

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КАБАРДИНО-БАЛКАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. Х.М. БЕРБЕКОВА»

На правах рукописи



ДЕУНЕЖЕВ ЗАЛИМ НИКОЛАЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АЛМАЗНЫХ  
ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ НА ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕ  
ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ НА СВЯЗУЮЩЕЕ**

Специальность: 2.5.5 Технология и оборудование механической  
и физико-технической обработки

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
д.т.н., профессор  
Яхутлов Мартин Мухамедович

Нальчик 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА</b> .....	13
1.1 Алмазные шлифовальные круги на полимерной матрице .....	13
1.2 Полимерные связующие для алмазных инструментов .....	21
1.3 Повышения работоспособности инструмента нанесением покрытий на алмазные зёрна .....	28
1.4 Тепловой режим алмазного шлифования.....	32
1.5 Исследования температур, напряжений и деформаций в системе «алмаз-матрица» .....	37
1.6 Выводы.....	43
<b>ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУР И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В СИСТЕМЕ «АЛМАЗНОЕ ЗЕРНО-ПОЛИМЕРНАЯ МАТРИЦА»</b> .....	45
2.1 Выбор и обоснование расчетной схемы .....	45
2.2 Моделирование температур в системе «алмаз-полимерная матрица» ..	47
2.3 Моделирование температур в системе «алмаз-покрытие-полимерная матрица» .....	56
2.4 Моделирование напряжённо-деформированного состояния от силовых и тепловых возмущений.....	62
2.5 Выводы.....	76
<b>ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА БАКЕЛИТОВОМ СВЯЗУЮЩЕМ</b> .....	78
3.1 Исследование морфологии и химического состава поверхности алмазных зерен.....	79

3.2 Исследование особенностей взаимодействия компонентов композиционного алмазосодержащего материала на бакелитовом связующем .....	85
3.3 Выводы.....	89
<b>ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АЛМАЗНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ НА ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕ .....</b>	<b>91</b>
4.1 Методика исследований.....	91
4.2 Экспериментальные исследования работоспособности алмазных шлифовальных кругов на полимерной матрице.....	96
4.3 Выводы.....	101
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>102</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>105</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ.....</b>	<b>119</b>
<b>Приложение А. Акты о внедрении результатов работы.....</b>	<b>119</b>
<b>Приложение Б. Протоколы численных экспериментов в программном комплексе SolidWorks и примеры обработки результатов расчётов .....</b>	<b>122</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Алмазно-абразивные режущие инструменты на полимерной матрице составляют до 70% от общего потребления алмазного инструмента в промышленности при обработке различных материалов, в основном металлов и сплавов, применяемых в машиностроении. Алмазонасная часть этих инструментов представляет собой композит, состоящий из непрерывной фазы в виде полимерного связующего, в котором распределены включения – алмазные зерна и наполнители. Практика эксплуатации алмазных шлифовальных кругов показывает, что большая часть алмазных зёрен выпадает из матрицы, не достигая значительного износа, и в результате уникальные физико-механические свойства алмаза как инструментального материала используются крайне неэффективно. Поэтому одной из важных, и сложных задач, стоящих перед специалистами, является повышение прочности закрепления алмазов в рабочей части инструмента.

Решение этой задачи для алмазных кругов на полимерной матрице, в отличие от инструментов на металлической и керамической матрицах, значительно осложняется низкой теплостойкостью связующего. В процессе резания под действием тепловых потоков происходит деструкция связующего и резко падает прочность удержания алмазного зерна в матрице круга.

Таким образом, снижение тепловой нагрузки от процесса резания – температур, температурных напряжений и деформаций – на полимерное связующее является актуальной задачей, решение которой позволит повысить прочность закрепления алмазов в матрице и, соответственно, работоспособность инструмента.

**Степень разработанности темы.** Значительный вклад в исследования тепловых явлений при шлифовании внесли: Маслов Е.Н., Маталин А.А., Попов С.А., Резников А.Н., Силин С.С., Старков В.К., Худобин Л.В., Ящерицын П.И., Малкин С. и др. При этом основное внимание уделяется

изучению тепловых процессов в обрабатываемой детали для решения вопросов обеспечения её качества. Тепловые процессы в шлифовальных кругах изучены существенно меньше, несмотря на то, что при алмазном шлифовании основная часть тепла, выделяемого при резании уходит в круг и, соответственно, тепловые процессы существенно влияют на работоспособность инструмента.

Сложность решения задачи повышения прочности закрепления алмазных зерен в инструменте определяется, прежде всего, их малыми размерами, разнообразием форм и плохой смачиваемостью поверхности расплавами материалов. Наиболее эффективным методом исследования системы «алмаз-матрица» инструмента, процессы в которой в значительной степени определяют прочность алмазоудержания, является численное моделирование. Это связано со сложностью как экспериментальных исследований, так и аналитических математических моделей из-за малых размеров и неоднородности свойств объекта.

Исследованиям температур, напряжений и деформаций в системе «алмазное зерно-матрица» посвящены работы Александрова В.А., Воронина Г.А., Журавлева В.В., Кардановой М.Р., Куц В.И., Лавриненко В.И., Олейникова А.Б., Чалого В.Т., Чистякова Е.М., Яхутлова М.М. и др. Имеющиеся к настоящему времени результаты моделирования температур и напряженно-деформированного состояния в системе «алмаз-полимерная матрица» получены с использованием упрощенных моделей, а результаты отдельных исследований не согласуются с экспериментальными данными.

Высокоэнергетическая поверхность алмаза имеет лучшее смачивание и более высокую работу адгезии к полимерным связующим по сравнению с материалами, используемыми в качестве покрытий на алмазы. Тем не менее существует практика нанесения на поверхность алмазных зёрен металлов (медь, никель, титан, вольфрам и др.) и их соединений, силикатных, органических и других материалов.

Исследования и разработки покрытий на алмазы для кругов на

полимерной матрице проводятся в основном экспериментально для конкретных условий, а эффективность покрытий оценивается по удельному расходу алмазов и другим интегральным показателям работоспособности инструмента. Опытным путем установлено, что лучшие результаты обеспечивают покрытия, соизмеримые с размерами алмазных зерен. Повышение работоспособности инструмента связывают, прежде всего, с увеличением прочности зерен за счет металлической оболочки покрытия и «залечивания» поверхностных дефектов на зернах материалом покрытия. Кроме того, отмечается, что, возникающее в процессе изготовления инструмента механическое защемление зёрен в матрице из-за различия их коэффициентов теплового расширения, усиливается развитостью микрогеометрии поверхности покрытия зёрен.

