напряжённо-деформированное состояние (НДС) режущего инструмента в главной секущей плоскости как плоское (рис. 4.6.3) при отдалении от вершины более трёх величин радиуса при вершине  $r$  (рис. 4.6.2). При черновой обработке удаление припуска происходит при большой глубине резания  $t$  (более 2-3 мм), что оправдывает допущение о плоском НДС вдали от вершины резца.

Однако вблизи вершины режущей пластины нагрузка со стороны вспомогательной режущей кромки приводит к увеличению напряжений в режущем клине, особенно при большой подаче  $s \geq 0,4$  мм/об) и малом радиусе при вершине  $r \leq 0,8$  мм.

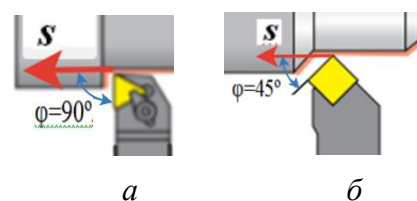


Рис. 4.6.1 – Использование трёхгранных (а) и квадратных (б) сменных многогранных пластин (СМП) как примеры несвободного резания

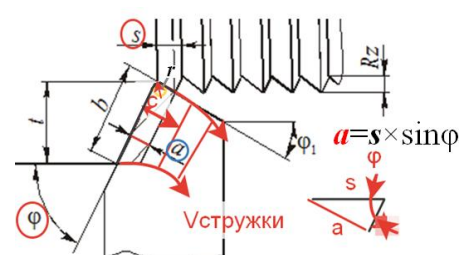


Рис. 4.6.2 – Основные параметры геометрии токарного резца и режима резания на виде сверху

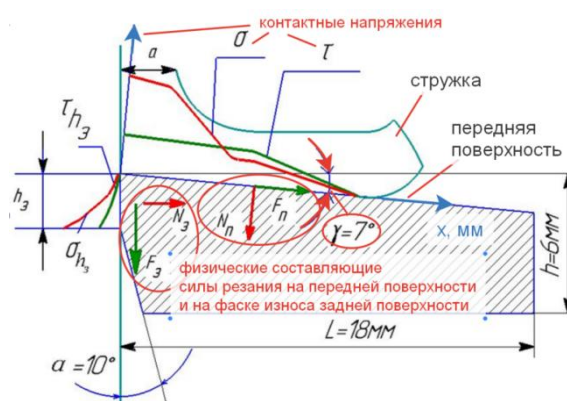


Рис. 4.6.3 – Распределение контактных напряжений на передней и задней поверхности

Технологические составляющие силы резания  $P_z$ ,  $P_x$  и  $P_y$  были измерены экспериментально с помощью динамометра Kistler, по которым сначала были рассчитаны нормальная  $N$  и касательная  $F$  (сила трения) составляющие силы резания, а затем по ним были рассчитаны эпюры нормальных  $\sigma$  и касательных  $\tau$  контактных напряжений на передней поверхности резца.

Для исследования влияний длины фаски износа по задней поверхности на главной задней поверхности затачивалась фаска с задним углом  $\alpha_\phi = \alpha_h = 0^\circ$  длиной  $h_z = h_f = 2$  мм. Выполнялось несвободное косоугольное резание с продольной подачей  $s$  (мм/об) с постоянной глубиной резания  $t = 2$  мм, постоянным главным углом в плане  $\phi = 45^\circ$ , а для уменьшения влияния контакта по вспомогательной режущей кромке использовались малый радиус при вершине  $r = 0,05$  мм и большой вспомогательный угол в плане  $\phi_1 = 45^\circ$ . Продольная подача  $s$  (мм/об) изменялась в разных сериях экспериментов от 0,07 до 0,52 мм/об. На процесс образования стружки, в основном, влияет не подача  $s$  сама по себе, а толщина среза, которая рассчитывается по формуле:  $a = s \cdot \sin\phi$  (мм).

После измерения составляющих силы резания резец снимался со станка и затачивался по главной задней поверхности, что приводило к уменьшению длины фаски. Для увеличения точности изменение фаски выполнялось на 0,1-0,2 мм. Заточка только по главной задней поверхности позволила не изменять первоначально заточенный задний угол на фаске  $\alpha_h = 0^\circ$ . После этого выполнялось резание, измерялись технологические составляющие силы резания, которые записывались в табл. 4.1.1 – 4.1.3 и всё повторялось.

Последняя заточка по задней поверхности приводила к отсутствию фаски на задней поверхности, поэтому принималось, что в этом случае измеряются силы на передней поверхности  $P_{zп}$ ,  $P_{xп}$  и  $P_{yп}$ . Разница сил при наличии фаски (общие силы резания)  $P_z$ ,  $P_x$  и  $P_y$  и без неё принималась как величина составляющих силы резания, действующих на фаске по задней поверхности длиной  $h_{fi}$  ( $h_i$ ), т.е.  $P_{zhi} = P_{zi} - P_{zп}$ ;  $P_{xhi} = P_{xi} - P_{xп}$  и  $P_{yhi} = P_{yi} - P_{yп}$ .

Отношение приращения силы  $P_z$  ( $\Delta P_{zi} = P_{zi} - P_{zi-1}$ ) к приращению площади на фаске  $\Delta S_{hi}$  за счёт увеличения длины фаски на  $\Delta h_i$  ( $\Delta S_{hi} = b \cdot \Delta h_i = b \cdot (h_i - h_{i-1})$ ) есть удельная сила  $P_{zh}$  ( $q_{Pzhi}$ ) на фаске, а значит удельная сила трения  $q_{Fhi}$  на фаске в точке  $i$ , т.е. на расстоянии  $x_{hi}$  от режущей кромки на фаске по задней поверхности. Ширина среза  $b$  рассчитывается по известной формуле  $b = t / \sin \varphi$  (мм).

Уменьшение  $\Delta h_i$  до величины, приближающейся к нулю ( $\Delta h_i \rightarrow 0$  мм), приводит к приближению удельной силы  $P_{zh}$  на фаске, т.е.  $q_{Pzhi}$ , к величине касательного контактного напряжения на фаске в точке  $i$  фаске, т.е.  $q_{Pzhi} \approx \tau_{hi}$  (Н/мм<sup>2</sup> или МПа).

Аналогично выполняется расчёт нормального контактного напряжения на фаске в точке  $i$ :  $\sigma_{hi} \approx \Delta P_{xyi} / \Delta S_{hi} = (P_{xyi} - P_{xyi-1}) / [b \cdot (h_i - h_{i-1})]$  (МПа).

Контакт с заготовкой по вспомогательной режущей кромке небольшой и зависит от вспомогательного угла в плане  $\varphi_1$  (если радиус при вершине  $r < 0,8$  мм), а также от подачи  $s$ . При бóльшем радиусе ( $r > 1,2$  мм) угол в плане мало влияет на длину контакта по вспомогательной режущей кромке, особенно при  $s < 0,21$  мм/об.

Прочность инструмента более актуальна при черновой обработке, поэтому для изучения влияния сил со стороны вспомогательной режущей кромки принималась продольная подача  $s = 0,52$  мм/об, а радиус при вершине  $r = 0,8$  мм, что соответствует большинству рекомендаций при черновой обработке.

При сравнительно небольшом радиусе  $r = 0,8$  мм принималось, что эпюры контактных напряжений на нём соответствуют эпюрам на прямолинейном участке главной режущей кромки, т.е. как при прямоугольном свободном резании. Аналогично принимались эпюры на вспомогательной режущей кромке, тем более, что при

продольной подаче  $s = 0,52$  мм/об, переднем угле  $\gamma = 10^\circ$  и главном угле в плане  $\phi = 45^\circ$  длина контакта стружки по передней поверхности  $c = 1,797$  мм (рис. 4.1.4) доходит до вспомогательной режущей кромки, поэтому на радиусном участке при вершине резца достаточно приложения эпюр от главной режущей кромки.

При  $\phi = 45^\circ$  и  $s = 0,52$  мм/об толщина среза  $a = s \cdot \sin \phi = 0,368$  мм, при  $\phi = 90^\circ$  (при использовании трёхгранной СМП, см. рис. 4.6.1) подача принималась  $s = 0,368$  мм/об, чтобы была такая же толщина среза  $a = 0,368$  мм для равнозначности сравнения: чтобы были одинаковые эпюры контактных напряжений, которые зависят от толщины среза  $a$ , а не от подачи  $s$ .

Несвободное косоугольное резание (рис. 4.6.1 и 4.6.2) воспроизводится в наиболее распространенных технологических схемах обработки металлов – при точении, строгании, фрезеровании, сверлении и пр. Со стороны вспомогательной режущей кромки возникает дополнительные составляющие

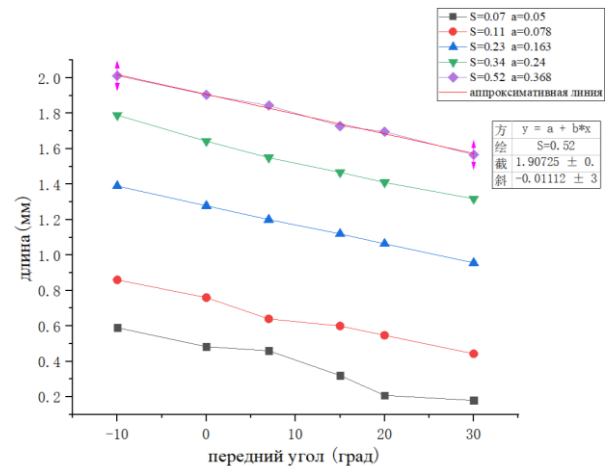


Рис. 4.1.4 (повторение) – Графики изменения длины контакта стружки  $c$  (мм) с передней поверхностью резца в зависимости от переднего угла  $\gamma$  ( $^\circ$ ) и толщины среза  $a$  (мм) при  $\phi = 45^\circ$

$P_{z1}$ ,  $P_{y1}$  и  $P_{x1}$  силы резания, что приводит к изменению НДС режущего инструмента вблизи вершины инструмента и более интенсивному износу.

При несвободном резании наибольшая доля нагрузки от силы резания приходится на главную режущую кромку, особенно при глубине резания  $t$  более 1 мм и при отдалении от вершины более трёх величин радиуса при вершине  $r$  (см. рис. 4.6.2). При черновой обработке удаление припуска происходит при большой глубине резания  $t$  (более 2-3 мм), что оправдывает допущение о плоском НДС вдали от вершины резца [6, 11].

#### **4.6.1. Исследование НДС целых трёхгранных СМП**

Для исследование НДС СМП было создано **9 шт.** 3Д моделей с разными передними углами ( $\gamma = -10, 0$  и  $+10^\circ$ ) и при разной доле сил на вспомогательной режущей кромке: *а)* **3 шт.** при нагрузке только со стороны главной режущей кромки; *б)* **3 шт.** при нагрузке со стороны главной режущей кромки 90% от общих составляющих силы резания и 10% со стороны вспомогательной режущей кромки; *в)* **3 шт.** при нагрузке со стороны главной режущей кромки 80% от общих составляющих силы резания и 20% со стороны вспомогательной режущей кромки.

Таблица. 4.6.1 — Составляющие силы резания при нагрузке только со стороны главной режущей кромки для расчёте НДС резца с шириной  $b=2$  мм. Сталь 40Х-Т15К6,  $\gamma = 10^\circ$ ,  $a=0,368$  мм,  $c=1,797$ мм.

№ участка от режущей кромки	Длина уч-ка $L_{ni}$ , мм	$\sigma_i$ , МПа	$N_i$ , Н	$P_{z Ni}$ , Н	$P_{y Ni}$ , Н	$\tau_i$ , МПа	$F_i$ , Н	$P_{y Fi}$ , Н	$P_{z Fi}$ , Н	$P_{zi}$ , Н	$P_{yi}$ , Н
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
1	0-0,2	803,5	321,4	316,5	55,8	337,8	135	133	23,4	339,9	77,1
2	0,2-0,37	774,5	263,3	259,3	45,7	337,8	115	113	19,9	279,2	67,3
3	0,37-0,5	680	176,8	174	30,7	337,8	87,8	86,5	15,2	189,2	55,8
4	0,5-0,6	540	108	106,3	18,7	337,8	67,6	66,6	11,7	118	47,9
5	0,6-0,72	409	98,1	96,6	17	337,8	81	79,8	14	110,6	62,8
6	0,72-0,82	274,4	54,9	54	9,5	337,8	67,6	66,6	11,7	65,7	57,1
7	0,82-1,1	195	109,2	107,5	19	315,2	176	173	30,6	138,1	154
8	1,1-1,4	140	84	82,7	14,6	205	123	121	21,3	104	106
9	1,4-1,6	75	30	29,5	5,2	115	46	45,3	8	37,5	40,1
10	1,6-1,797	25	9,8	9,6	1,7	45	17,7	17,4	3	12,6	15,7

Таблица. 4.6.2 — Составляющие силы резания при нагрузке со стороны главной режущей кромки 90% для расчёте НДС резца с шириной  $b=2$  мм.

Сталь 40Х-Т15К6,  $\gamma = 10^\circ$ ,  $a=0,368$  мм,  $c=1,797$ мм.

№ участка от режущей кромки	Длина уч-ка $L_{ni}$ , мм	$P_{zi}$ , Н	$P_{yi}$ , Н	при нагрузке по главной режущей кромки 90%		при нагрузке по вспомогательной режущей кромки 10%	
				$P_{zi}$ , Н	$P_{yi}$ , Н	$P_{zi}$ , Н	$P_{yi}$ , Н
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
1	0-0,2	339,9	77,1	305,9	69,4	34	7,7
2	0,2-0,37	279,2	67,3	251,3	60,6	27,9	6,7
3	0,37-0,5	189,2	55,8	170,3	50,2	18,9	5,6
4	0,5-0,6	118	47,9	106,2	43	11,8	4,8
5	0,6-0,72	110,6	62,8	99,5	56,5	11	6,3
6	0,72-0,82	65,7	57,1	59	51,4	6,6	5,7
7	0,82-1,1	138,1	154,3	124,3	138,9	13,8	15,4
8	1,1-1,4	104	106,4	93,6	95,8	10,4	10,6
9	1,4-1,6	37,5	40,1	33,8	36	3,8	4
10	1,6-1,797	12,6	15,7	11,3	14	1,3	1,6

Таблица. 4.6.3 — Составляющие силы резания при нагрузке со стороны главной режущей кромки 80% для расчёта НДС резца с шириной  $b=2$  мм. Сталь 40Х-Т15К6,  $\gamma = 10^\circ$ ,  $a=0,368$  мм,  $c=1,797$ мм.

№ участка от режущей кромки	Длина уч-ка $L_{pi}$ , мм	$P_{zi}$ , Н	$P_{yi}$ , Н	при нагрузке по главной режущей кромки 80%		при нагрузке по вспомогательной режущей кромки 20%	
				$P_{zi}$ , Н	$P_{yi}$ , Н	$P_{zi}$ , Н	$P_{yi}$ , Н
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
1	0-0,2	339,9	77,1	271,9	61,7	68	15,4
2	0,2-0,37	279,2	67,3	223,4	53,8	55,8	13,5
3	0,37-0,5	189,2	55,8	151,4	44,6	37,8	11,2
4	0,5-0,6	118	47,9	94,4	38,3	23,6	9,6
5	0,6-0,72	110,6	62,8	88,5	50,2	22	12,6
6	0,72-0,82	65,7	57,1	52,6	45,7	13	11,4
7	0,82-1,1	138,1	154,3	110,5	123,4	27,6	30,9
8	1,1-1,4	104	106,4	83,2	85	20,8	21,3
9	1,4-1,6	37,5	40,1	30	32	7,5	8
10	1,6-1,797	12,6	15,7	10	12,6	2,5	3

Приложение реального распределения контактных напряжений на переднюю поверхность моделей резца у режущей кромки позволило рассчитать распределение напряжений в режущем клине СМП с использованием программы ANSYS (рис. 4.6.4 – 4.6.6).