Относительно роли покрытий в тепловых процессах, отмечается, что металлические покрытия увеличивают теплопроводность алмазоносной части инструмента и тем самым снижают её нагрев за счет лучшего отвода тепла. Однако, авторы не учитывают, что при этом возрастает доля тепла, уходящего в инструмент. Также высказывается предположение, что покрытия, теплопроводность которых значительно ниже теплопроводности алмаза, уменьшают воздействие тепловых потоков на связующее. Таким образом, к настоящему времени не выработаны системные представления о механизме влияния покрытий на тепловые процессы.

**Цель работы.** Целью данной работы является повышение работоспособности алмазных шлифовальных кругов на полимерной матрице за счет снижения тепловой нагрузки на связующее.

**Задачи работы.** Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать трёхмерную конечно-элементную модель для расчета температурного поля и напряженно-деформированного состояния в системе «алмаз-покрытие-полимерная матрица».
2. Численным моделированием исследовать стационарное

температурное поле в системах «алмаз-полимерная матрица» и «алмаз-покрытие-полимерная матрица».

3. Численным моделированием исследовать напряженно-деформированное состояние систем «алмаз-полимерная матрица» и «алмаз-покрытие-полимерная матрица».

4. Экспериментально изучить морфологию и химический состав поверхности алмазных зёрен без покрытия и с покрытием.

5. Исследовать характер взаимодействия в процессе изготовления инструмента компонентов композитов на бакелитовом связующем с алмазными зёрнами без покрытия и с покрытием.

6. Экспериментально исследовать влияния покрытий на алмазы на работоспособность алмазных шлифовальных кругов на полимерной матрице.

**Объект исследования.** Алмазные шлифовальные круги на полимерной матрице, оснащенные алмазными порошками без покрытия и с различными покрытиями.

**Предмет исследования.** Закономерности влияния тепловыделений в зоне резания на температуры, напряжения и деформации в системе «алмаз-покрытие-полимерная матрица» и в целом на работоспособность инструмента.

**Научная новизна работы** состоит в:

– теоретическом анализе стационарного температурного поля в системе «алмаз-полимерная матрица» и его зависимости от теплопроводности матрицы;

– установленных закономерностях распределения температурных напряжений и деформаций в системе «алмаз-полимерная матрица»;

– теоретическом анализе стационарного температурного поля в системе «алмаз–покрытие-полимерная матрица» и его зависимости от теплопроводности и толщины материала покрытия;

– установленных зависимостях температурных напряжений в системе «алмаз–покрытие-полимерная матрица от теплопроводности и толщины материала покрытия.

**Теоретическая значимость** работы заключается в том, что в результате численного моделирования получено системное представление о стационарных полях температур, напряжений и деформаций в системах «алмаз-полимерная матрица» и «алмаз-покрытие-полимерная матрица» в зависимости от их геометрических параметров, свойств элементов, а также параметров силовых и тепловых возмущений от процесса резания.

**Практическая значимость работы** заключается в повышении прочности удержания алмазных зёрен в полимерной матрице шлифовальных кругов с использованием:

– разработанной трёхмерной конечно-элементной модели полей температур, напряжений и деформаций в системе «алмаз-покрытие-полимерная матрица», реализованной в среде SolidWorks Simulation и позволяющей варьировать физико-механическими и теплофизическими свойствами, размерами зерна, покрытия и матрицы, а также параметрами силовых и тепловых возмущений от процесса резания;

– практических рекомендаций, вытекающих из результатов моделирования распределения напряжений от сил резания в системе «алмаз-полимерная матрица» в зависимости от модуля Юнга материала матрицы, степени погружения зерна в матрицу и угла наклона зерна;

– практических рекомендаций, вытекающих из результатов моделирования распределения температур в системе «алмаз-матрица» и его зависимости от теплопроводности матрицы;

– практических рекомендаций, вытекающих из результатов моделирования зависимости температур и температурных напряжений от материала покрытия и его толщины.

**Методы исследования.** Исследования базируются на современных методах теории теплопроводности, теории упругости, теории резания и режущего инструмента. Вычислительные эксперименты проводились методом конечных элементов. Морфология и химический состав поверхности алмазных зерен изучали методом сканирующей электронной микроскопии. Характер



взаимодействия между компонентами композиционного алмазосодержащего материала на полимерной матрице исследовали методом рентгенофазового анализа.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

– трехмерная конечно-элементная модель для расчета полей температур, напряжений и деформаций в системе «алмаз-покрытие-матрица», позволяющая варьировать физическими свойствами элементов, геометрией системы и параметрами силовых и тепловых воздействий на неё от процесса резания;

– результаты моделирования стационарного температурного поля в системе «алмаз-полимерная матрица» и его зависимости от теплопроводности матрицы;

– результаты моделирования стационарного температурного поля в системе «алмаз-покрытие-полимерная матрица» и его зависимости от теплопроводности покрытия и толщины никелевого покрытия;

– полученные закономерности распределения напряжений и деформаций в системе «алмаз-полимерная матрица» от силы резания, а также закономерности их изменения в зависимости от модуля упругости материала матрицы, степени погружения зерна в матрицу и угла наклона зерна;

– полученные закономерности распределения температурных напряжений в системе «алмаз-полимерная матрица»;

– результаты моделирования температурных напряжений и деформаций в системе «алмаз-покрытие-полимерная матрица» для покрытий из различных материалов, а также зависимости температурных напряжений от толщины никелевого покрытия;

– результаты моделирования зависимости температурных напряжений в системе «алмаз-покрытие-полимерная матрица» от коэффициентов теплопроводности и теплового расширения матрицы для различных материалов покрытия;

– результаты моделирования температурных напряжений в системе «алмаз-полимерная матрица» при одновременном действии силовых и температурных возмущений от процесса резания;

– результаты исследований морфологии и химического состава поверхности зёрен синтетического алмазного шлифпорошка АС4 в исходном состоянии и с никелевым покрытием;

– результаты рентгенофазового анализа характера взаимодействия в процессе изготовления инструмента между компонентами композиционного алмазосодержащего материала на бакелитовом связующем на основе алмазов с покрытием и без покрытия;

– результаты экспериментальных исследований работоспособности шлифовальных кругов на бакелитовом связующем, оснащенных алмазами без покрытия и с покрытием никелем.

**Достоверность результатов.** Степень достоверности результатов основывается на:

- использовании современных методов исследования, тщательности проведения численных и физических экспериментов, воспроизводимости полученных результатов;

- согласованности результатов численного моделирования температур с известными данными измерений при алмазном шлифовании;

- согласованности теоретических выводов и результатов практических исследований и испытаний инструментов.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на: V международной научно-технической конференции «Наука, техника и технология XXI века» (г. Нальчик, 2013 г.); международной научно-практической конференции «Менеджмент качества. Транспортные и информационные технологии» (г. Нальчик, 2016 г.); II международной научно-практической конференции «Менеджмент качества. Транспортная и информационная безопасность. Информационные технологии» (г. Санкт-Петербург, 2017 г.); XIV

международной научно-практической конференции «Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения» (г. Нальчик, 2018 г.); международной научно-практической конференции «Прорывное развитие экономики России: условия, инструменты, эффекты» (г. Нальчик, 2018 г.); III международной научно-практической конференции «Менеджмент качества. Транспортная и информационная безопасность. Информационные технологии» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.); XXIV международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектива-21» (г. Нальчик, 2021 г.); VII международной научно-практической конференции «Менеджмент качества. Транспортная и информационная безопасность. Информационные технологии» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.); IV всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективные инновационные проекты молодых ученых» (г. Нальчик, 2014 г.); II республиканской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективные инновационные проекты молодых ученых КБР» (г. Нальчик, 2012 г.).