а) распределение эквивалентных напряжений при нагрузке только по главной режущей кромке (100%)

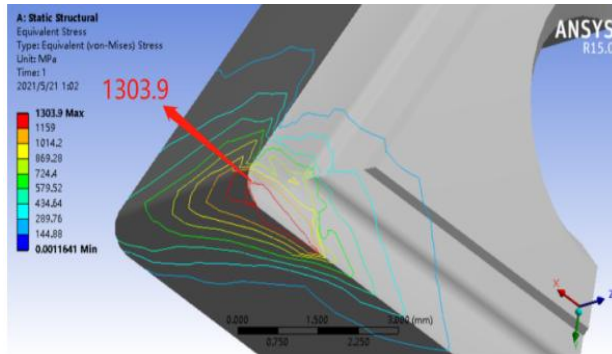


Рис. 3.6.1 – Распределение эквивалентных напряжений в 3-гранных СМП. Сталь 40Х<sup>2</sup>-Т15К6.  $\gamma=10^\circ$ .  $s=0,368$  мм/об.  $c=1,797$  мм.  $b=2$  мм.  $F=430$  Н.  $N=1244,6$  Н.

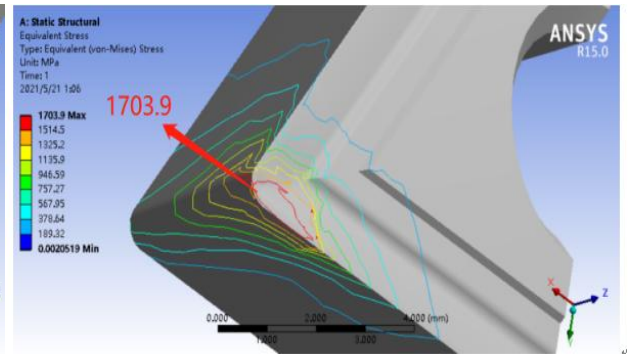


Рис. 3.6.2 – Распределение эквивалентных напряжений в 3-гранных СМП. Сталь 40Х<sup>2</sup>-Т15К6.  $\gamma=0^\circ$ .  $s=0,368$  мм/об.  $c=1,907$  мм.  $b=2$  мм.  $F=1039,4$  Н.  $N=1719,2$  Н.

а)  $\gamma = 10^\circ$

б)  $\gamma = 0^\circ$

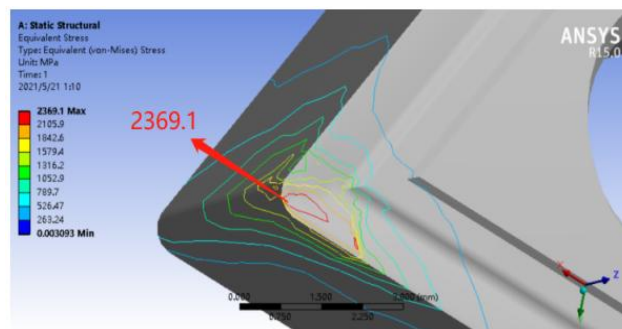


Рис. 3.6.3 – Распределение эквивалентных напряжений в 3-гранных СМП. Сталь 40Х<sup>2</sup>-Т15К6.  $\gamma=-10^\circ$ .  $s=0,368$  мм/об.  $c=2,02$  мм.  $b=2$  мм.  $F=1196$  Н.  $N=2019,9$  Н.

в)  $\gamma = -10^\circ$

Рис. 4.6.4 – Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв max}}$  (МПа) в трёхгранных СМП при нагрузке только по главной режущей кромке (100%) при толщине среза  $a=0,368$  мм,  $\varphi=90^\circ$ : а -  $\gamma=10^\circ$ ; б -  $\gamma=0^\circ$ ; в -  $\gamma=-10^\circ$ .

б) распределение эквивалентных напряжений при 90% нагрузки по главной режущей кромке

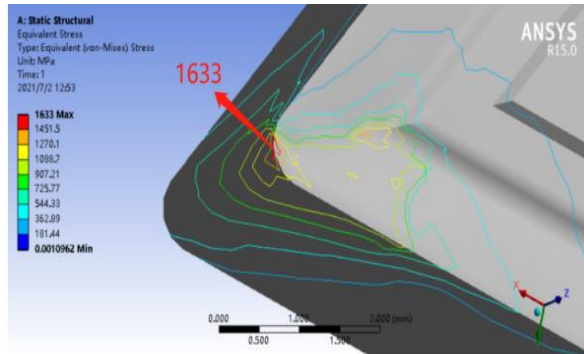


Рис. 3.6.4 – Распределение эквивалентных напряжений в 3-гранных СМП. Сталь 40Х<sup>2</sup>-Т15К6.  $\gamma=10^\circ$ .  $s=0,368$  мм/об.  $c=1,797$  мм.  $b=2$  мм.  $F=430$  Н.  $N=1244,6$  Н.

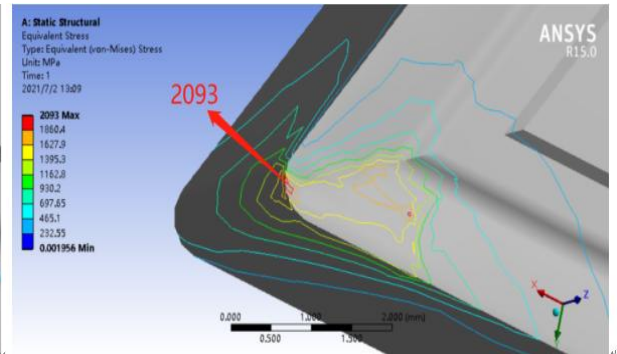


Рис. 3.6.5 – Распределение эквивалентных напряжений в 3-гранных СМП. Сталь 40Х<sup>2</sup>-Т15К6.  $\gamma=0^\circ$ .  $s=0,368$  мм/об.  $c=1,907$  мм.  $b=2$  мм.  $F=1039,4$  Н.  $N=1719,2$  Н.

а)  $\gamma = 10^\circ$

б)  $\gamma = 0^\circ$

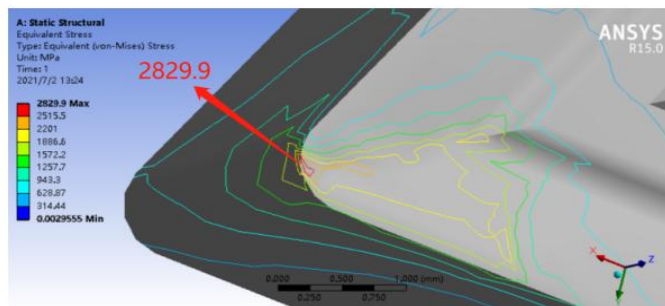


Рис. 3.6.6 – Распределение эквивалентных напряжений в 3-гранных СМП. Сталь 40Х<sup>2</sup>-Т15К6.  $\gamma=-10^\circ$ .  $s=0,368$  мм/об.  $c=2,02$  мм.  $b=2$  мм.  $F=1196$  Н.  $N=2019,9$  Н.

в)  $\gamma = -10^\circ$

Рис. 4.6.5 – Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв max}}$  (МПа) в трёхгранных СМП при нагрузке по главной режущей кромке 90%, по вспомогательной – 10% при толщине среза  $a=0,368$  мм,  $\varphi=90^\circ$ : а -  $\gamma=10^\circ$ ; б -  $\gamma=0^\circ$ ; в -  $\gamma=-10^\circ$ .

в) распределение эквивалентных напряжений при 80% нагрузки по главной режущей кромке

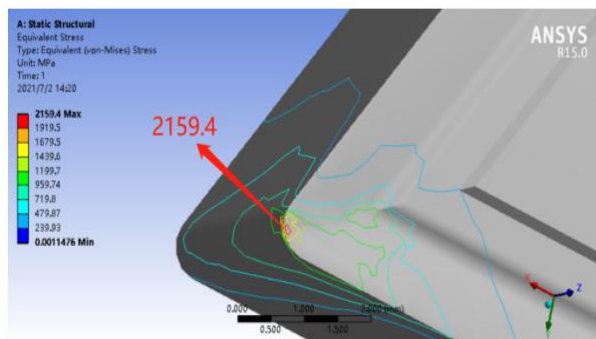


Рис. 3.6.7 – Распределение эквивалентных напряжений в 3-гранных СМП. Сталь 40Х<sup>2</sup>-Т15К6.  $\gamma=10^\circ$ ;  $s=0,368$  мм/об;  $c=1,797$  мм;  $b=2$  мм;  $F=430$  Н;  $N=1244,6$  Н.

а)  $\gamma = 10^\circ$

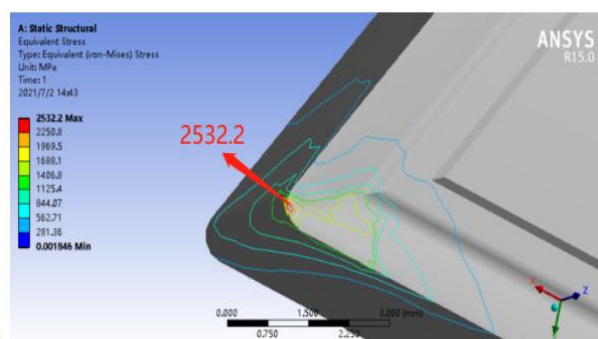


Рис. 3.6.8 – Распределение эквивалентных напряжений в 3-гранных СМП. Сталь 40Х<sup>2</sup>-Т15К6.  $\gamma=0^\circ$ ;  $s=0,368$  мм/об;  $c=1,907$  мм;  $b=2$  мм;  $F=1039,4$  Н;  $N=1719,2$  Н.

б)  $\gamma = 0^\circ$

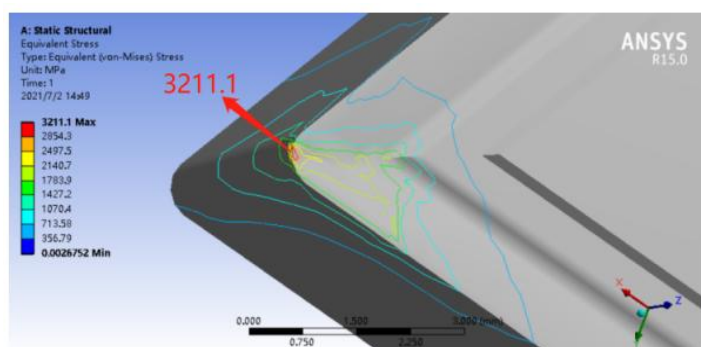


Рис. 3.6.9 – Распределение эквивалентных напряжений в 3-гранных СМП. Сталь 40Х<sup>2</sup>-Т15К6.  $\gamma=10^\circ$ ;  $s=0,368$  мм/об;  $c=2,02$  мм;  $b=2$  мм;  $F=1196$  Н;  $N=2019,9$  Н.

в)  $\gamma = -10^\circ$

Рис. 4.6.6 – Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв max}}$  (МПа) в трёхгранных СМП при нагрузке по главной режущей кромке 80%, по вспомогательной – 20% при толщине среза  $a=0,368$  мм,  $\varphi=90^\circ$ : а -  $\gamma=10^\circ$ ; б -  $\gamma=0^\circ$ ; в -  $\gamma=-10^\circ$ .

Исследования показали, что в 3-гранных СМП с увеличением доли нагрузки на **вспомогательной** режущей кромке величина наибольшего эквивалентного напряжения в 3-гранных СМП начинается **увеличиваться** по сравнению с вариантом, когда вся нагрузка приходится только на главную режущую кромку.

На рис. 4.6.7 представлены результаты расчёта НДС трёхгранных и квадратных СМП, которые показывают, что при увеличении доли нагрузки на вспомогательной режущей кромке при уменьшении величины переднего угла  $\gamma$  практически прямо пропорционально увеличивается наибольшее эквивалентное напряжение  $\sigma_{\text{экв max}}$ . В трёхгранных СМП (рис. 4.6.7, б)  $\sigma_{\text{экв max}}$  в 1,8 раз больше, чем в квадратных СМП (рис. 4.6.7, а), что связано с меньшим углом при вершине  $\varepsilon$ . В трёхгранных СМП влияние нагрузки со стороны вспомогательной режущей кромки более существенное, чем у квадратных.

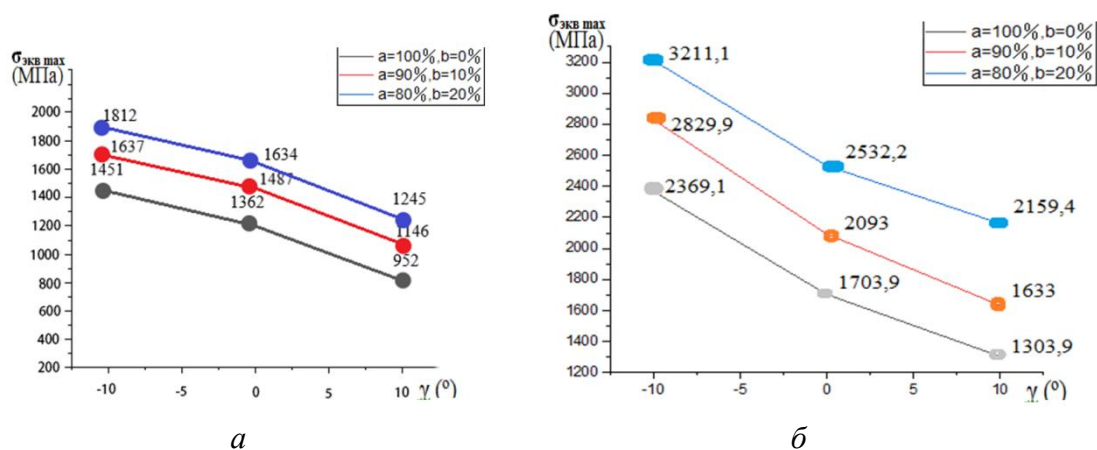


Рис. 4.6.7 –Влияние доли нагрузки на главной (а) и вспомогательной (б) режущей кромки (процентов от общей силы резания) и переднего угла  $\gamma$  (°) на величину наибольшего эквивалентного напряжения  $\sigma_{\text{экв max}}$  (МПа) в квадратных (Ян Анькан) (а) и в трёхгранных СМП (б).

При увеличении переднего угла величина наибольшего эквивалентного напряжения в 3-гранных СМП уменьшается более существенно, чем в квадратных СМП, но остаётся достаточно большой.

Для исследования НДС режущих пластин дополнительно была создана 3D модель квадратной СМП (рис. 4.6.8) с использованием программного

обеспечения Компас 2022. 3D модель была создана также и для трёхгранной СМП.

Квадратные СМП предназначены как для продольного точения, так и обточки торца и фаски, поэтому обычно имеют главный угол в плане  $\varphi = 45^\circ$ , вспомогательный угол в плане  $\varphi_1 = 45^\circ$ , угол наклона главной режущей кромки  $\lambda = 0^\circ$ , главный задний угол  $\alpha = 8^\circ$ .

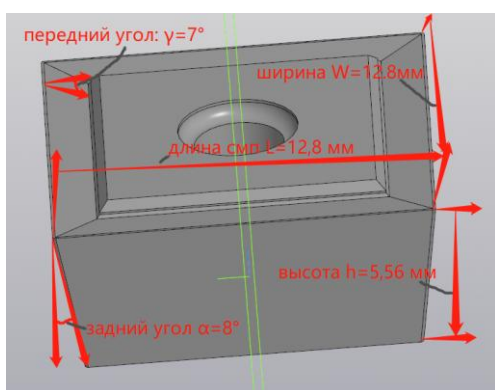


Рис. 4.6.8. Геометрические параметры 3D модели квадратной СМП: ширина  $W = 12,8 \text{ мм}$ , толщина  $h = 5,56 \text{ мм}$ , длина  $L = 12,8 \text{ мм}$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 45^\circ$ ,  $\lambda = 0^\circ$ ,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ ,  $r = 0,1 \text{ мм}$ .

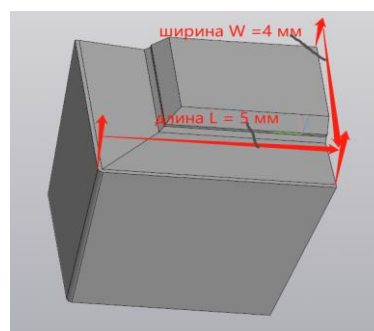


Рис. 4.6.9. Геометрические параметры вырезки из квадратной СМП: ширина  $b = 2,82 \text{ мм}$ , толщина  $h_{\text{СМП}} = 5,56 \text{ мм}$ , длина  $L = 5 \text{ мм}$ ,  $W = 4 \text{ мм}$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 45^\circ$ ,  $\lambda = 0^\circ$ ,  $r = 0,1 \text{ мм}$ ,  $\alpha = 8^\circ$ .

Для уменьшения объёма расчётов и применения мелкой сетки конечных элементов для увеличения точности расчётов выполнялся расчёт НДС не только всей СМП, но и вырезки из неё (рис. 4.6.9).

Расчёт НДС СМП выполнялся также с разной величиной вспомогательного угла в плане  $\varphi_1 = 10, 20$  и  $45^\circ$  (при  $\varphi_1 = 10$  и  $20^\circ$  это уже неквадратные СМП), радиуса при вершине  $r = 0,1; 0,8$  и  $2$  мм, при разной величине продольной подачи  $s = 0,07; 0,34$  и  $0,52$  мм/об.

Применение вырезки из СМП оправдано, т.к. у них будет небольшой объём и размеры, что позволяет уменьшить размеры конечных элементов без увеличения объёма расчётов и увеличения вероятности сбоя программы ANSYS из-за ограниченной мощности используемого компьютера. При использовании вырезки принимается, что за границами этого объёма нет упругих деформаций. Это достаточно справедливо, если проанализировать распределение упругих деформаций и напряжений в простом режущем клине, который мы использовали для расчёта НДС. Также по картинкам НДС полной СМП предварительно определяется, до каких размеров имеются существенные деформации или напряжения (более  $0,01$  МПа).

Глубина резания  $t$  при проведении экспериментов назначалась равной  $2$  мм, но из-за упругой деформации системы станок - приспособление - инструмент - деталь (СПИД) получалась действительная глубина резания  $t = 1,99$  мм, что при  $\varphi = 45^\circ$  давало ширину среза  $b = t/\sin\varphi = 1,99/\sin 45^\circ = 2,81$  мм. Поэтому при несвободном резании ширина назначалась  $b_d = 2,81$  мм, а ширина вырезки 3Д модели СМП  $b_p = 5$  мм, т.е. больше, чем ширина среза.

Длина контакта стружки принималась соответствующей толщине среза  $a$  (подаче  $s: 0,07, 0,34, 0,52$  мм/об)  $c = 0,46; 1,55$  и  $1,84$  мм.

#### 4.6.2. Исследование НДС вырезок из СМП

Прежде всего, были определены участки контакта стружки по передней поверхности и на сколько они переходят на радиусный участок вершины СМП и на вспомогательную режущую кромку в зависимости от величины продольной подачи  $s$ , величины радиуса при вершине  $r$  и вспомогательного угла в плане  $\varphi_1$  (рис. 4.6.10 – 4.6.15).

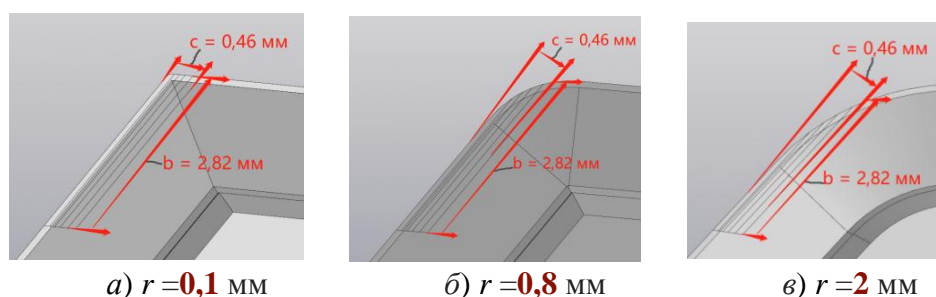


Рис. 4.6.10 – Положение участка контакта стружки с передней поверхностью при главном угле в плане  $\varphi = 45^\circ$ , переднем угле  $\gamma = +7^\circ$ , ширине среза  $b = 2,82$  мм, вспомогательном угле в плане  $\varphi_1 = 10^\circ$ , подаче  $s = 0,07$  мм/об, при которой длина контакт стружки  $c = 0,46$  мм, при различной величине радиуса при

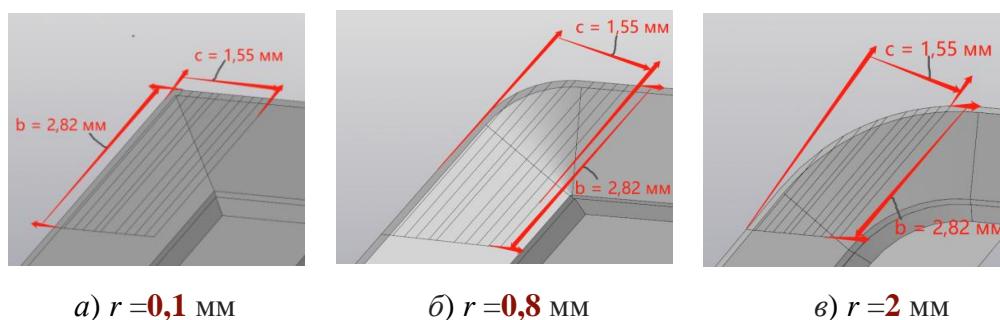
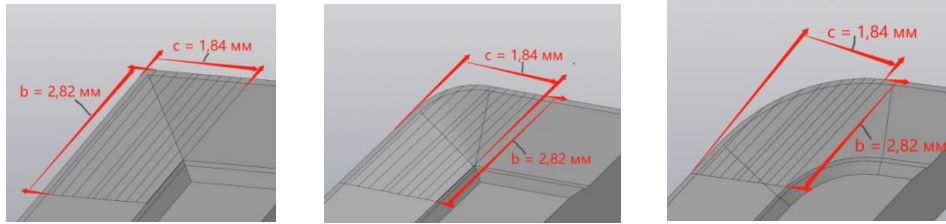


Рис. 4.6.11 – Положение участка контакта стружки с передней поверхностью при  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $b = 2,82$  мм,  $\varphi_1 = 10^\circ$ ,  $s = 0,34$  мм/об,  $c = 1,55$  мм, радиус при вершине  $r$ : а)  $r = 0,1$  мм; б)  $r = 0,8$  мм; в)  $r = 2$  мм.

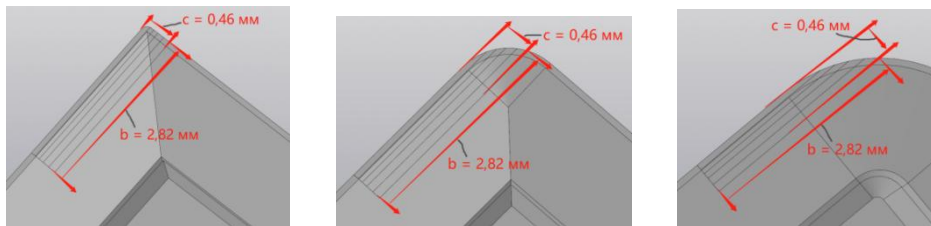


a)  $r = 0,1$  мм

б)  $r = 0,8$  мм

е)  $r = 2$  мм

Рис. 4.6.12 – Положение участка контакта стружки с передней поверхностью при  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $b = 2,82$  мм,  $\varphi_1 = 10^\circ$ ,  $s = 0,52$  мм/об,  $c = 1,84$  мм, радиус при вершине  $r$ : а)  $r = 0,1$  мм; б)  $r = 0,8$  мм; е)  $r = 2$  мм.

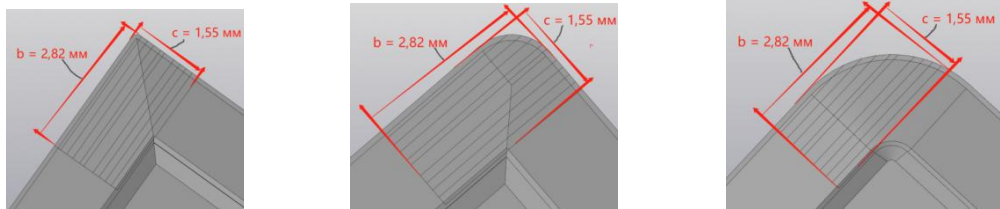


a)  $r = 0,1$  мм

б)  $r = 0,8$  мм

е)  $r = 2$  мм

Рис. 4.6.13 – Положение участка контакта стружки с передней поверхностью при  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $b = 2,82$  мм,  $\varphi_1 = 45^\circ$ ,  $s = 0,07$  мм/об,  $c = 0,46$  мм, радиус при вершине  $r$ : а)  $r = 0,1$  мм; б)  $r = 0,8$  мм; е)  $r = 2$  мм.

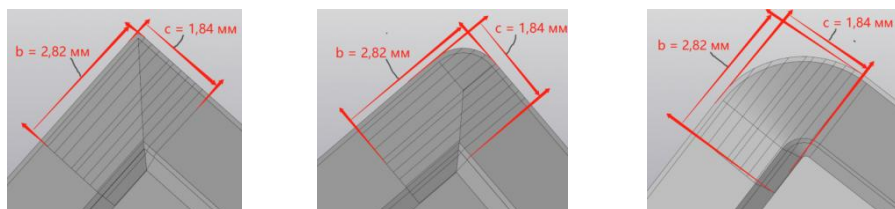


a)  $r = 0,1$  мм

б)  $r = 0,8$  мм

е)  $r = 2$  мм

Рис. 4.6.14 – Положение участка контакта стружки с передней поверхностью при  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $b = 2,82$  мм,  $\varphi_1 = 45^\circ$ ,  $s = 0,34$  мм/об,  $c = 1,55$  мм, радиус при вершине  $r$ : а)  $r = 0,1$  мм; б)  $r = 0,8$  мм; е)  $r = 2$  мм.



a)  $r = 0,1$  мм

б)  $r = 0,8$  мм

е)  $r = 2$  мм

Рис. 4.6.15 – Положение участка контакта стружки с передней поверхностью при  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $b = 2,82$  мм,  $\varphi_1 = 45^\circ$ ,  $s = 0,52$  мм/об,  $c = 1,84$  мм, радиус при вершине  $r$ : а)  $r = 0,1$  мм; б)  $r = 0,8$  мм; е)  $r = 2$  мм.



При радиусе при вершине  $r$  до 0,1 мм для определения длины контакта СМП с заготовкой по вспомогательной режущей кромке  $L_{всп}$  можно вывести формулу (считать без радиуса, т.е.  $r = 0$  мм), но при  $r$  более 0,2 мм будут получаться слишком сложные формулы, поэтому можно её измерить геометрически, исходя из схемы контакта с заготовкой при перемещении вершины резца на длину  $l = s$  (мм) при одном обороте заготовки (Табл. 4.6.4 – 4.6.6).

Таблица 4.6.4 – Схемы для определения длины контакта СМП с заготовкой по вспомогательной режущей кромке при  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $r = 0,1$  мм и при разной величине вспомогательного угла в плане  $\varphi_1$  и подачи  $s$

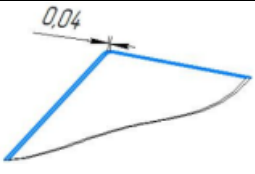
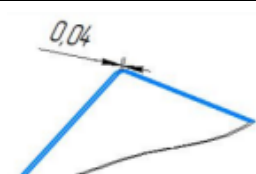
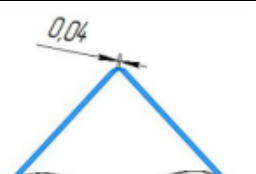
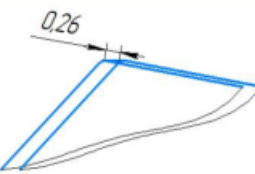
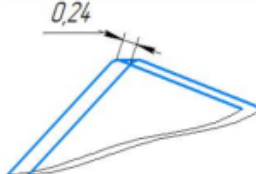
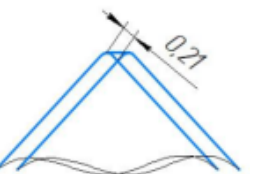
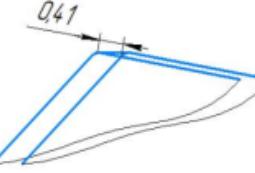
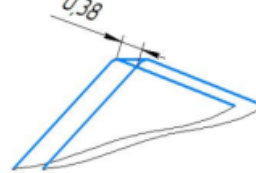
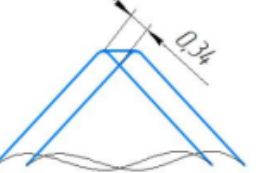
$s$ , мм/об \ $\varphi_1$ (°)	$\varphi_1 = 10$	$\varphi_1 = 20$	$\varphi_1 = 45$
$s = 0,07$			
$s = 0,34$			
$s = 0,52$			

Таблица 4.6.5 – Схемы для определения длины контакта СМП с заготовкой по вспомогательной режущей кромке при  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $r = 0,8$  мм и при разной величине вспомогательного угла в плане  $\varphi_1$  и подачи  $s$

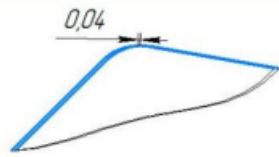
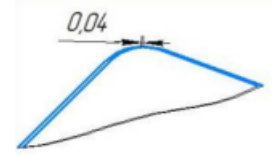
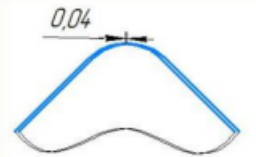
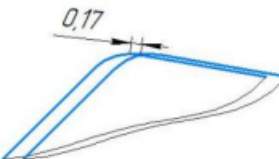
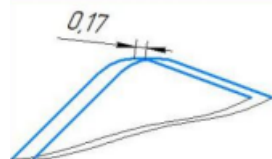
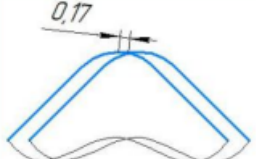
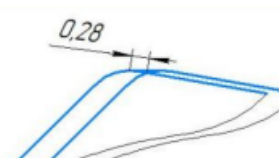
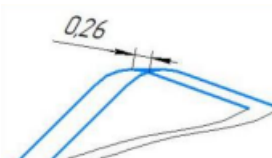

$s$ (мм/об) \ $\varphi_1$ (°)	$\varphi_1 = 10$	$\varphi_1 = 20$	$\varphi_1 = 45$
$s = 0,07$			
$s = 0,34$			
$s = 0,52$			

Таблица 4.6.6 – Схемы для определения длины контакта СМП с заготовкой по вспомогательной режущей кромке при  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $r = 0,8$  мм и при разной величине вспомогательного угла в плане  $\varphi_1$  и подачи  $s$

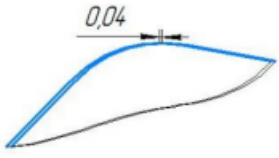
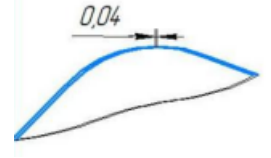

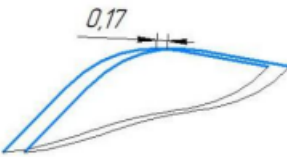
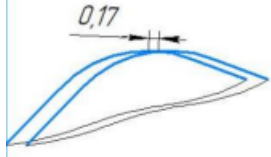
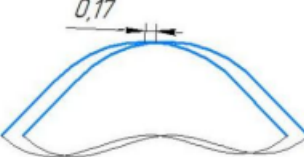
$s$ (мм/об) \ $\varphi_1$ (°)	$\varphi_1 = 10$	$\varphi_1 = 20$	$\varphi_1 = 45$
$s = 0,07$			
$s = 0,34$			

Таблица 4.6.6 – продолжение

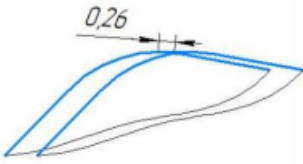
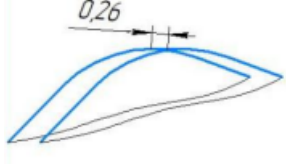
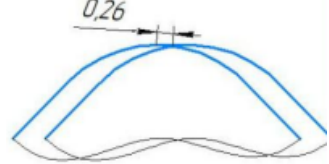
	$\varphi_1 = 10$	$\varphi_1 = 20$	$\varphi_1 = 45$
$s = 0,52$			

Таблица. 4.6.7 – Длина контакта СМП с заготовкой по вспомогательной режущей кромке при  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $r = 0,1$  мм и при разной величине вспомогательного угла в плане  $\varphi_1$  и подачи  $s$

$s$ (мм/об) \ $\varphi_1$ (°)	$\varphi_1 = 10$	$\varphi_1 = 20$	$\varphi_1 = 45$
$s = 0,07$	0,0093	0,0128	0,0243
$s = 0,34$	0,0094	0,0133	0,0288
$s = 0,52$	0,0094	0,0133	0,0288