Разработка по теме диссертации получила поддержку по программе УМНИК (Участник молодежного научно-инновационного конкурса) фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (проект «Разработка высокоэффективных алмазных шлифовальных кругов на полимерной матрице»).

В полном объеме диссертация заслушана и одобрена на заседании кафедры «Технология и оборудование автоматизированного производства» ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» и на кафедре «Инструментальная техника и технология формообразования» ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «Станкин».

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Работа соответствует паспорту научной специальности 2.5.5 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»

в части пп. 2, 4, 6.

**Публикации результатов.** По результатам диссертации опубликовано 23 печатные работы, из них 9 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, в наукометрических базах данных Web of Science и Scopus зарегистрировано 5 публикаций.

**Структура и объём работы.** Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка и приложения. Общий объём работы 155 страниц машинописного текста и содержит 65 рисунков и 15 таблиц.

## ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

### 1.1 Алмазные шлифовальные круги на полимерной матрице

Существует три основных класса алмазно-абразивных инструментов: на органических, керамических и металлических матрицах. Наибольшее распространение (50–60%) находят алмазные шлифовальные круги на полимерной матрице (рис. 1.1), которые широко используются в машиностроении, металлургической, деревообрабатывающей и других отраслях промышленности [30]. Инструмент на полимерной матрице прост в изготовлении и универсален в работе, хорошо самозатачивается, имеет высокую режущую способность, работает с охлаждением и без него, применяется как на доводочных, так и на обдирочных операциях, а также для заточки режущих инструментов [30, 93].



Рисунок 1.1 – Разновидности алмазных шлифовальных кругов

Рабочая (алмазноносная) часть этих инструментов представляет собой композиционный материал - матричную систему, в которой связующее

является непрерывной фазой, а зёрна алмазов и наполнители распределены в нем в виде включений (рис. 1.2). Основной проблемой при разработке таких материалов является обеспечение прочного закрепления частиц твердой фазы в матрице и в то же время максимальное сохранение ее химической индивидуальности в условиях эксплуатации [15, 80].

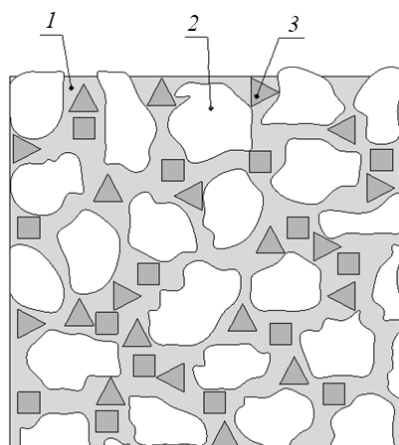


Рисунок 1.2 - Структура композиционного алмазосодержащего материала на полимерном связующем:

1- полимерное связующее; 2- алмазное зерно; 3- наполнитель

Алмазы, в зависимости от происхождения, делятся на природные и синтетические. Синтетические алмазы составляют около 90% от общего потребления технических алмазов [30].

Алмаз обладает наибольшей твердостью из известных в природе материалов (см. табл. 1.1) [30].

Таблица 1.1 - Твердость минералов

Минералы	Твердость по шкале Мооса	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Алмаз	10,0	3,47-3,55
Корунд	9,0	3,99
Топаз	8,0	3,56
Циркон	7,5	4,69
Кварц	7,0	2,6

Существует также класс сверхтвёрдых материалов – группа веществ, обладающих значениями микротвёрдости выше чем у корунда (более 40 ГПа). В группу сверхтвёрдых материалов, имеющих природное происхождение, входит только алмаз. Постоянно ведется синтез новых сверхтвёрдых материалов. К настоящему времени в первую тройку по твёрдости входят кубический карбонитрид бора и кубический нитрид бора (табл. 1.2) [29].

Таблица 1.2 - Механические свойства сверхтвёрдых материалов (20°C)

Свойство	Алмаз*	Кубический карбонитрид бора, cBC <sub>2</sub> N	Кубический нитрид бора, cBN
Модуль Юнга, ГПа	1140	980	908**
Твёрдость по Кнупу, ГПа	64	56	45
Микротвёрдость, ГПа	116	77	63
Нанотвёрдость, ГПа	-	75	55

\*Монокристалл.

\*\*Рассчитано по упругим постоянным монокристаллического cBN.

Наряду с наивысшей твердостью, алмаз имеет и другие уникальные физико-механические свойства, которые делают алмаз незаменимым инструментальным материалом - низкие коэффициент трения с обрабатываемым материалом и коэффициент теплового расширения, высокий коэффициент теплопроводности, высокий модуль упругости. С другой стороны, алмаз отличается химической инертностью. Малые размеры и разнообразие форм алмазных зёрен, плохая смачиваемость поверхности расплавами материалов и чувствительность к высоким температурам осложняют процесс закрепления их в матрице инструмента.

Алмазные абразивные материалы (порошки) в зависимости от происхождения делятся на следующие группы: А - природные алмазные

порошки; АС - синтетические алмазные порошки; АР - синтетические поликристаллические алмазные порошки.

Алмазные зерна, используемые при изготовлении алмазно-абразивных инструментов, делятся на четыре группы, в зависимости от размера порошка, способа их получения и видов контроля:

- шлифпорошки (от 2500 до 40 мкм получают в ситах);
- микропорошки (от 60 до 1 мкм, получают в гидроцентрифугах);
- субмикропорошки (от 1,0 до 0,1 мкм, выделяются в процессе изготовления шлифовальных порошков);
- нанопорошки (от  $10^{-4}$  до  $10^{-3}$  мкм).

При изготовлении инструмента на полимерной матрице используют в основном шлиф- и микропорошки синтетических алмазов (см. рис. 1.3) [1, 30].