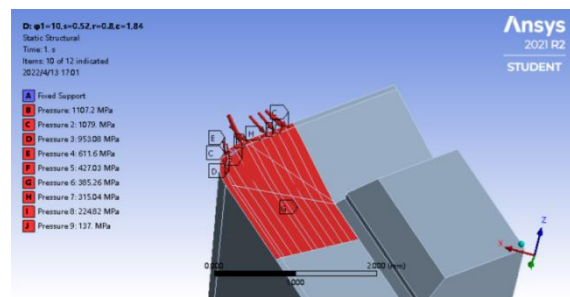
Таблица. 4.6.8 – Длина контакта СМП с заготовкой по вспомогательной режущей кромке при  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $r = 0,8$  мм и при разной величине вспомогательного угла в плане  $\varphi_1$  и подачи  $s$

$s$ (мм/об) \ $\varphi_1$ (°)	$\varphi_1 = 10$	$\varphi_1 = 20$	$\varphi_1 = 45$
$s = 0,07$	0,0181	0,0222	0,0374
$s = 0,34$	0,0678	0,0822	0,13
$s = 0,52$	0,0998	0,1138	0,173

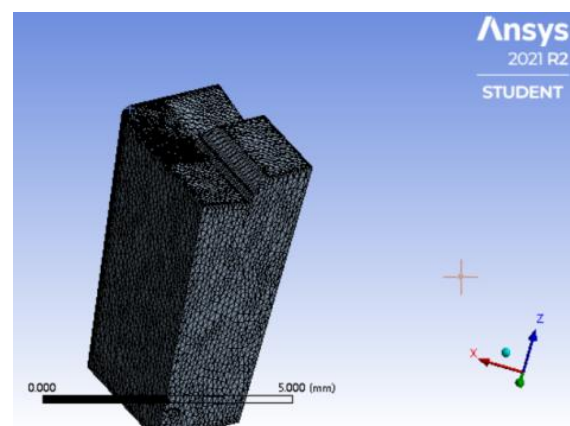
Таблица. 4.6.9 – Длина контакта СМП с заготовкой по вспомогательной режущей кромке при  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $r = 2$  мм и при разной величине вспомогательного угла в плане  $\varphi_1$  и подачи  $s$

$s$ (мм/об) \ $\varphi_1$ (°)	$\varphi_1 = 10$	$\varphi_1 = 20$	$\varphi_1 = 45$
$s = 0,07$	0,0256	0,0322	0,057
$s = 0,34$	0,0749	0,0918	0,1517
$s = 0,52$	0,11	0,135	0,219

Результаты определения длины контакта СМП с заготовкой по вспомогательной режущей кромке были использованы для приложения нагрузки к 3Д модели СМП по вспомогательной режущей кромке и на радиусном участке вершины СМП (рис. 4.6.16) в процентном отношении от нагрузки по главной режущей кромки (от 2 до 10%) в зависимости от величины вспомогательного угла в плане  $\phi_1$ , радиуса при вершине  $r$  и величины подачи  $s$ .



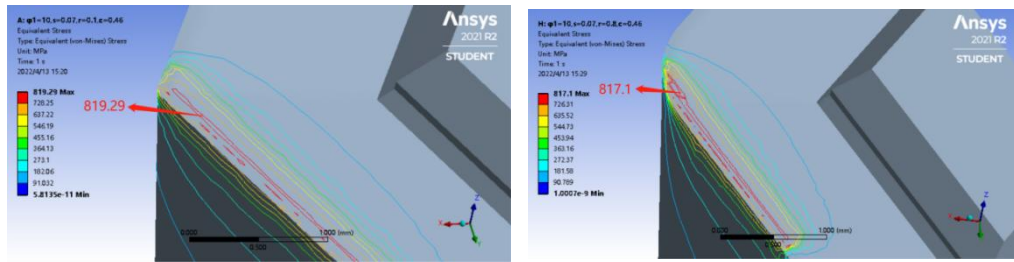
*a*



*б*

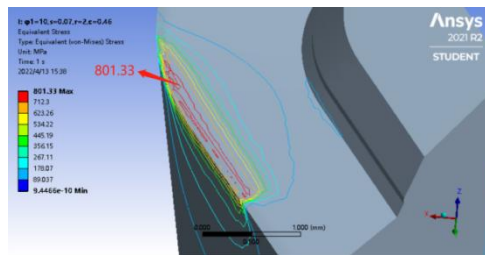
Рис. 4.6.16 – Приложение внешних нагрузок на 3Д модель вырезки из СМП (*a*), сетка конечных элементов и направление осей направления контактных напряжений (*б*)

Некоторые результаты расчёта НДС вырезок из СМП при учёте нагрузки со стороны вспомогательной режущей кромки и радиусной части вершины представлены на рис. 4.6.17 – 4.6.19, остальные приведены в приложении.



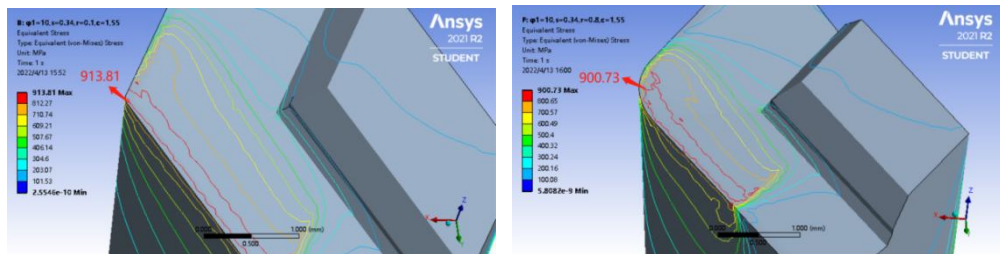
а)  $r = 0,1$  мм;

б)  $r = 0,8$  мм;



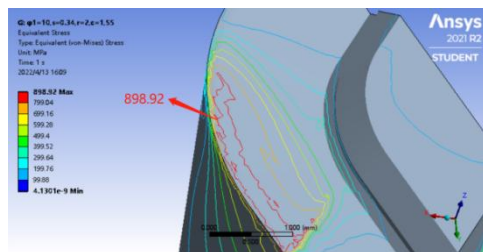
в)  $r = 2$  мм.

Рис. 4.6.17 – Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ max}}$  в вырезке из СМП при  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ ,  $\varphi_1 = 10^\circ$ ,  $b = 2,82$  мм,  $s = 0,07$  мм/об: а) -  $r = 0,1$  мм,  $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 819,29$  МПа; б) -  $r = 0,8$  мм,  $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 817,1$  МПа; в) -  $r = 2$  мм  $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 801,33$  МПа.



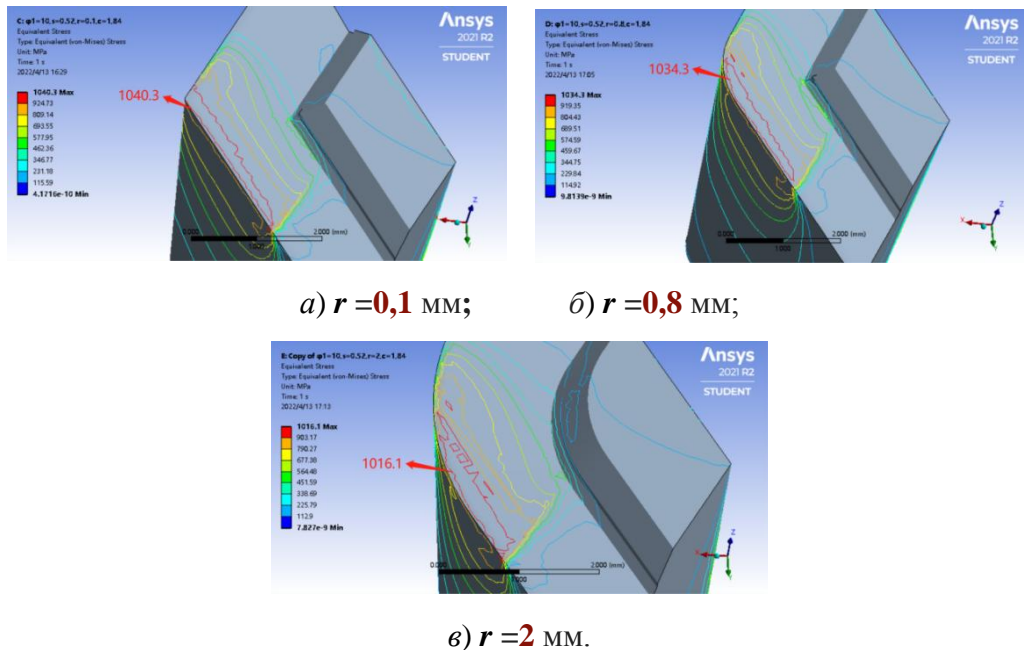
а)  $r = 0,1$  мм;

б)  $r = 0,8$  мм;



в)  $r = 2$  мм.

Рис. 4.6.18 – Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ max}}$  в вырезке из СМП при  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ ,  $\varphi_1 = 10^\circ$ ,  $b = 2,82$  мм,  $s = 0,34$  мм/об: а) -  $r = 0,1$  мм,  $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 913,81$  МПа, б) -  $r = 0,8$  мм,  $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 900,73$  МПа, в) -  $r = 2$  мм  $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 898,92$  МПа.



а)  $r = 0,1$  мм;

б)  $r = 0,8$  мм;

в)  $r = 2$  мм.

Рис. 4.6.19 – Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ max}}$  в вырезке из СМП при  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ ,  $\varphi_1 = 10^\circ$ ,  $b = 2,82$  мм,  $s = 0,52$  мм/об: а) -  $r = 0,1$  мм,  $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1040,3$  МПа, б) -  $r = 0,8$  мм,  $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1034,3$  МПа, в) -  $r = 2$  мм  $\sigma_{\text{ЭКВ max}} = 1016,1$  МПа.

Таблица. 4.6.10 – Величина наибольших эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ max}}$  (МПа) в вырезке из СМП при  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ ,  $r = 0,1$  мм при разной величине вспомогательного угла в плане  $\varphi_1$  и подачи  $s$ .

$s, \text{мм/об}$ \ $\varphi_1^\circ$	$\varphi_1 = 10^\circ$	$\varphi_1 = 20^\circ$	$\varphi_1 = 45^\circ$
$s = 0,07$	819,29	786,03	935,14
$s = 0,34$	913,81	919,29	1181,9
$s = 0,52$	1040,3	1072,7	1376,8

Таблица. 4.6.11 – Величина наибольших эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ max}}$  (МПа) в вырезке из СМП при  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ ,  $r = 0,8$  мм при разной величине вспомогательного угла в плане  $\varphi_1$  и подачи  $s$ .

$s, \text{мм/об}$ \ $\varphi_1^\circ$	$\varphi_1 = 10^\circ$	$\varphi_1 = 20^\circ$	$\varphi_1 = 45^\circ$
$s = 0,07$	817,1	793,41	896,2
$s = 0,34$	900,73	915,66	993,33
$s = 0,52$	1034,3	1045	1131,6

Таблица. 4.6.12 – Величина наибольших эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв max}}$  (МПа) в вырезке из СМП при  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ ,  $r = 2$  мм при разной величине вспомогательного угла в плане  $\varphi_1$  и подачи  $s$ .

$s, \text{мм/об}$ \diagdown $\varphi_1^\circ$	$\varphi_1 = 10^\circ$	$\varphi_1 = 20^\circ$	$\varphi_1 = 45^\circ$
$s = 0,07$	801,33	794,2	817,53
$s = 0,34$	898,92	928,94	931,37
$s = 0,52$	1016,1	1014,7	1092,1

Влияние подачи  $s$ , радиуса при вершине  $r$  и величины вспомогательного угла в плане  $\varphi_1$  на величину **наибольшего эквивалентного напряжения**  $\sigma_{\text{экв max}}$  в вырезке из СМП представлено на графиках рис. 4.6.20 и 4.6.21, которые построены по отдельности для величины вспомогательного угла в плане  $\varphi_1$  (10, 12 и  $45^\circ$ ) и радиуса при вершине  $r$ . (0,1, 0,8 и 2 мм).

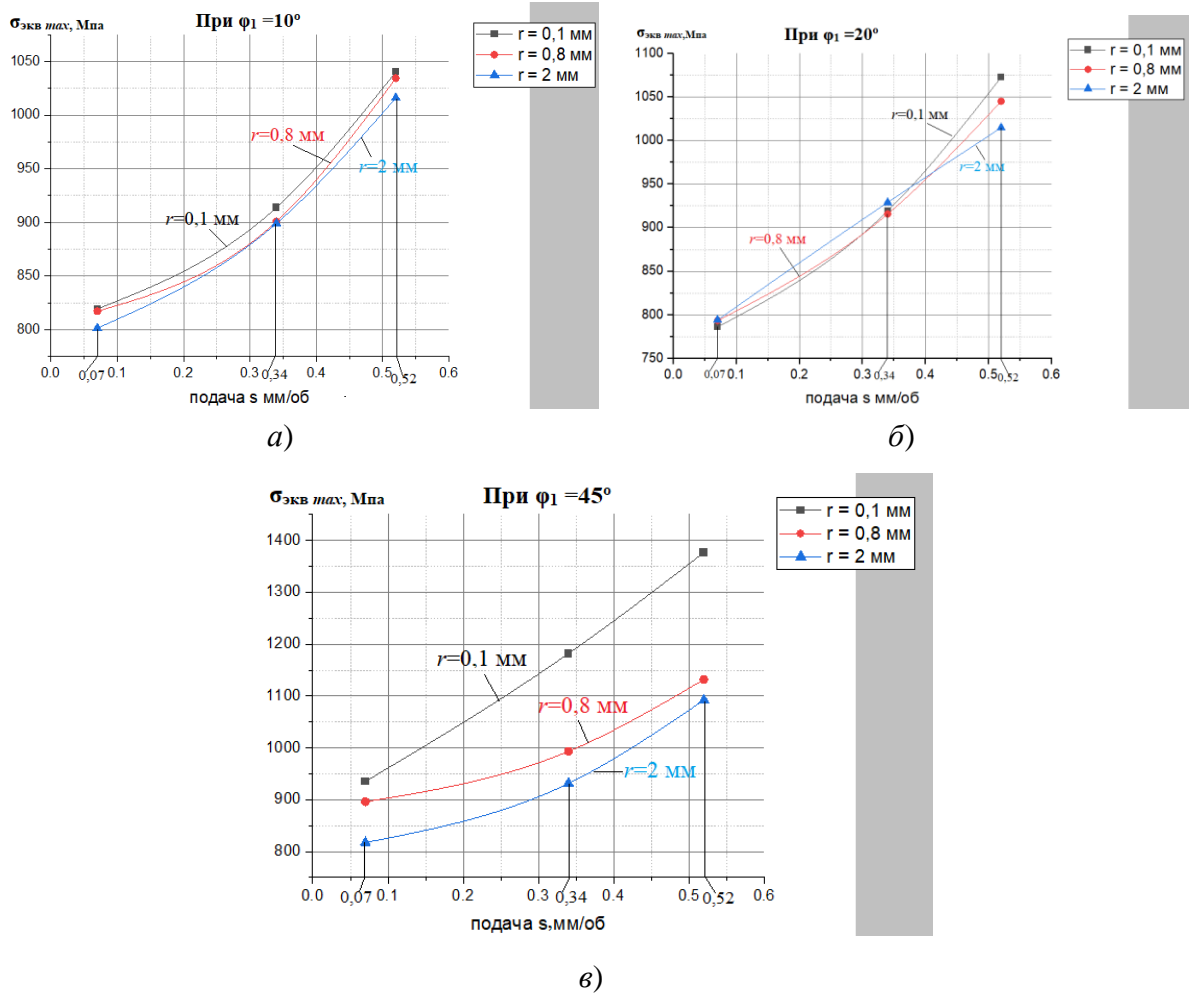
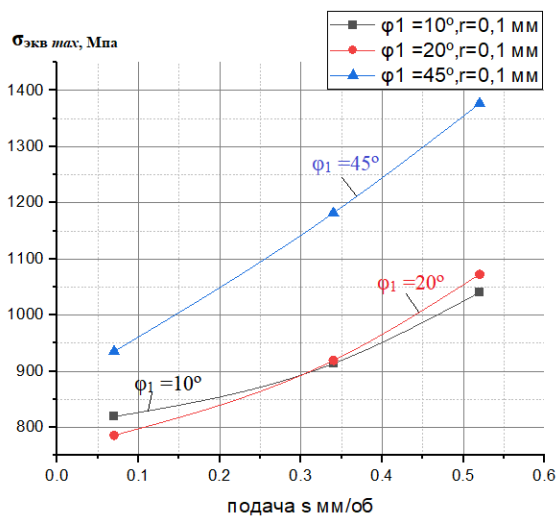


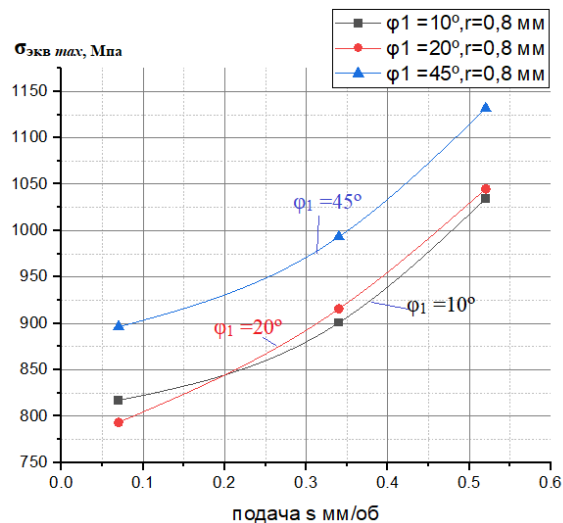
Рис. 4.6.20 – Влияние подачи  $s$ , радиуса при вершине  $r$  на величину наибольшего эквивалентного напряжения  $\sigma_{\text{экв max}}$  (МПа) в вырезке из СМП при величине вспомогательного угла в плане  $\phi_1$ : а)  $\phi_1 = 10^\circ$ ; б)  $\phi_1 = 20^\circ$ ; в)  $\phi_1 = 45^\circ$ . Сталь 40Х – Т15К6,  $v = 120$  м/мин,  $\lambda = 0^\circ$ ,  $\phi = 45^\circ$ ,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ .

С увеличением радиуса при вершине происходит уменьшение напряжений в СМП, для этого и увеличивается радиус при вершине. Это приводит также к уменьшению шероховатости обработанной поверхности при неизменной подаче, но и к увеличению радиальной составляющей  $P_y$ , что вызывает увеличение упругой деформации системы СПИД и уменьшению точности обработки.

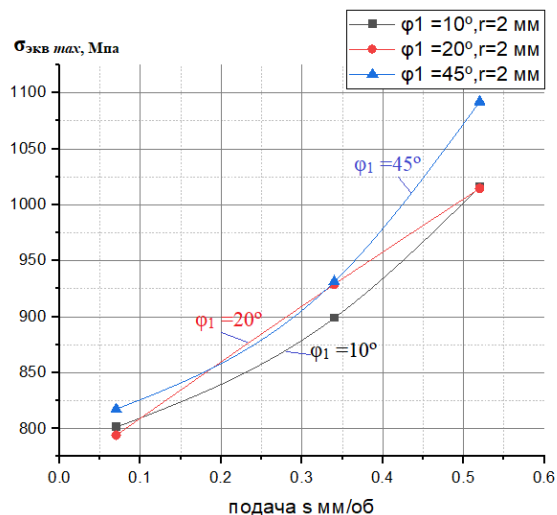




а)  $r = 0,1$  мм;



б)  $r = 0,8$  мм;



в)  $r = 2$  мм.

Рис. 4.6.21 – Влияние подачи  $s$  и величины вспомогательного угла в плане  $\phi_1$  на величину наибольшего эквивалентного напряжения  $\sigma_{\text{экв max}}$  (МПа) в вырезке из СМП при радиусе при вершине  $r$ : а)  $r = 0,1$  мм; б)  $r = 0,8$  мм; в)  $r = 2$  мм Сталь 40Х – Т15К6,  $v = 120$  м/мин,  $\lambda = 0^\circ$ ,  $\phi = 45^\circ$ ,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ .

При малом радиусе при вершине вспомогательный угол в плане  $\phi_1$  оказывает существенное влияние на наибольшее эквивалентное напряжение только при большой величине вспомогательного угла в плане  $\phi_1$  (рис. 4.6.21, а).

При большом радиусе при вершине  $r$  вспомогательный угол в плане  $\phi_1$  практически не оказывает влияние на наибольшее эквивалентное напряжение

(рис. 4.6.21, в). Несмотря на уменьшение угла при вершине  $\epsilon$ , а значит и уменьшение сечения резца, наибольшее эквивалентное напряжение при  $\varphi_1 = 45^\circ$  меньше, чем при малом угле в плане  $\varphi_1 = 10$  и  $20^\circ$ , что говорит о большем влиянии длины контакта режущей кромки СМП с заготовкой по вспомогательной режущей кромке.

С увеличением подачи наибольшее эквивалентное напряжение увеличивается во всех случаях практически прямо пропорционально,

Во всех случаях при  $\varphi_1 = 10^\circ$  и  $\varphi_1 = 20^\circ$  наибольшее эквивалентное напряжение одинаково, но уменьшение  $\varphi_1$  приводит к уменьшению шероховатости обработанной поверхности при неизменной подаче.

Сравнение НДС СМП при их нагрузке по вспомогательной режущей кромке в процентном отношении об общей силы резания **без учёта действительного контакта** (рис. 4.6.7) с НДС СМП, определённого при нагрузке по вспомогательной режущей кромке с **учёта действительного контакта** по ней (рис. 4.6.20, в), показало, что при одной и той же величине продольной подачи  $s = 0,52$  мм/об и радиуса при вершине  $r = 0,8$  мм в квадратных СМП с  $\varphi = 45^\circ$  больше подходит нагрузка на вспомогательной режущей кромке при 10% от общей нагрузки. В этом случае разницы практически нет (1146 и 1125 МПа соответственно), поэтому при расчёте НДС СМП можно принимать нагрузку на вспомогательной режущей кромке 10% от общей нагрузки без трудоёмких расчётов действительного участка контакта.

## Заключение

1. Построение эпюр контактных напряжений передней поверхности основано на определении физических составляющих  $N$  и  $F$  силы резания, длины контакта стружки с инструментом  $c$ , а также стабильности свойств эпюры касательных контактных напряжений.

2. После построения эпюр необходимо проверка равенства физических составляющих силы резания, рассчитанных по эпюрам, физическим составляющим силы резания, измеренным в процессе резания.

3. Чем больше толщина среза  $a$ , тем больше величина наибольшего нормального контактного напряжения  $\sigma_{max}$ .

4. Когда толщина среза  $a$  становится больше 0,25 мм, изменение  $\sigma_{пересеч}$ ,  $\sigma_{const}$ ,  $\tau_{max}$ ,  $\sigma_{L2}$  очень мало. Чем больше толщины среза  $a$ , тем больше  $L_2$  и  $L_{пересеч}$ .

5. При обработке стали контактные напряжения на искусственной фаске износа увеличиваются при отдалении от режущей кромки, что связано с влиянием упругого восстановления поверхности резания. Чем меньше толщина среза, тем интенсивнее увеличиваются контактные напряжения на искусственной фаске износа вблизи режущей кромки, что связано с меньшей длиной волны упругого восстановления поверхности резания.

6. Увеличение количества участков, на которые разбивается участок контакта стружки с передней поверхностью, не влияет на результаты расчёта НДС.

7. Поворот режущего клина на угол  $\gamma$ , чтобы передняя поверхность заняла горизонтальное положение, облегчает подготовку данных по внешней нагрузке и не уменьшает точность расчёта НДС. Однако это преимущество проявляется только при расчёте неизношенного резца. Наличие фаски на задней поверхности вызывает необходимость пересчитывать контактные напряжения уже на фаске, т.к. после поворота режущего клина на величину переднего угла она занимает не вертикальное положение.

8. Увеличение переднего угла более  $20^\circ$  вызывает интенсивное увеличение величины наибольшего эквивалентного напряжения у неизношенного инструмента, особенно при малой толщине среза, поэтому применение больших передних углов при обработке стали грозит поломкой режущего инструмента.

9. Увеличение длины фаски износа по задней поверхности до 0,8 мм не влияет на прочность режущего инструмента при переднем угле  $7^\circ$ , что связано с наличием прогиба поверхности резания. Однако увеличение длины фаски износа по задней поверхности более 1 мм вызывает интенсивное увеличение величины наибольшего эквивалентного напряжения, что грозит поломкой инструмента.

10. Исследования показали, что в 3-гранных СМП с увеличением доли нагрузки на вспомогательной режущей кромке величина наибольшего эквивалентного напряжения в 3-гранных СМП увеличивается по сравнению с вариантом, когда вся нагрузка приходится только на главную режущую кромку.

При увеличении переднего угла величина наибольшего эквивалентного напряжения в 3-гранных СМП уменьшается во всех случаях.

11. Увеличение радиуса при вершине приводит к уменьшению напряжений в СМП,

12. При малом радиусе при вершине вспомогательный угол в плане  $\varphi_1$  оказывает существенное влияние на наибольшее эквивалентное напряжение только при большой величине вспомогательного угла в плане  $\varphi_1$ .

13. При большом радиусе при вершине  $r$  вспомогательный угол в плане  $\varphi_1$  практически не оказывает влияние на наибольшее эквивалентное напряжение. Несмотря на уменьшение угла при вершине  $\varepsilon$ , а значит и уменьшение сечения резца, наибольшее эквивалентное напряжение при  $\varphi_1 = 45^\circ$  меньше, чем при малом угле в плане  $\varphi_1 = 10$  и  $20^\circ$ , что говорит о бóльшем влиянии длины контакта режущей кромки СМП с заготовкой по вспомогательной режущей кромке.

14. В трёхгранных СМП наибольшее эквивалентное напряжение в 1,8 раз больше, чем в квадратных СМП при одной и той же продольной подаче и глубине резания, что связано с меньшим углом при вершине  $\varepsilon$ . В трёхгранных СМП влияние нагрузки со стороны вспомогательной режущей кромки более существенное, чем у квадратных.

15. При расчёте НДС квадратных СМП можно принимать нагрузку на вспомогательной режущей кромке 90% от общей нагрузки без трудоёмких расчётов действительного участка контакта.

## Список литературы

1. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента/Полетика М.Ф. – Москва: Машиностроение, 1969. – 148 с.
2. Развитие науки о резании металлов /В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев и др. – Москва: Машиностроение, 1967. – 416 с.
3. Методика измерения контактных напряжений на поверхностях реза [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. Чжан Ц., Козлов В.Н. Влияние вида нагружения на расчёт внутренних напряжений в режущем клине // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 8: в 2 ч. Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. С. 352-356.
8. Козлов В.Н., Таха М.Х.М., Сабават С.К. Влияние вида стружки на распределение контактных напряжений на фаске задней поверхности режущего инструмента // VI Всероссийский фестиваль науки. XX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и образование» (г. Томск, 18–22 апреля 2016 г.): В 5 т. Т. V. Ч. 1: Профессиональное образование в области технологии, дизайна, безопасности

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

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

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

11. Кожевников Д. В., Гречишников В. Л., Кирсанов С. В., Кокарев В. И., Схиртладзе А. Г. Режущий инструмент: Учебник для вузов / Под редакцией С. В. Кирсанова. - 2-е изд. доп. М.: Машиностроение, 2005. - 528 с: ил.

12. 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].

13. 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: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/51571>

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

## 5. Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

Студенту:

Группа	ФИО
4АМ01	Хэ Лин

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

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

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

#### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

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

#### Перечень графического материала

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 ШБИП	Гасанов Магеррам Али оглы	д.э.н.		14.03.2022

#### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ01	Хэ Лин		14.03.2022



## **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 стали, определить оптимальные размеры и геометрию режущих пластин.

## 5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

### 5.1.1 Анализ конкурентных технических решений

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

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

Таблица 5.1 – Сравнение конкурентных технических решений исследовательских работ

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

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

$$K = \sum B_i \cdot B_i = 0,1 \cdot 3 = 0,3 \quad (5,1)$$

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

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

### 5.1.2 SWOT-анализ

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

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

Таблица 5.2 – Матрица SWOT-анализа

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

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

На втором этапе на основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надёжность его реализации. Соотношения параметров представлены в таблицах 5.3–5.6.

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

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

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

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

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

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

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

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

Результаты анализа представлены в итоговой таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Итоговая таблица SWOT-анализа.

<p><b>Возможности</b></p>	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта</b></p> <p>С1. Низкая цена исходного сырья. С2. Более точные экспериментальные результаты. С3. Более свежая информация, которая была использована для разработки проекта. С4. Перспективный способ для обработки данных. С5. Квалифицированный персонал.</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта</b></p> <p>Сл1. Отсутствие разных СМП для проведения испытания. Сл2. Долгое время подготовки к моделированию при проведении научного исследования. Сл3. Высокие требования к экспериментальному оборудованию. Сл4. Эксперименты имеют большие погрешности и неопределенности. Сл5. Высокие требования к постановке внутренних настройки в программу ANSYS..</p>
<p><b>Возможности</b></p> <p>В1. Использование оборудования ИНШПТ ТПУ В2. Появление потенциального спроса на новые геометрии СМП. В3. Повышение точности . В4. Уменьшение стоимости конкурентных разработок. В5. Привлечение других информационных технологий для решения вопросов машиностроения.</p>	<p><b>Направления развития</b></p> <p>В1С2. Более точные экспериментальные результаты с использующим новым оборудованием. В2В3С3С4. Свежая информация и перспективный способ изучения соответствуют потенциальному спросу в дальнейшие технологии машиностроения и внедрению технологии в аэрокосмической области. В5С3С4. Более свежая информация и перспективный способ изучения в данной сфере соответствуют привлечение других информационных технологий для решения вопросов машиностроения.</p>	<p><b>Сдерживающие факторы</b></p> <p>В1Сл3Сл4. Эксперименты имеют большие погрешности и неопределенности с использованием оборудования ИНШПТ ТПУ.</p>

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

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

## 5.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса научно-исследовательских работ осуществляется в порядке:

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

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

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

Таблица 5.8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей.

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка темы диссертации	1	Составление и утверждение тем диссертации, утверждение плана-графика.	Научный руководитель
	2	Календарное планирование выполнения диссертации.	Инженер, научный руководитель
Теоретические исследования	3	Изучение литературы по токарной обработке	Инженер
	4	Метод разрезного резца	Инженер
Экспериментальные исследования	5	Создать 3D модели СМП, измерить длину контакта стружки, построить эпюры контактных напряжений и рассчитать их параметры.	Инженер
	6	Исследование НДС СМП с помощью программы ANSYS	Инженер, научный руководитель



	7	Проведение компьютерного эксперимента.	Инженер
Обобщение и оценка результатов	8	Обработка полученных данных.	Инженер
	9	Оценка правильности полученных результатов.	Инженер, научный руководитель
Оформление отчета по НИР	10	Составление пояснительной записки.	Инженер

### 5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

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

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

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

Где:

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

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

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

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

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

Где:

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

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

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

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

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

Где:

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

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

$k$  – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

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

Где:

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

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

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

Расчеты временных показателей проведения научного исследования представляются в таблице 5.9:

Таблица 5.9 – Временные показатели проведения научного исследования.

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{Pi}$	Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$
	$t_{\text{mini}}$ , чел-дни		$t_{\text{maxi}}$ , чел-дни		$t_{\text{ожi}}$ , чел-дни			
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2		
<i>l</i>	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Составление и утверждение темы диссертации, утверждение плана-графика.	1	-	2	-	1,4	-	1,4	2
2. Календарное планирование выполнения диссертации.	1	2	2	3	1,4	2,4	2,4	3
3. Изучение литературы по токарной обработке.	-	40	-	50	-	44	44	65
4. Изучение метода разрезного резца.	-	50	-	60	-	54	54	80
5. Создание 3D моделей СМП, измерение длины контакта стружки, расчёт эпюр контактных напряжений на передней поверхности и их параметров	-	10	-	15	-	12	12	18
6. Исследование НДС СМП с помощью программы ANSYS	30	50	40	60	34	54	54	63

7. Проведение компьютерного моделирования	-	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
<b>Итого:</b>	37	193	50	258	42,2	219	220.4	305

**Примечание:**

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

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

Таблица 5.10 – Диаграмма Ганта.