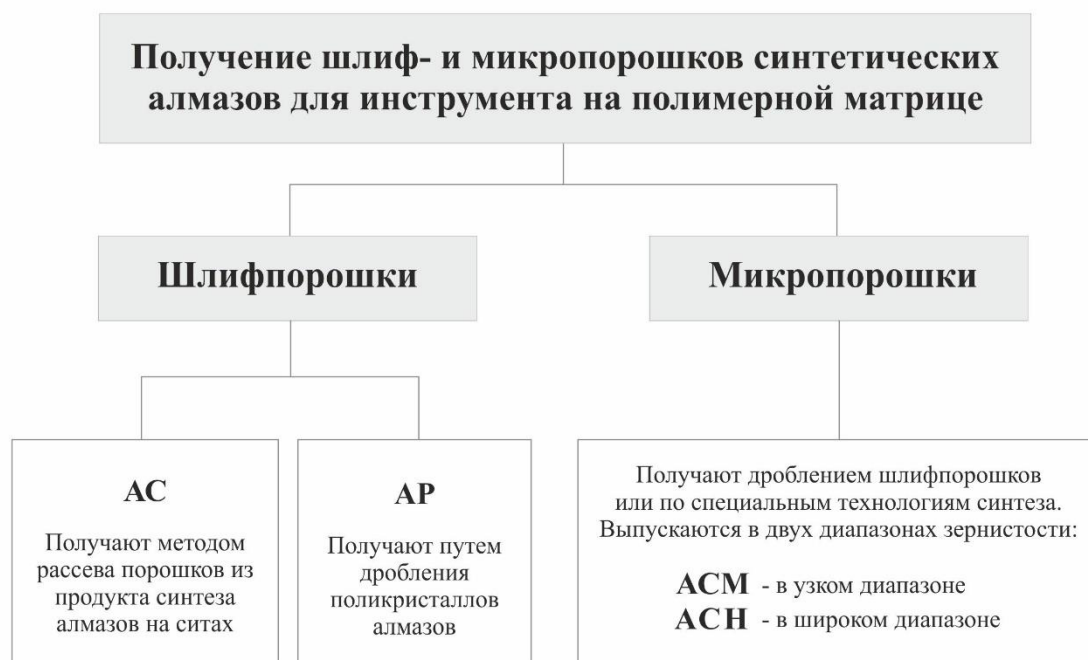


Рисунок 1.3 – Методы получения шлиф- и микропорошков синтетических алмазов

Наряду с качеством алмазов, на работоспособность алмазного инструмента оказывают существенное влияние состав и физико-химические



свойства матрицы и их соотношение со свойствами алмазов и обрабатываемого материала, а также конструкция, технология изготовления, условия и режимы эксплуатации инструмента [112, 114, 124].

В полимерных матрицах в качестве связующих применяют олигомеры и мономеры, отличающиеся между собой свойствами, температурами стеклования и деструкции [29].

Кроме связующего в матрицу алмазно-абразивного инструмента вводят наполнители, придающие композиционному материалу необходимые физико-механические свойства. Например, повышающие теплопроводность для снижения нагрева алмазно-абразивного инструмента в процессе работы (различные металлы, соединения металлов и т.д.); улучшающие адгезионную связь зерен к связке (различные минеральные вещества и т.п.); активизирующие процесс шлифования путем химического воздействия с обрабатываемым материалом (сера, галогеносодержащие вещества и т.п.) и др. [23, 66, 76].

К наполнителям предъявляют общие требования: способность совмещаться с полимером и образовывать однородные композиции; иметь хорошую смачиваемость к полимерам и олигомерам; обладать стабильными свойствами при переработке, хранении, эксплуатации [46, 59, 76].

В табл. 1.3 приведено объемное соотношение алмазов, наполнителя и связующего в рабочем слое инструмента на полимерной матрице с различной относительной концентрацией алмазов [29].

Технология изготовления алмазно-абразивного инструмента определяется его конструкцией, характеристиками алмазного сырья, полимерного связующего и наполнителей, а также условиями его эксплуатации.

При производстве алмазного инструмента на полимерных матрицах в основном применяют способ горячего прессования. Схема типового технологического процесса изготовления инструмента приведена на рис. 1.4.

Таблица 1.3 - Содержание алмазов и наполнителя в алмазоносном слое инструмента (объемная доля связующего - 50%) [30]

Относительная концентрация алмазов, %	Содержание алмаза, кар/см <sup>3</sup>	Объемная доля, %	
		алмазов	наполнителя
50	2,2	12,5	37,5
100	4,4	25,0	25,0
150	6,6	37,5	12,5
200	8,8	50	-



Рисунок 1.4 - Схема технологического процесса изготовления алмазного инструмента на полимерной матрице

При эксплуатации алмазные шлифовальные круги (рис. 1.5) находятся под действием силовых и тепловых возмущений от процесса резания. В процессе шлифования, выступающие из матрицы зерна, при вращении круга со скоростью до 80 м/с срезают с заготовки очень мелкую стружку. Процесс снятия стружки одним зерном происходит за короткий промежуток времени -

$(0,5 \div 1,0)10^{-4}$ с. Малые размеры и большое число зёрен, участвующих в резании, определяют толщины срезаемых стружек в несколько микрон и их большое число (до сотни миллионов в минуту). Еще одной особенностью шлифования является самозатачивание круга, которое заключается в том, что вследствие увеличения нагрузки на затупленное зерно оно разрушается и выпадает из матрицы, обнажая новые острые зерна [1, 51, 64].

Силы резания при шлифовании определяются усилиями микрорезания отдельными зёрнами и трения матрицы и обрабатываемой поверхности.

В процессе эксплуатации в зависимости от условий и режимов алмазные шлифовальные круги подвергаются различным видам износа - абразивному, диффузионному, адгезионному, окислительному, химическому и др. Отмечается существенное влияние на износ инструмента температурных факторов процесса резания [30, 52, 93].

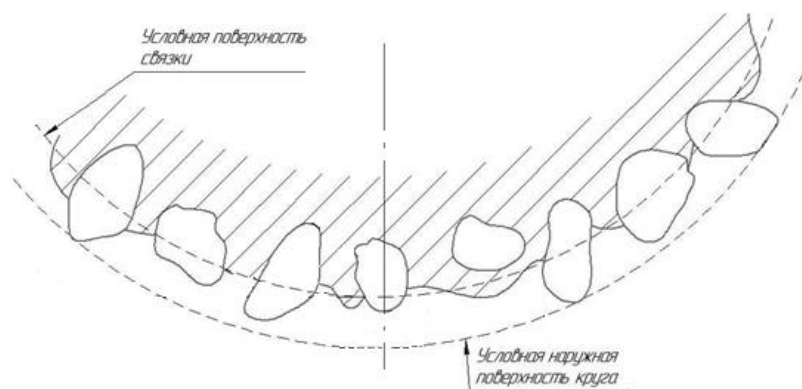


Рисунок 1.5 – Схематизация рабочего слоя шлифовального круга

В процессе эксплуатации алмазные зёрна подвергаются преимущественно абразивному, адгезионному и диффузионному видам износа. Как правило, эти виды износа протекают одновременно и любой из них может быть преобладающим в зависимости от условий шлифования. При абразивном износе на изношенной поверхности зёрен образуются риски, параллельные направлению скорости резания, при диффузионном износе на зёрнах образуются гладкие полированные площадки износа, а для

адгезионного вида износа характерна поверхность, имеющая бугристое строение. При высоких температурах контакта может происходить интенсивное окисление алмаза или его графитизация, т. е. возможен и четвертый вид износа – окислительный [3, 16, 52, 82, 103].