№	Виды работ	Исп	$T_{ki}$ , кал. дн.	Продолжительность работ													
				январь - март			апрель - июнь			Июль - сентябрь			Октябрь - декабрь			январь	
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	
1	Составление и утверждение темы диссертации, утверждение плана-графика.	Исп1	2	█													
2	Календарное планирование выполнения диссертации.	Исп1 Исп2	3	█ █	█	█											
3	Изучение литературы по токарной обработке.	Исп2	65														
4	Метод разрезного резца.	Исп2	80				█	█	█								
5	Создать 3D моделей СМП, измерить длину контакта стружки, рассчитать эпюры контактных напряжений и их параметры на передней поверхности	Исп2	18							█							



### 5.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования.

При выполнении работы большая часть времени проводилась в 16А корпусе ТПУ. В лаборатории № 101 проводилось исследование прочности сменных многогранных пластин методом конечных элементов при обработке стали (Сталь 40Х-Т15К6).

В результате экспериментов было установлено влияние толщины среза  $a$  на силы резания и изменение составляющих силы резания с учётом выбранного переднего угла. Используемое оборудование и материалы имеют следующие виды: 1) Оборудование – ноутбук; 2) динамометр фирмы Kistler с интерфейсом для подключения к персональному компьютеру; 3) Микроскоп БМИ-1; 4) Прутки из стали марки 40Х; 5) Державка токарная с набором твёрдосплавных сменных многогранных пластин с разными передними углами; 6) Резец с напайной режущей пластиной (материал Т15К6); 7) Комплект канцелярских принадлежностей для записи данных; 8) Картридж для лазерного принтера для печати на бумаге формата А4; 9) Офисная бумага А4 для записи данных.

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

Таблица 5.11 – Материальные затраты.

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во, ед.	Сумма, руб.
Комплекс канцелярских принадлежностей для записи данных	431	5	2155
Картридж для лазерного принтера для печати на бумаге формата А4	4008	1	4008
Офисные бумаги А4 для записи данных	584	1	584
<b>Компьютерное программное обеспечение</b> для анализа данных, программа Ansys, Компас, Origin и т.д. (университет обеспечивает для магистратуры <b>бесплатно</b> )	0	2	0
Микроскоп БМИ-1 для измерения износа инструмента (университет обеспечивает для магистратуры <b>бесплатно</b> )	0	1	0
<b>Динамометр Kistler</b> для определения силы резания	22000	1	22000
Инструмент с напайными режущими пластинами (материал Т15К6)	1290	2	2580
<b>Сменные многогранные пластины</b> с разными передними углами (материал Т15К6)	837	5	4185
Державка токарная с механическим креплением твёрдосплавных СМП (сменных многогранных пластин)	1833	2	3666
<b>Деталь:</b> пруток из стали 40Х (круг, сталь 40Х) длиной 1,2 м, разрезается на несколько мерных заготовок по 400 мм длиной, обрабатываемый материал	43000	1	43000
Итого:			82178

### 5.3.2 Расчет амортизации специального оборудования

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

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации: рассчитывается по формуле:

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

Где:  $n$  – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

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

Где:

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

Таблица 5.12 – Затраты на оборудование

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

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



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

Общая сумма амортизационных отчислений (по формуле 5.7):

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

### 5.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

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

Основная заработная плата одного работника рассчитывается по следующей формуле:

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

Где:

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

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дней. (по таблице 5.9 для инженера:  $T_{p2} = 219$  дней, для руководителя:  $T_{p1} = 42,2$  дней).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле 5.9:

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

Где:

$Z_M$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

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

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

Должностной оклад работника за месяц определяется по формуле 5.10:

$$Z_M = Z_{mc} \times (1 + k_{пр} + k_d) \times k_p \quad (5,10)$$

Где:

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

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент, равен 0,3;

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2;

$k_p$  – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томск);

По формуле 5.10 определяется должностной оклад руководителя за месяц:

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

По формуле 5,10 определяется должностной оклад инженера за месяц:

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

Среднедневная заработная плата у руководителя рассчитывается по формуле 5.9:

$$Z_{дн1} = \frac{Z_M \times M}{F_d} = \frac{55770 \times 8,1}{247} = 1828,89 \text{ руб}$$

Среднедневная заработная плата у инженера рассчитывается по формуле 5.9:

$$Z_{дн2} = \frac{Z_M \times M}{F_d} = \frac{21996 \times 8,1}{247} = 721,33 \text{ руб}$$

Основная заработная плата руководителя рассчитывается по формуле 5,8:

$$Z_{\text{осн1}} = Z_{\text{дн1}} \times T_{p1} = 1828,89 \times 42,2 = 77179,2 \text{ руб}$$

Основная заработная плата инженера рассчитывается по формуле 5,8:

$$Z_{\text{осн2}} = Z_{\text{дн2}} \times T_{p2} = 721,33 \times 219 = 157971,3 \text{ руб}$$

Таким образом, затраты на общую основную заработную плату составляют:

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

Перечисленные информации представляются в таблице 5,14:

Таблица 5.14 – Расчеты основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{mc}$ , руб	$k_{пр}$	$k_{д}$	$k_{р}$	$Z_{м}$ , руб	$Z_{дн}$ , руб	$T_{р}$ , дн	$Z_{осн}$ , руб
Руководитель	28600	0,3	0,2	1,3	55770	1828,89	42,2	77179,2
Инженер	11280	0,3	0,2	1,3	21996	721,33	219	157971,3
Итого:								235150,5

### 5.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Дополнительная заработная плата определяется по формуле 5.11:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \times Z_{\text{осн}} \quad (5,11)$$

Где:

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

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

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

По формуле 5.11 определяется дополнительная заработная плата для руководителя:

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

По формуле 5.11 определяется дополнительная заработная плата для инженера:

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

Таким образом, общая дополнительная заработная плата составляет:

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

### 5.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды

Отчисления во внебюджетные фонды определяются по формуле 5.12:

$$З_{\text{внеб1}} = k_{\text{внеб}} \times (З_{\text{осн1}} + З_{\text{доп1}}) \quad (5,12)$$

Где:

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

Отчисления во внебюджетные фонды для руководителя определяются по формуле 5.12:

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

Отчисления во внебюджетные фонды для инженера определяются по формуле 5.12:

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

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

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

### 5.3.6 Накладные расходы

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

Величина накладных расходов определяется по формуле 5.13:

$$З_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) k_{нр} \quad (5,13)$$

Где:

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

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

### 5.3.7 Бюджетная стоимость НИР

Группировка затрат по статьям представляется в таблице 5.15:

Таблица 5.15 – Группировка затрат по статьям.

Статьи						
1	2	3	4	5	6	7
Материалы, руб	Амортизация, руб	Основная заработная плата, руб	Дополнительная заработная плата, руб	Отчисления на социальные нужды, руб	Накладные расходы, руб	Стоимость бюджета, руб
82178	21250	235150,5	35272,6	81126,9	72796,48	527774,48

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется бюджет НИ «Исследование прочности сменных многогранных пластин методом конечных элементов при обработке стали» по форме, приведенной в таблице 5.16. В таблице также представлено определение бюджета затрат двух конкурирующих научно-исследовательских проектов.

Таблица 5.16 – Группировка затрат по статьям.

№	Наименование статьи	Сумма, руб.		
		Текущий Проект	Исп.2	Исп.3
1	Материальные затраты НИР	82178	84869,45	80231
2	Затраты на специальное оборудование	21250	3075	26712
3	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	235150,5	971582,82	296770,26
4	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	35272,6	145737,42	44515,54
5	Отчисления во внебюджетные фонды	81126,9	291474,84	92031,08
6	Накладные расходы	72796,48	85674,86	74052,62
Бюджет затрат НИР		527774,48	1582414,39	614312,50

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

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

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

### **5.4.1 Интегральный показатель финансовой эффективности**

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

В качестве аналогов данной НИР рассмотрены:

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

Интегральный финансовый показатель разработки рассчитывается по формуле 5.14:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (5,14)$$

Где:

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

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения из всех вариантов;

По перечисленным вычислениям определяются общие затраты для всех вариантов:

$$\Phi_{\text{текущ.проект}} = 527774,48$$

$$\Phi_{\text{исп.1}} = 1582414$$

$$\Phi_{\text{исп.2}} = 614312,5$$

$$\Phi_{\text{max}} = \Phi_{\text{исп.1}} = 1582414$$

По формуле 5,14 определяется интегральный финансовый показатель для текущего проекта:

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

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

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

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



## 5.4.2 Интегральные показатели ресурсоэффективности

Интегральные показатели ресурсоэффективности всех вариантов определяются путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 5.17).

Таблица 5.17 – Сравнительная оценка характеристик всех вариантов.

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

По данным из таблицы 5.17 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 5.17 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 5.17 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.

### 5.4.3 Интегральные показатели эффективности всех вариантов

Интегральные показатели эффективности всех вариантов вычисляются на основании показателей ресурсоэффективности и интегральных финансовых показателей по формуле 5.15:

$$I_{\text{эф.}i} = \frac{I_p^{\text{исп.}i}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}} \quad (5,15)$$

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

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

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

По формуле 5.15 определяется интегральный показатель эффективности для текущего проекта:

$$I_{\text{эф.текущ.проект}} = \frac{I_p^{\text{текущ.проект}}}{I_{\text{финр}}^{\text{текущ.проект}}} = \frac{4,85}{0,33} = 14,7$$

По формуле 5.15 определяется интегральный показатель эффективности для первого конкурентного проекта:

$$I_{\text{эф.исп.1}} = \frac{I_p^{\text{исп.1}}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.1}}} = \frac{4,45}{1} = 4,45$$

По формуле 5.15 определяется интегральный показатель эффективности для второго конкурентного проекта:

$$I_{\text{эф.исп.2}} = \frac{I_{\text{р}}^{\text{исп.2}}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}}} = \frac{4,05}{0,39} = 10,38$$

Далее среднее значение интегрального показателя эффективности каждого варианта НИР сравнивалось с средним значением интегрального показателя эффективности текущего проекта с целью определения сравнительной эффективности проектов (таблица 5.18).

Таблица 5.18 – Сравнительные эффективности разработок.

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

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее финансовым и ресурсным эффективным вариантом является текущий проект. Наш проект является более эффективным по сравнению с конкурентами.

### Выводы по разделу

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

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

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

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

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

2) Значение интегрального показателя ресурсной эффективности текущего проекта составляет 4,85 по сравнению с 4,45 (первого конкурента) и 4,05 (второго конкурента);

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

**6. Раздел «Социальная ответственность»**  
**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа		ФИО	
4AM01		Хэ Лин	
Школа	Инженерная школа новых производственных технологий	Отделение (НОЦ)	Материаловедение
Уровень образования	магистратура	Направление/ специальность	15.04.01 Машиностроение

Тема ВКР:

<b>Исследование прочности сменных многогранных пластин методом конечных элементов при обработке стали</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p><b>Введение</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения.</li> <li>– Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации</li> </ul>	<p><i>Объект исследования:</i> исследование прочности сменных многогранных пластин методом конечных элементов при обработке стали.</p> <p><i>Область применения:</i> машиностроение, заводская обработка.</p> <p><i>Рабочая зона:</i> лаборатория № 101 в 16А корпусе ТПУ.</p> <p><i>Размеры помещения:</i> 8*7 м.</p> <p><i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> компьютер, станок универсальный токарно-винторезный модели 1К62, динамометр.</p> <p><i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> установите динамометр, проведение экспериментов по обработке и сбор данных, отстройте компьютерное программное обеспечение для анализа данных.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018)</li> <li>2. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.</li> <li>3. ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.</li> <li>4. Федеральный закон от 28 декабря 2013 г. N 426-ФЗ "О специальной оценке условий труда.</li> </ol>
<p><b>2. Производственная безопасность при эксплуатации:</b></p>	<p><b>Возможные вредные и опасные факторы:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Отклонение показателей микроклимата;</li> </ol>

<ul style="list-style-type: none"> <li>– Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов</li> <li>– Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора</li> </ul>	<p>2. Превышение уровня шума;</p> <p>3. Недостаточная освещенность рабочей зоны;</p> <p>4.Повышенная температура поверхностей и оборудования</p> <p>5. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека;</p> <p>6. Движущиеся машины и механизмы, передвигающиеся заготовки и материалы;</p> <p><b>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов:</b> использование защитных костюмов, виброизолирующие рукавицы, перчатки, виброизолирующая обувь, беруши, наушники, защитные ограждения.</p> <p><b>Расчет:</b> расчет системы искусственного освещения.</p>
<p><b>3. Экологическая безопасность <u>при эксплуатации</u></b></p>	<p><b>Защита селитебной зоны</b> (при обработки инструмента будет некоторый шум и металлический порошок).</p> <p><b>Анализ воздействия объекта на атмосферу</b> (при работе станков воздух загрязняется испарениями от смазочно-охлаждающих жидкостей).</p> <p><b>Анализ воздействия объекта на гидросферу</b> (сточные воды предприятий содержат нефтепродукты).</p> <p><b>Анализ воздействия объекта на литосферу</b> (при эксперименте точения стали образуют много железной стружки).</p>
<p><b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях <u>при эксплуатации</u></b></p>	<p><b>Возможные ЧС:</b> Природные катастрофы ( сильные морозы зимой.); Техногенные воздействия (шпионаж, диверсия);</p> <p><b>Наиболее типичная ЧС:</b> 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
Отделение общетехнических дисциплин ШБИП,доцент	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н.		14.03.2022

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ01	Хэ Лин		14.03.2022

## Введение

При выполнении работы большая часть времени проводилась в 16А корпусе ТПУ. В лаборатории № 101 проводилось исследование прочности сменных многогранных пластин методом конечных элементов при обработке стали (Сталь 40Х-Т15К6).

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

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

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

## 6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

На рисунке 6.1.1 показано спроектированное рабочее место.

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

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

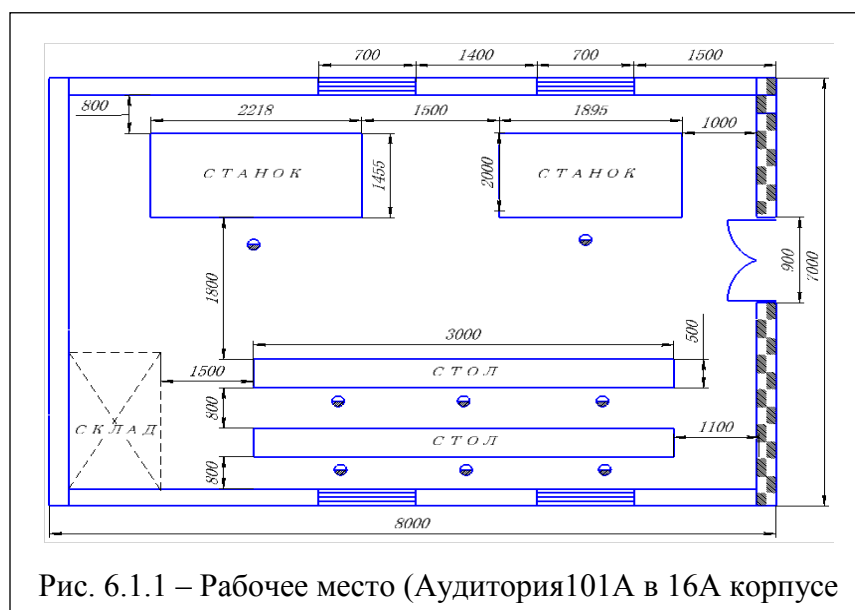


Рис. 6.1.1 – Рабочее место (Аудитория 101А в 16А корпусе)



## **Правовые нормы трудового законодательства**

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

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

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

**Оплата и нормирование труда** – основные понятия и определения:

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

2) Тарифная ставка - фиксированный размер оплаты труда работника за выполнение нормы труда определенной сложности (квалификации) за единицу

времени без учета компенсационных, стимулирующих и социальных выплат.

### **Эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны**

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

Общие положения состоит из следующих элементов:

1) Рабочее место организуют при физической работе средней тяжести и тяжелой, а также при технологически обусловленной величине рабочей зоны, превышающей ее параметры при работе сидя. Категория работ - по ГОСТ 12.1.005-88, мои категория работа это средней тяжести. 2) Конструкция, взаимное расположение элементов рабочего места (органы управления, средства отображения информации и т.д.) должны соответствовать антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям, а также характеру работы.