Различают удельный износ алмаза при резании инструментом с единичным зерном и при абразивной обработке совокупностью зерен, скреплённых в инструменте при помощи связки. Отношение этих величин позволяет судить об эффективности использования абразивного материала и качестве связки. В работе [47] получены следующие значения эффективности использования алмазов в кругах на бакелитовой матрице: при шлифовании молибдена - 9%, жаропрочных сплавов - 6%, титана - 3%, стали 40 - 2%, никеля - 0,09% и чугуна - 0,07%.

Одним из основных показателей работоспособности алмазно-абразивных инструментов является удельный расход алмазов, определяемый как отношение массы израсходованного алмаза к объёму снятого обрабатываемого материала. Методики определения удельного расхода алмазов основаны на расчете весового содержания абразивных зерен в объеме изношенной части инструмента за период опыта, который определяется экспериментально на основе весовых измерений или линейных измерений размерного износа рабочей поверхности инструмента [19].

Существует также методика определения удельного расхода алмазов и других сверхтвердых абразивных материалов, основанная на исследовании шлама, образующегося при обработке. Для этого выделяют из шлама абразивные зерна и проводят анализ их состояния, в частности, классификацию по зернистости. Эксперименты с использованием указанной методики показали, что основным механизмом износа исследованных алмазных кругов на бакелитовой связке является механическое разрушение зерен и выпадение их из связки вследствие недостаточно прочного удержания в матрице или износа связующего. При этом преобладающая часть абразивных зерен в шламе имеет размеры, позволяющие повторно использовать зерна для

изготовления инструментов [82].

Отметим, что, наряду с удельным расходом алмазов, используются и другие показатели работоспособности алмазных шлифовальных кругов: режущая способность; шероховатость обработанной поверхности; эффективная мощность шлифования.

## 1.2 Полимерные связующие для алмазных инструментов

Дисперсионная среда – сплошная фаза, составная часть дисперсной системы, в которой равномерно распределены частицы дисперсной фазы.

Полимерное связующее выполняет функции дисперсионной (сплошной) среды, в которой распределены алмазные зёрна и частицы наполнителя, и существенно влияет на свойства алмазосодержащего слоя инструмента. Связующее должно удовлетворять следующим требованиям [79, 93, 125]:

- 1) обеспечивать высокую прочность сцепления с поверхностями алмазного зерна и наполнителя;
- 2) обладать достаточной теплостойкостью и термостойкостью, иметь хорошую теплопроводность;
- 3) иметь близкий к алмазу температурный коэффициент линейного расширения;
- 4) обладать достаточной прочностью при действии сил резания, при этом обеспечивать самозатачивание;
- 5) обладать одновременно твёрдостью для прочного закрепления алмазных зёрен и достаточной вязкоупругостью, обеспечивающей их упругое перемещение под действием сил резания;
- 6) Не вступать в химическое взаимодействие с обрабатываемым материалом и смазывающе-охлаждающей жидкостью;
- 7) иметь низкую вязкость для качественного формирования алмазоносной части инструмента;
- 8) иметь относительно низкие давления и температуры

полимеризации и отверждения с малой усадкой.

В качестве связующих в алмазно-абразивных инструментах используются фенолформальдегидные полимеры двух видов - резольные (термореактивные смолы) и новолачные (термопластичные смолы). На рис. 1.6 приведены полимеры, находящие наибольшее применение в технологических процессах изготовления алмазно-абразивных инструментов.

Физико-механические свойства некоторых полимерных связующих представлены в таблице 1.4. Фенольное связующее СФП-012А с 9% гексаметилентетраамином отличается высокой тепло- и термостойкостью, твёрдостью, наличием большого количества полярных гидроксильных групп и стала основой для многих связок. Как видно из таблицы, прочностные свойства у смолы СФ-342А примерно на 30% выше, чем у СФП-012А.

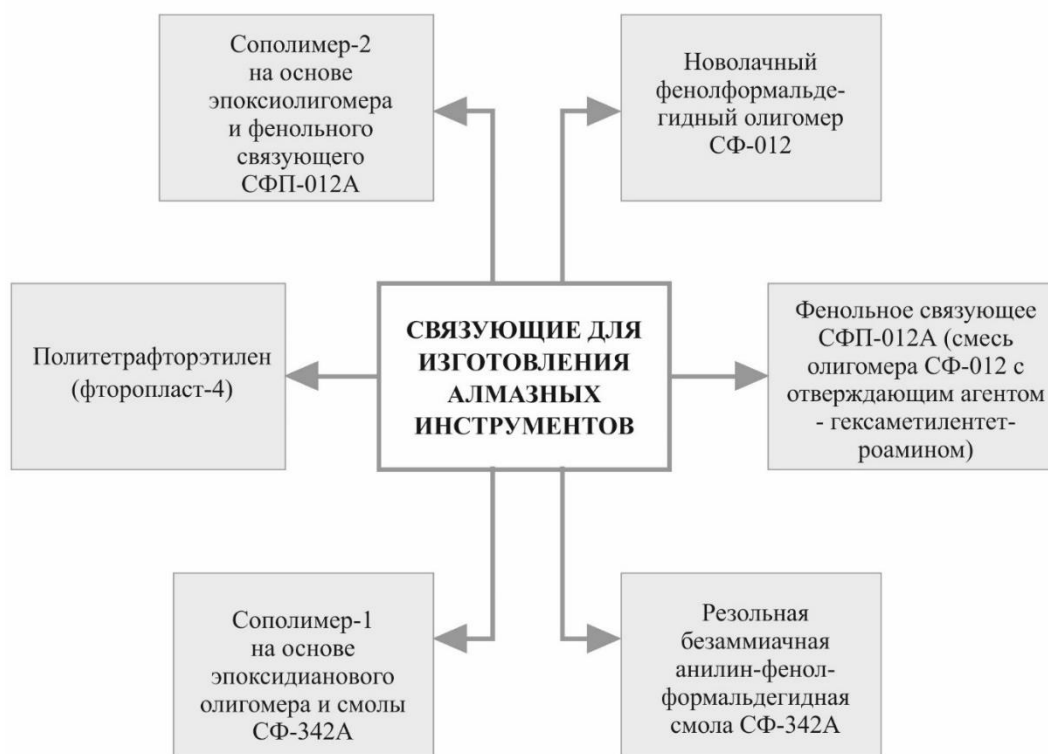


Рисунок 1.6 – Основные полимеры, используемые при изготовлении алмазных инструментов