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

## 6.2. Производственная безопасность

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

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

<b>Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)</b>	<b>Нормативные документы</b>
1.Отклонение показателей микроклимата	ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
2.Превышение уровня шума	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности, ГОСТ 30691 (ИСО 4871:1996) Шум машин. Заявление и контроль значений шумовых характеристик)
3.Недостаточная освещенность рабочей зоны	Искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*;
4. повышенная температура поверхностей и оборудования	СП 60.13330.2020 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха СНиП 41-01-2003 (с Поправкой);
5.Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, для машины и механизмы
6.Движущиеся машины и механизмы, передвигающиеся заготовки и материалы;	ГОСТ 12.3.009-76 ССБТ. Работы погрузочно-разгрузочные. Общие требования безопасности.

## 6.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

### Отклонение показателей микроклимата.

Микроклимат в производственных условиях определяется следующими параметрами:

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

Повышенная влажность воздуха ( $\phi > 75\%$ ) затрудняет терморегуляцию организма, т.к. происходит снижения испарения пота, а пониженная влажность ( $\phi < 20\%$ ) вызывает пересыхание слизистых оболочек дыхательных путей. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. Допустимые значения микроклимата для этого случая даны в таблице 6.2.2.

Таблица 6.2.2 – Допустимые значения микроклимата.

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

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

**Превышение уровня шума:** Внезапные шумы высокой интенсивности, даже кратковременные (взрывы, удары и т.п.), могут вызвать как острые

нейросенсорные эффекты (головокружение, звон в ушах, снижение слуха), так и физические повреждения (разрыв барабанной перепонки с кровотечением, поражения среднего уха и улитки).

Допустимый уровень шума ограничен ГОСТ 12.1.003-83 и СанПиН 2.2.4/2.1.8.10-32-2002. Максимальный уровень звука постоянного шума на рабочих местах не превышает 80 дБА. Максимальный уровень звука постоянного шума на нашем рабочем месте до 75 дБА, основной шум исходит от производства и обработки токарного станка. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности,(ГОСТ 30691 (ИСО 4871:1996) Шум машин. Заявление и контроль значений шумовых характеристик)

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

#### **Недостаточная освещенность рабочей зоны:**

Помещения имеют как естественное, так и искусственное освещение. Вследствие того, что работа оператора по обслуживанию пульта управления радиостанцией соответствует разряду зрительной работы III б, следует соблюдать следующие требования, предъявляемые рабочему месту, мое рабочее место:  $E=300$  лк, искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*; Естественное освещение осуществляется через

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

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

### **Повышенная температура поверхностей и оборудования:**

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

Настоящий свод правил распространяется на проектирование систем внутреннего тепло- и холодоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха в строящихся, реконструируемых или капитально ремонтируемых зданиях, общественных, высотой не более 50 м и жилых зданиях, высотой не более 75 м, включая многофункциональные здания и здания одного функционального назначения, наша небольшая заводской находится в этом диапазоне.

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

Эксплуатируемая (рабочая) зона: Пространство определенного объема в помещении, в котором предусмотрено нахождение людей и заданы требования к

параметрам воздушной среды. СП 60.13330.2020 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха СНиП 41-01-2003 (с Поправкой).

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

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

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

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

**Движущиеся машины и механизмы, передвигающиеся заготовки и материалы:**

В нашей лаборатории мы должны обеспечить требования к установке во время процесса загрузки и разгрузки. При перемещении машин и механизмов

или после перемещения заготовок и материалов разумная установка и разборка очень важны и должны соответствовать национальным стандартам, см. **ГОСТ 12.3.009-76 ССБТ. Работы погрузочно-разгрузочные. Общие требования безопасности.**

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

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



### 6.2.2. Расчет уровня производственного фактора

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

Световой поток лампы  $\Phi$  определяется по формуле:

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

где  $E_H$  – нормативная освещённость по СП 52.13330.2016, лк;  $S$  – площадь освещаемого помещения, м<sup>2</sup>;  $K_3$  – 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),

$N_{л}$  – число ламп в помещении (необходимо учесть число ламп в светильнике);  $\eta$  – коэффициент использования светового потока, который зависит от индекса помещения  $i$ , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью  $h$  и коэффициентов отражения стен  $R_c$  и потолка  $R_n$ . Индекс помещения определяется по формуле:

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

Рассчитав световой поток  $\Phi$ , зная тип лампы, по табл. выбираем ближайшую стандартную лампу и определяем электрическую мощность осветительной системы.

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

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

Требуемая освещенность  $E=300$  лк.

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

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

Выбираем стандартную ближайшую лампу – ЛТБ 40 Вт с потоком 2850

Лм. Делаем проверку выполнения условия:

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

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

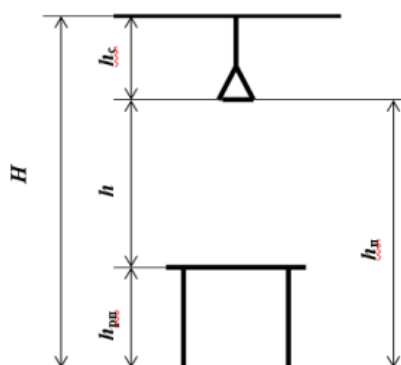


Рис. 6.2.1 – Основные расчетные параметры

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

м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p,$$

где  $h_n$  – высота светильника над полом, высота подвеса,  $h_p$  – высота рабочей поверхности над полом.

Наименьшая допустимая высота подвеса над полом для двухламповых

светильников ОДОР:  $h_n = 3,5$  м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

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

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

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

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

Размещаем светильники в два ряда. В одном ряду можно установить 4 светильника типа ОД мощностью 40 Вт (с длиной 1,26 м), при этом разрывы между светильниками в ряду составит 52 см. Изображаем в масштабе план помещения и размещения в нем светильников (рис.6.2.2). Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении  $n=8 \times 1 \times 2=16$  ламп.

Индекс помещения:

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

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

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

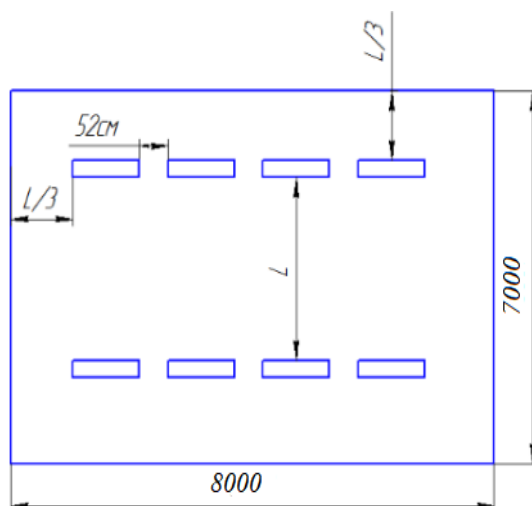


Рисунок 6.2.2 – Схема расположения светильников производственном помещении

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

Потребный световой поток люминесцентной лампы светильника определяется по формуле:

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

Делаем проверку выполнения условия:

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

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

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

### **6.3. Экологическая безопасность**

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

#### **Защита селитебной зоны**

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

#### **Анализ воздействия объекта на атмосферу**

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

#### **Анализ воздействия объекта на гидросферу**

В моем эксперименте являются основными источниками загрязнения окружающей среды. Сточные воды предприятий содержат нефтепродукты, образующиеся из смазочно-охлаждающих жидкостей и растворов обезжиривания, ионы тяжелых металлов, они являются II класс - высокоопасные

отходы. из гальванических производств, множество химических соединений. ГОСТ 17.1.3.13-86. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране поверхностных вод от загрязнений.

### **Анализ воздействия объекта на литосферу**

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

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

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

## **6.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

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

### **6.4.1. Наиболее типичной ЧС в 1-ом этаже корпуса 16А, ТПУ**

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

### **6.4.2. Рассматриваем две ситуации ЧС**

- 1). Природная– сильные морозы зимой;

Производственный цех находится в городе Томск с континентально-циклоническим климатом. Природные явления (землетрясения, наводнения,

засухи, ураганы и т.д.) в Томске отсутствуют. Возможными ЧС могут быть: природного характера – сильные морозы.

Разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;

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

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

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

2)Техногенная– шпионаж, диверсия;

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

"Технический регламент о требованиях пожарной безопасности"

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



### 6.4.3. Разработка превентивных мер по предупреждению ЧС

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



Рис. 6.4.3.1 – План эвакуации при пожаре и других ЧС из 1-го этажа корпуса 16а.

## 6.5. Выводы по разделу

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

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

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

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

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

## Приложение II - Раздел на иностранном языке

(справочное) I

### The impact of the minor cutting edge angle on the stress-strain state during steel processing

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4AM01	Хэ Лин		14.03.2022

Консультант отделения материаловедения ИШНПТ:

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

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

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

## Introduction

Key words: reliability of a cutting tool; contact stress distribution; steel processing; minor cutting edge angle; vertex radius; replaceable polyhedral plate.

Abstract: the stress-strain state (SSS) calculation results of square replaceable polyhedral plate of 40X steel during non-free oblique turning are introduced. The component of cutting force was measured by Kistler dynamometer, and the SSS of RPP was calculated by ANSYS program when the major cutting edge angle  $\varphi = 45^\circ$ , the rake angle  $\gamma = +7^\circ$ , the main clearance angle  $\alpha = 8^\circ$  and the value of minor cutting edge angle  $\varphi_1 = 10^\circ, 20^\circ$  and  $45^\circ$ , vertex radius  $r = 0.1, 0.8, 2$  mm, feed  $s = 0.07, 0.34$  and  $0.52$  mm/v. SSS analysis shows that the vertex radius increase and the minor cutting edge angle decrease lead to the decrease of RPP stress.

### The nature of the process

Non-free oblique cutting (Figure 1) is carried out in the most common technological schemes of metal processing during turning, shaping, milling, drilling, etc. From minor cutting edge new additional constituents of cutting force  $P_{z1}$ ,  $P_{y1}$  and  $P_{x1}$  appear that leads to changes in SSS of a cutting tool near the tool tip and more severe wear [1].

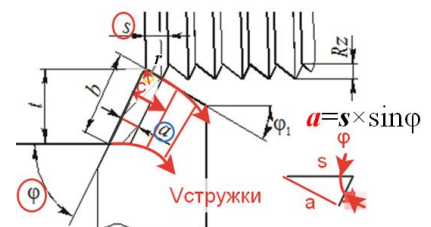


Figure 1. 1. Basic parameters of turning tool geometry and top view of cutting mode in non-free oblique cutting

In non-free cutting, the maximum share of cutting force load falls on the major cutting edge, especially when the cutting depth  $t$  is greater than 1 mm and when the radius from the top is greater than 3 values (Figure 1) [1].

In the stress-strain state (SSS) analysis of the cutting part of a tool, the stress and strain distribution on the main secant plane is usually considered.

If the cross-section occurs at the tip  $r$  at a distance greater than 3 radius values from the tip of the tool, it is considered that SSS can be regarded as a plane stress state when the cutting depth  $t$  is greater than 1mm, that is, when the cutting depth  $t$  is greater than 1mm. Within the contact length between the major cutting edge and the cutting surface, there is no obvious difference between the SSS patterns in the distance from the cutting edge.

In roughing machining, the removal of allowance occurs at a large cutting depth  $t$  (greater than 2 ~ 3mm), which proves that the hypothesis about the existence of a flat SSS on the main secant plane far away from the tip of the tool is reasonable.

In the most common non-free cutting in production, the major cutting edge has the largest load ratio of cutting force, which makes it possible to consider the stress-strain state (SSS) of the cutting edge

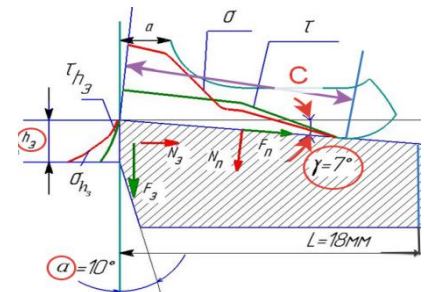


Figure 1.2. Contact stress distribution of tool surface in main secant plane

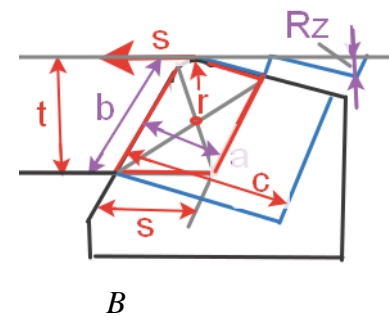
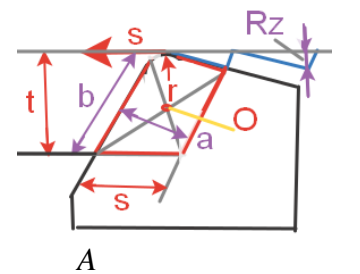


Figure 1.3. A concentrated force application point having a cutting thickness  $a$  and a cutting width  $b$  (A) and a chip contact section having a length  $c$  and a width  $b$  (B) with the front surface

When the distance from the tip exceeds 3 radius values (Figure 2), the tool on the main secant plane is a plane  $r$  (Figure 1).

In order to calculate SSS, an external load must be applied. Application of concentrated components  $P_z$ ,  $P_y$  and  $P_x$ , the cutting force at the intersection point O of the diagonal of the projected segment on the front surface of the tool with the cutting thickness  $a$  and the cutting width  $b$  at which the chip contacts the front surface (Fig. 3. A) as the center point of external force lead to incredibly huge internal stress at the force point due to stress concentration, thus, it [2] cannot be used.

The application point O is not selected according to the front surface contact area of the chip with the contact length  $c$  (fig. 3, B), because the original plastic deformation zone I (fig. 4) can be regarded as a plastic hinge, that leads to the fact that no large normal contact stress at a distance greater than  $L$ ;  $l_1 \approx a/\cos\gamma$  comes from the cutting edge. Therefore, the maximum proportion of contact load will be located in the irregular incomplete trapezoid  $b \times s$  (Figure. 3, A).

Application of uniform distribution ratio coefficient of contact load generated by forces in the relatively small area of the O point with a size of  $b \times 0,2c$  also produces incredibly large internal stresses [2].

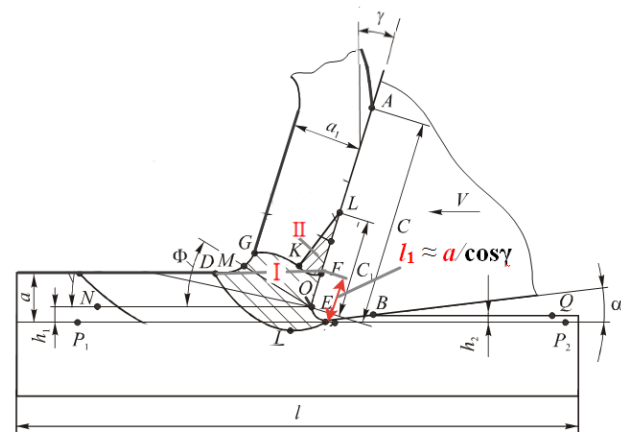


Figure 1.4. Chip formation zone during flow chip formation

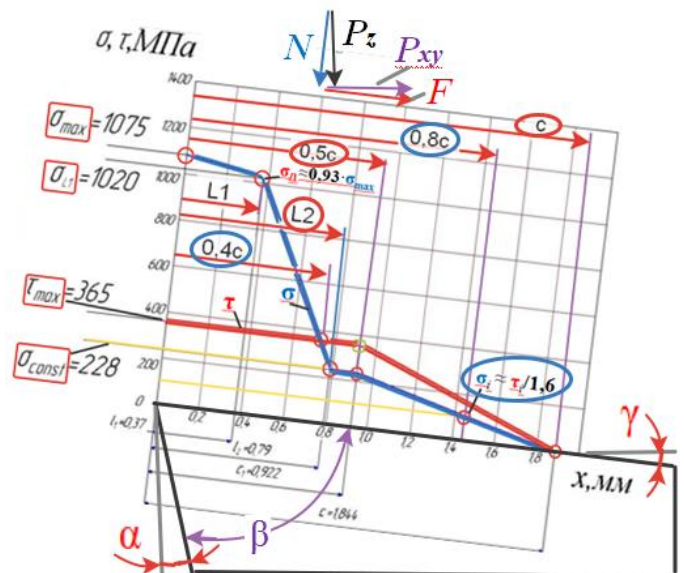


Figure 1.5. Normal  $\sigma$  and tau contact stress diagram of the front surface of the tool

Application of equally distributed average contact load  $q_{P_z} = P_z/(t \times s)$  and  $q_{P_{xy}} = P_{xy}/(t \times s)$  on the contact section between the chip and front surface decreases the maximum equivalent stress by 1.3 times compared with the actual contact stress distribution applied on the front surface of cutting tool [2].