Таблица 1.4 - Физико-механические свойства полимерных связующих [93]

Связующее	$A_n$ , кДж/м <sup>2</sup>	$\sigma_{изг}$ , МПа	$\sigma_{сж}$ , МПа	HRB	$T_c$ , К
СФП-012А с 9% гексаметилентетраамином	1,6±0,2	50±8	76±11	110±5	433
СФ-342А	3,5±0,3	80±8	110±15	110±6	412
Блок-сополимер	6,4±0,4	95±11	155±13	91±4	383
Фторопласт модифицированный	71±7	33±5	45±6	60±5	403

Примечание.  $T_c$  – температура стеклования

Смола СФ-342А обладает высокой устойчивостью к ударным, изгибающим и сжимающим нагрузкам, поэтому применяется в кругах, работающих при более жестких режимах шлифования. Также отмечают, что наличие реакционноспособных гидроксильных, метилольных и аминных групп в смоле СФ-342А, а также способность последнего к длительному пребыванию в текучем и вязком состоянии, позволяет ей лучше пропитывать и смачивать абразивные зерна и наполнители в инструменте [93].

Блок-сополимер на основе эпоксидианового олигомера, смолы СФ-342А и специального катализатора применяют в инструментах для отделочной обработки (полирование и суперфиниш) [93].

Фторопласт, обладающий низким коэффициентом трения, сопротивляемостью ударным нагрузкам и истиранию, высокой термостойкостью, отсутствием реакции к смазывающе-охлаждающей жидкости, используют для чистовой обработки труднообрабатываемых сплавов. Кроме этого, данное связующее характеризуется практически полным отсутствием схватывания с основными обрабатываемыми материалами (железоуглеродистыми, титановыми и др. сплавами), а также способностью к самосмазыванию [103].

В связи с постоянным повышением требований к алмазно-абразивным инструментам и расширением сфер их применения интенсивно ведётся

разработка новых полимерных связующих. Среди новых связующих выделяются полиамидные - термореактивные олигомеры, при отверждении которых образуются сетчатые полимеры. Алмазно-абразивные композиты на их основе имеют высокую деформационную теплостойкость – они выдерживают рабочую температуру до 623-673 К. Кроме того, отмечается их повышенная адгезия к алмазу и наполнителям, высокая механическая прочность и низкий коэффициент трения к обрабатываемым материалам [30].

Кроме полиамидов разработаны перспективные связующие для алмазных инструментов - полиакрилаты, алициклические эпоксидные смолы, политриазины и др. [29].

Как было отмечено, одним из необходимых и важных свойств связующих является способность к более полному смачиванию поверхности алмаза и наполнителя, определяющая площадь контакта и условия взаимодействия фаз, от которых, в свою очередь, зависит физико-механические свойства алмазноносного слоя, а также адгезионная прочность удержания им алмазных зерен.

Адгезия – это явление, возникающее на поверхности соприкосновения двух разнородных тел и определяющее силу их взаимодействия. Причиной появления адгезионной связи является химическое межмолекулярное притяжение контактирующих тел.

Смачивание – явление, происходящее на границе раздела жидкости и твердого тела. Количественной мерой контактного смачивания является краевой угол  $\theta$ , образуемый поверхностью твердого тела и касательной к поверхности в точке их соприкосновения.

Термодинамической величиной, характеризующей межфазную связь, является работа адгезии – энергия, затрачиваемая на разделение контактирующих поверхностей при обратимом процессе в равновесных условиях. В данном случае работа адгезии определяется по уравнению Дюпре-Юнга

$$W_a = \sigma_{жг}(1 - \cos\theta),$$



где  $\theta$  и  $\sigma_{жг}$  – определенные экспериментально краевой угол смачивания твёрдой фазы жидкостью и поверхностное натяжение жидкой фазы, соответственно [57].

Изучалось смачивание материалов, имеющих разную природу и поверхностную энергию - природного алмаза, кубонита, электролитического никеля, силикатного стекла и фторопласта-4 - расплавами смол [93]. Результаты экспериментов представлены на рис. 1.7 и 1.8, а результаты расчетов термодинамической работы адгезии  $W_a$  – на рис. 1.9.

Зависимости краевого угла смачивания алмаза расплавами связующих от температуры носят экстремальный характер (см. рис. 1.7). Снижение  $\theta$  при увеличении температуры до определенных значений для каждого олигомера объясняется увеличением подвижности полимерных цепей, снижением вязкости и поверхностного натяжения. Наиболее полное смачивание олигомеров ЭД-16, ЭД-20 и Э-41, Э-44, СФ-012 происходят при температурах 353 К и 413 К, соответственно. Связующие СФП-012А, СФ-342А и сополимер смачиваются при 433 К, эпоксиолигомер - при 453 К. Повышение температуры выше указанных приводит к увеличению краевого угла смачивания, что связывается с формированием на подложках монослоя с низким поверхностным натяжением вследствие интенсификации процессов адсорбции продуктов термического окисления молекулярных цепей и низкомолекулярных фракций [93].

Присутствие на поверхности алмаза гидроксильных, карбоксильных, карбонильных и эфирных групп, способствует образованию химических и физических связей со смолами. Этим объясняется результаты исследований, представленные на рисунках 1.7, 1.8 и 1.9, из которых следует, что поверхность алмаза имеет меньшие краевые углы смачивания и большие значения термодинамической работы адгезии к смолам, чем другие материалы [13, 93].

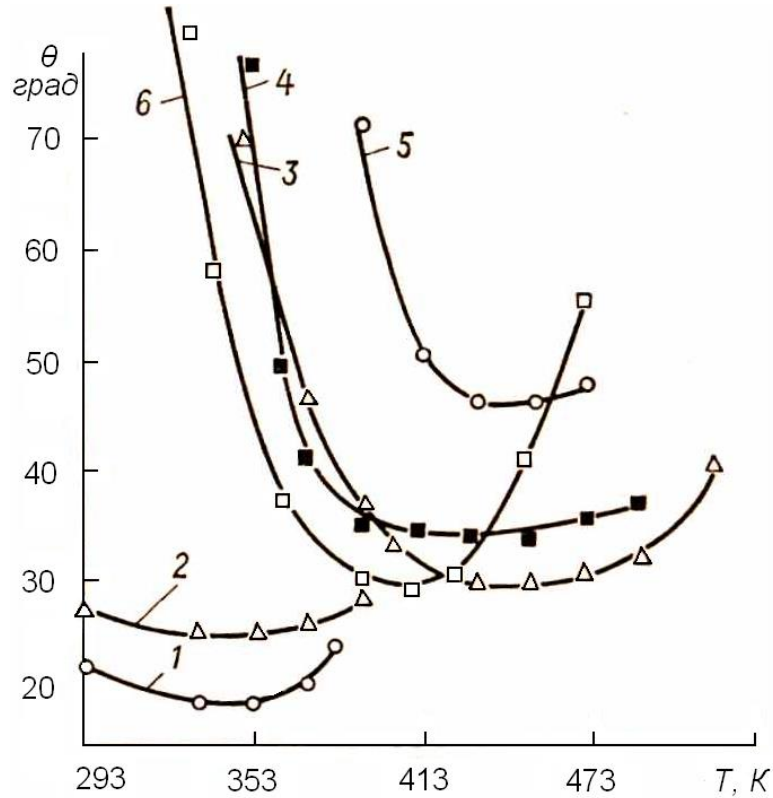


Рисунок 1.7 – Зависимость угла смачивания  $\theta$  алмаза с расплавами олигомеров от температуры: 1-ЭД-20, 2 - ЭД-16, 3- Э-41, 4 - Э-44, 5- Э-49 (5), 6 - СФ-012 [93]