Therefore, in order to improve the calculation accuracy of SSS, it is necessary to apply the real contact stress distribution.

The experimental study of contact stress distribution is very laborious and requires expensive special instruments, so a method for calculating them has been developed. The parameters of the graph are calculated according to the properties of the graph of shear contact stress  $\tau$  (MPa), and the graph form is simple (Figure 5).

The nature of the distribution diagram is almost independent on the cutting method and the geometry of the tool, and there are chip contacts of length on the plastic section line  $c_1$  that is parallel to the front surface. During steel processing, the plastic contact length of chips is the same as that of steel processing  $c_1 \approx 0,5 \cdot c$ . This property of graphs allows the use of the formula  $\tau_{\max} = \tau_{\text{const}} = F / (c \times 0,75 \times b)$ , where  $F$  is the tangential force on the front surface (H).

The numerical values of physical components  $F$  and  $N$  of cutting force are calculated according to the formula, taking into consideration the value of technological components  $P_z$ ,  $P_y$  and  $P_x$ , cutting force and rake angle  $\gamma$  value. The component acts on the main secant of the plane and is calculated according to the following formula.

Using the change diagram of conditional friction coefficient  $\mu = \tau / \sigma$ , the normal contact stress  $\sigma$  diagram is drawn relative to the diagram  $\tau$ . When the relative contact length between chip and front surface changes, it is determined by the formula  $\psi = x/c$  [1, 3].

When drawing sigma diagram, it is necessary to use its main support point and parameter:  $\sigma_{const}$ ,  $\sigma_{max}$ ,  $\sigma_{L1}$ ,  $L_1$ ,  $L_2$ . It can be determined according to the correlation diagram with section thickness  $a = s \cdot \sin\phi$  and rake angle value  $\gamma$  obtained from He Lin's graduate qualification work. The size of the major cutting edge angle  $\phi$  (°) depends on the selection of the tool, the installation of the tool in the cutting tool holder and the feed direction  $s$  (mm/v).

The correctness of drawing  $\sigma$  diagram is verified by comparing normal force  $N_\sigma$  obtained from diagram  $\sigma$  with the value of the normal force  $N_{\text{эКЧН}}$  obtained from the experiment. It is necessary to pay attention to the following formula:  $N_\sigma = S_\sigma \times b \approx N_{\text{эКЧН}}$  where  $S_\sigma$  is an area of a diagram (MPa/mm);  $b$  – the contact width (mm) between the chip and the front surface, which is approximately equal to the cut width  $b_{cp} = t / \sin\phi$ , because when  $t > 2\text{mm}$ , the chip broadening is very small.

To study the SSS of cutting plate in steel processing with ANSYS program, it is necessary to establish a three-dimensional model of replaceable polyhedral plate (CMP) at first. To create the 3D model, Compass 2022 software was used (Figures 6 and 7).

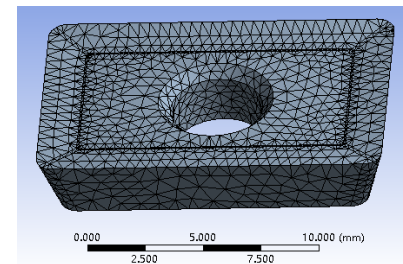


Figure 1.6. Three-dimensional rectangular RPP model with finite element mesh

In order to reduce the volume of the calculation area (reduce the calculation duration, improve the resolution of the finite element mesh, and reduce the possibility of program failure due to the large amount of calculation), the area where the stress and strain in the cutting part of the tool can be ignored is determined.

Therefore, firstly, SSS of the whole RPP is calculated, and the distribution of stress and strain is analyzed. The parts where the equivalent stress is less than 0.01 MPa and the total strain is less than 0.0001 mm are regarded as absolute rigid bodies.

Generally, even during rough cutting, the distance from the major cutting edge can be limited to less than 5 mm, with the total thickness of 4 ~ 6 mm. Therefore, at the second stage, we made a 3D model of such a cut part and set anchors along these boundaries in the ANSYS program (Figure 8).



Square RPP is used for both longitudinal turning, facing and chamfering turning, so it usually has a major cutting edge plane angle  $\varphi = 45^\circ$  and a minor cutting edge angle  $\varphi_1 = 45^\circ$ , side rake angle  $\lambda = 0^\circ$ , main clearance angle  $\alpha = 8^\circ$ .

In the work, ANSYS program is used to calculate the SSS of such parts of RPP when the constant major cutting edge angle  $\varphi = 45^\circ$ , the rake angle  $\gamma = +7^\circ$ , the main clearance angle  $\alpha = 8^\circ$  and the value of the minor cutting edge angle is different:  $\varphi_1 = 10^\circ, 20^\circ$  and  $45^\circ$ , with different radii, the top  $r = 0,1; 0,8$  and  $2$  mm,  $S = 0,07$  under different feed rates;  $s = 0,07; 0,34$  and  $0,52$  mm/v.

A three-dimensional model of a square RPP was established. According to the diagram obtained in the work, normal and tangential contact stresses were applied to the front surface of the RPP when the maximum feed  $s = 0,52$  mm/v. After calculating the stress-strain state of the RPP, the size of the area with equivalent stress not exceeding 0.01 MPa is determined.

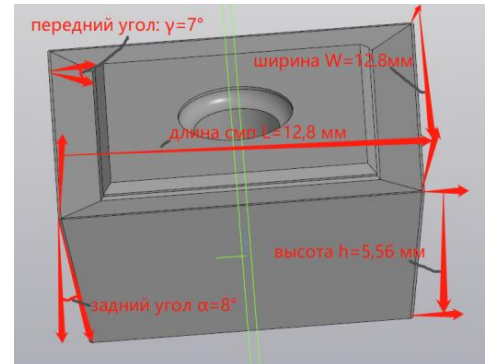


Figure 1.7. The geometrical parameters of square RPP three-dimensional model are: width  $w = 12.8$  mm, thickness  $h = 5.56$  mm, length  $l = 12.8$  mm,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 45^\circ$ ,  $\lambda = 0^\circ$ ,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ ,  $r = 0.1$  mm.

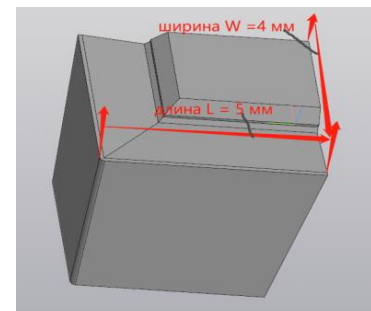


Figure 1.8. The geometrical parameters of the cut section made of a square for calculating the stress-strain state when the cut width  $b = 2.82$  mm, the thickness  $h = 5.56$  mm, the length  $l = 5$  mm,  $w = 4$  mm,  $t = 1.99$  mm, and  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 45^\circ$ ,  $\lambda = 0^\circ$ ,  $r = 0.1$  mm,  $\alpha = 8^\circ$ .

In addition, the maximum length of chip contact with the front surface is determined  $c_{\max}$  under all studied rake angles and feed rates, so that there is no need to change the size of the cutting part later.

After that, the minimum allowable incision size was determined: 5 mm long, 4 mm wide and 5.56 mm thick.

The cutting depth  $t$  in the experiment was specified as 2 mm, but due to the elastic deformation of the machine-fixture-tool-part system, the actual cutting depth  $t = 1,99$  mm, and the cutting width  $b = t/\sin\varphi = 1,99/\sin 45^\circ = 2,81$  mm when  $\varphi = 45^\circ$ . Therefore, in non-free cutting, the width is assigned to  $b_{\text{КОИТ}} = 2,81$  mm, 3D cut width of RPP  $b_p = 5$  mm, that is, greater than the cutting width.

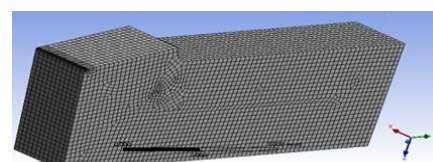


Figure 1.9. Three-dimensional model of simple cutting wedge in rectangular free cutting realized by turning the periphery of machined material disk with radial feed tool

In order to compare the SSS of square RPP with the SSS of tools working with only radial feed when turning the periphery of material disk, a 3D model of a simple cutting wedge was

established (Figure 9). The width of the 3D model has been assigned to  $b_{\text{КЛИНА}} = 2,82$  mm, i.e. only 0.1 mm more than the notch width  $b = 2,81$  mm, so the distribution of the main SSS parameters (stress and strain) can be seen even on the side, assuming that the stress state is flat, like in the main secant plane of a square RPP.

The technological constituents  $P_z$ ,  $P_y$  and  $P_x$  in steady cutting process was measured by Kistler dynamometer. According to the cutting force, the normal  $N$  and tangent  $F$  of the cutting force are calculated, and the main rake angle  $\gamma$  [1, 3] is considered.

According to the calculated physical component of cutting force and the contact length between C chip and the front surface of the tool,

the basic parameters of the diagram are calculated, and the normal  $\sigma$  and tangential  $\tau$  contact stress diagrams of the front surface of the cutting tool are drawn (see Figure 5).

In order to apply external load to the three-dimensional model of the unworn cutting tool, the contact length of chip  $c$  is decomposed into small segments, within which the average contact stress  $\sigma$  is determined according to the graph  $\sigma_{cp\ i}$  and  $\tau_{cp\ i}$ . The data recorded in Table 1 (the data in the example is  $\gamma = +7^\circ$  and  $s = 0,52$  mm/rv). Similar tables are established for other cutting conditions.

Table 1

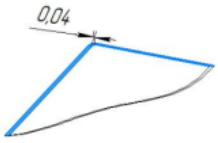
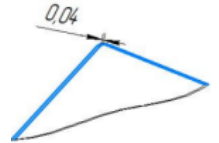
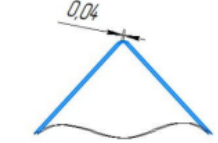
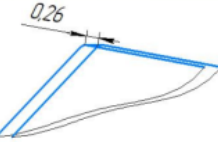

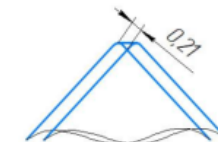
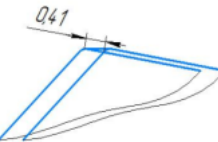
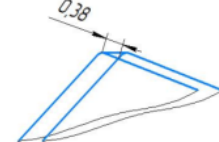
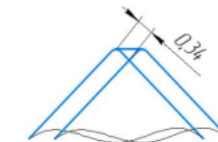
Average contact stress of chip contact position is used to load three-dimensional model of cutting wedge (tool)  $b_p = 2,82$  mm. Steel 440X-T15K6,  $v=120$  m/min,  $\gamma = +7^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ ,  $c = 1,84$  mm,  $s = 0,52$  mm/v.

Section number Self-cutting edge	Length of average contact stress action section, $L_{ni}$ mm	$\sigma_{cp\ i}$ , MPa	$\tau_{cp\ i}$ , MPa
1	0-0,18	1045	366
2	0,18-0,36	1015	366
3	0,36-0,56	880	366
4	0,56-0,81	490	366
5	0,81-0,92	220	366
6	0,92-1,12	210	323
7	1,12-1,3	185	255
8	1,3-1,48	134,7	180
9	1,48-1,66	74,45	115
10	1,66-1,84	24,8	50

The loading of minor cutting edge is as follows: during rough machining, the feed rate  $s = 0,52$  mm/o, and the contact length of minor cutting edge  $L_{bcn.} = 0,34$  mm (table 2 Similar forms are filled out at  $r = 0,8$  and 2 mm. when  $s = 0,07$  mm/vs,  $s = 0,34$  mm/vs and  $s = 0,52$  mm/vs, the load of the minor cutting edge is 2%, 8% and the total load is of 10%.

Table 2

The contact length of RPP and a workpiece along the minor cutting edge  $\varphi_1$  in relation to the minor cutting edge angle and shear thickness  $a$

The schemes for identifying the RPP contact length with the vertex radius $r = 0,1$ mm, the feed rate $s=0.07$ mm/vs, $0.34$ mm/vs and $0.52$ mm/vs, and the auxiliary angle $\varphi_1 = 10^\circ, 20^\circ, 45^\circ$ .			
$\varphi_1 \gg$ $S, \text{ mm/o}$	$\varphi_1 = 10^\circ$	$\varphi_1 = 20^\circ$	$\varphi_1 = 45^\circ$
$s = 0,07$			
$s = 0,34$			
$s = 0,52$			

When the vertex radius  $r$  is less than or equal to  $0.1$  mm, the formula can be derived without considering the radius, that is  $r = 0$  mm, but when  $r$  is greater than  $0.2$ , an overly complicated formula will be obtained. Through simple geometrical construction, the contact arc length of radius section and contact length of straight line section along the minor cutting edge are measured under different feed rate and minor cutting edge angle value  $\varphi_1$  (See Table 2).

Fig. 10 shows some calculation results of RPP equivalent stress.

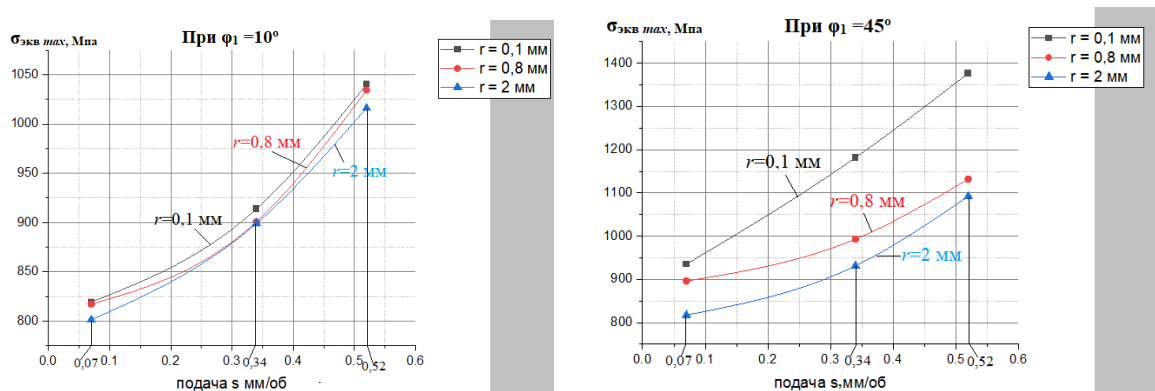


Figure. 10. Influence of feed  $s$ , vertex radius  $r$  and the minor cutting edge angle  $\phi_1$ , on the value of maximum equivalent stress  $\sigma_{\text{equivalentmax}}$ , when processing of steel (40X) RPP with the major cutting edge angle  $\phi = 45^\circ$ .

### Conclusion

It can be seen from the figure that with the increase of feed rate and minor cutting edge angle  $\phi_1$  maximum equivalent stress  $\sigma$  value  $\sigma_{\text{эKB max}}$  is obviously increased during steel processing. In the planar graph, the influence of the vertex radius  $r$  is especially obvious when the minor cutting edge angle is large  $\phi_1 = 45^\circ$ , where an increase of 0.1 mm to 2 mm leads to a significant decrease in  $\sigma_{\text{equivalentmax}}$  especially with significant feed. Minor cutting edge angle  $\phi$  is small  $\phi_1$  The effect of  $\phi_1 = 10^\circ$  top radius is almost non-existent.

### References

1. Kozhevnikov D.V., Grechishnikov V.L., Kirsanov S.V., Kokarev V.I., Schirtladze A.G. Cutting Tools: University Textbook/Edited by S.V. Kirsanov. Supplementary information, 2-s pro. add. M.: Machinery Manufacturing, 2005. -528 p: illus.
2. Influence of loading kind on internal stresses calculation in cutting wedge/Kozlov V. N., Zhang Jiayu//Bulletin of the Tula State University. Technical science. — 2017 . - No. 8, part 2. - [P. 88-94].
3. Chen Yuezhou. Calculation of diagrams of contact stresses in steel processing / Chen Yuezhou, Zhang Jiayu, V. N. Kozlov; scientific hands V. N. Kozlov // Scientific initiative of foreign students and graduate students of Russian universities collection of reports of the X All-Russian Scientific and Practical Conference, Tomsk, April 22-24, 2020: / National Research Tomsk Polytechnic University (TPU). - Tomsk: TPU Publishing House, 2020. - [P. 243-250].