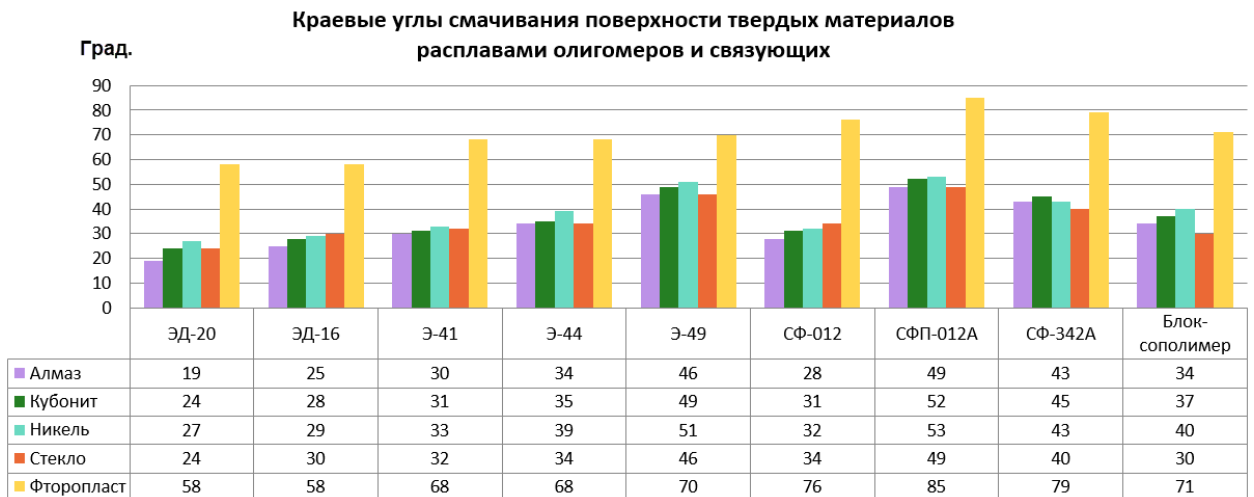


Рисунок 1.8 – Краевые углы смачивания (град) поверхности твердых материалов расплавами олигомеров и связующих [93]

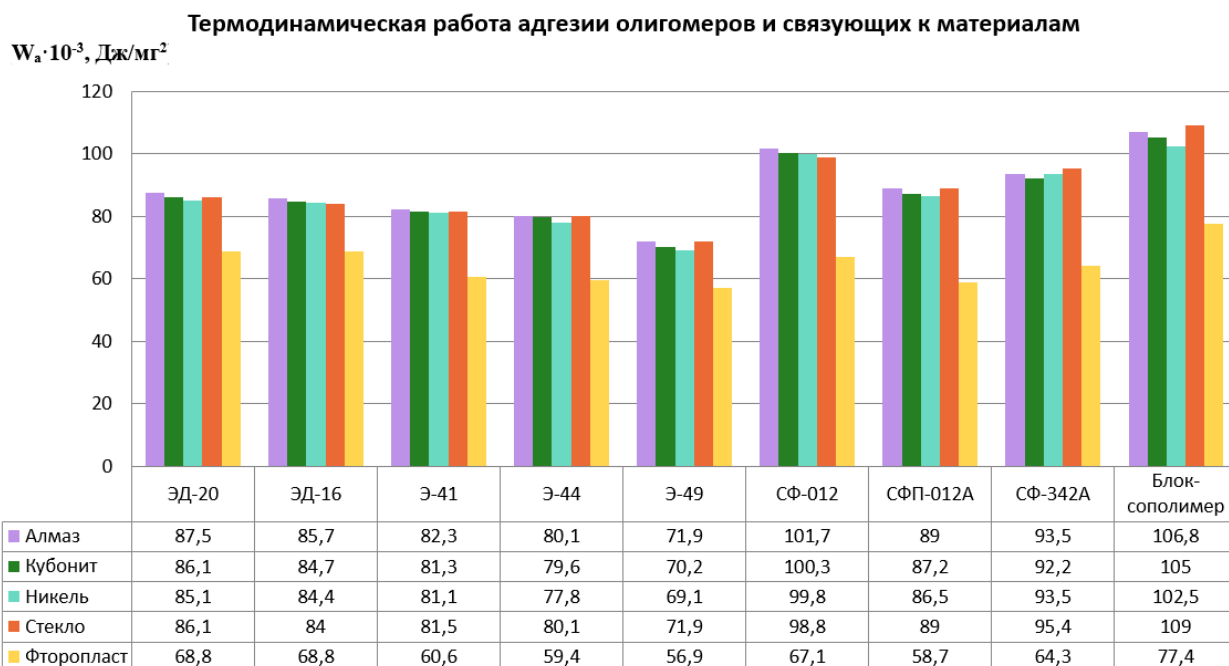


Рисунок 1.9 – Термодинамическая работа адгезии ( $W_a \cdot 10^{-3}, \text{ Дж/мг}^2$ ) олигомеров и связующих к материалам [93]

Наиболее ответственными этапами производства инструмента на полимерных связках (см. рис. 1.4) являются операции горячего прессования, осуществляемого на гидропрессах с подогревными плитами, и термической обработки. Это связано с тем, что на этих операциях формируются структура и свойства алмазосодержащего композиционного материала. Химический состав композиционного материала и технологические свойства связующего определяют давление прессования, температуру нагрева и время экзотермической выдержки. Например, инструмент на фенолформальдегидном связующем изготавливается при давлении прессования  $5000 \text{ Н/см}^2$  и температуре ( $^{\circ}\text{C}$ )  $180 \pm 10$  при выдержке в течение 20 мин.

В работе [103] методом температурно-временной суперпозиции проведено прогнозирование вязкоупругих и алмазоудерживающих свойств связующего Б8 при температурах и силах резания, имеющих место при эксплуатации инструмента. Показано, что по мере повышения температуры прочность удержания зерен уменьшается, особенно резко при температуре 470К, соответствующей температуре механического стеклования связующего.

Выше этой температуры проявляется подвижность сегментов полимерных цепей, ослабляются связи между макромолекулами фенольного связующего и поверхностью металлизированного алмаза. Дальнейший нагрев вследствие флуктуаций тепловой энергии способствует развитию высокоэластической деформации и разрушению связей, обеспечивающих прочность фиксации зерен. Таким образом показано, что термовязкоупругие свойства связующего практически определяют прочность удержания алмазов в матрице инструмента.

### **1.3 Повышения работоспособности инструмента нанесением покрытий на алмазные зёрна**

Как было отмечено выше, высокоэнергетическая поверхность алмаза имеет более высокую работу адгезии и лучшее смачивание к полимерным связующим, чем другие материалы, в том числе используемым в качестве покрытия на алмазы. Тем не менее, распространена практика нанесения на поверхность алмазных зёрен металлов (медь, никель, титан, вольфрам и др.) и их соединений, силикатных, органических и других материалов. Покрытия бывают однослойными, двухслойными и многослойными.

Покрытие на алмазы рассматривается как инструмент направленного формирования границ алмаз-покрытие и покрытие-матрица для увеличения работоспособности алмазно-абразивного инструмента путем повышения прочности алмазоудержания в матрице [28, 30, 60, 112].

Основными факторами, определяющими выбор материала и толщины покрытия, метода его нанесения на зёрна, являются качество алмазного сырья, состав и свойства компонентов матрицы, технология изготовления и условия эксплуатации инструмента [5, 112, 114, 121].

Анализ показал, что исследования и разработки покрытий на алмазы для кругов на полимерной матрице проводятся в основном экспериментально, для конкретных условий, а эффективность покрытий оценивается по удельному

расходу алмазов и другим интегральным показателям работоспособности инструмента, без раскрытия механизма влияния.

Экспериментальные исследования и практика эксплуатации инструментов на полимерных связующих показали, что лучшие результаты обеспечивают покрытия, соизмеримые с размерами алмазных зерен. Повышение работоспособности инструмента связывают, прежде всего, с увеличением прочности зерен за счет металлической оболочки покрытия и «залечивания» поверхностных дефектов на зернах материалом покрытия. Кроме того, отмечается, что, возникающее в процессе изготовления инструмента механическое защемление зёрен в матрице из-за различия их коэффициентов теплового расширения, усиливается развитостью микрогеометрии поверхности покрытия отдельных зёрен и алмазных агрегатов из нескольких зёрен, спаянных покрытием между собой [28, 82, 93].

Относительно роли покрытий в тепловых процессах, указывается что металлические покрытия увеличивают теплопроводность алмазоносной части инструмента и тем самым снижают её нагрев за счет лучшего отвода тепла. Однако, авторы не учитывают, что при этом возрастает доля тепла, уходящего в инструмент. Также высказывается предположение, что покрытия, теплопроводность которых значительно ниже теплопроводности алмаза, уменьшают воздействие тепловых потоков на связующее. Таким образом, к настоящему времени не выработаны системные представления о механизме влияния покрытий на тепловые процессы [29, 43].

В работе [28] приводятся результаты испытаний алмазных кругов на полимерном связующем с неметаллизированными (в исходном состоянии) и металлизированными никелем зёрнами при торцовом шлифовании кругами формы АЧК твёрдых сплавов ВК8 и Т15К6 в зависимости от степени металлизации, марки, зернистости и концентрации алмазов в инструменте. Эффективность металлизации оценивалась по удельному расходу алмазов. Исследовались круги на связке В2-01, оснащенные алмазами марок АС2, АС4 и АС6 зернистостей 63/50, 80/63, 125/100, 160/125 и 200/160. Металлизацию

никелем осуществляли электрохимическим способом с применением ультразвука. Степень металлизации оценивалась в процентах к исходной массе алмазного порошка и изменялась от 20 до 200 мас.% при 100%-ной относительной концентрации алмазов в круге.

Установлено, что с увеличением степени металлизации алмазов для всех зернистостей расход алмазов уменьшается, достигает наименьшего значения в диапазоне 60-100 мас.%, а затем несколько повышается. При этом с уменьшением зернистости оптимальная степень металлизации больше: для зернистости 50/40 – 150 мас.%, 80/63 – 100 мас.%, 125/100 – 60 мас.%, 200/160 – 60 мас.%. При этом отмечено, что металлизация мелкозернистых порошков в большей степени повышает эффективность кругов, чем крупнозернистых. Как следует из рис. 1.10, расход алмазов уменьшается с увеличением степени металлизации, особенно до 60 мас.%. При дальнейшем увеличении степени металлизации до 200 мас.% расход алмазов изменяется незначительно.

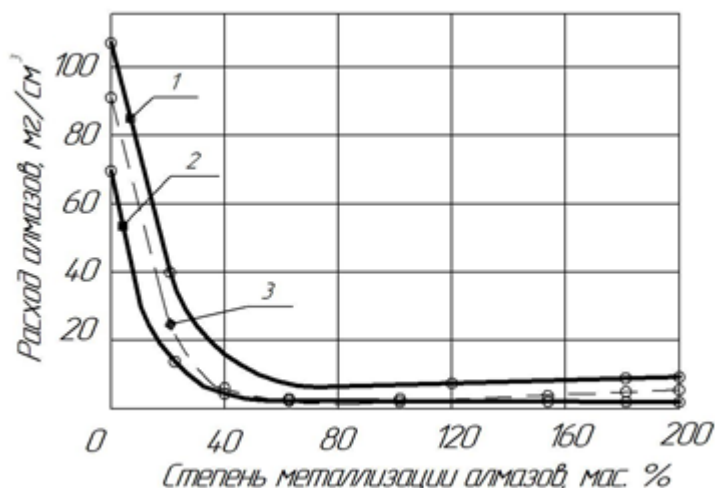


Рисунок 1.10 – Влияние металлизации на удельный расход алмазов марок АС2 (1), АС4 (2) и АС6 (3), металлизированных никелем (АЧК 125х5х3 – 125/100 – В2-01 – 100%, Т15К6, без охлаждения,  $v_k=15$  м/с,  $s_{пр}=2$  м/мин,  $s_{поп}=0,03$  мм/дв. ход)

Эксперименты также показали, что с увеличением прочности алмазов оптимальная толщина покрытия по абсолютной величине увеличивается. Так, для кругов на связке В2-01 оптимальная степень металлизации алмазов марок

АС2, АС4 и АС6 находится соответственно в пределах 40-60, 80-100 и 100 мас. %.

Известно, что относительная концентрация алмазов в круге в значительной степени определяет его режущую способность, производительность и качество обработанной поверхности [82]. Эксперименты при обработке твердых сплавов ВК8 и Т15К6 кругами на основе неметаллизированных алмазов марки АС4 зернистости 125/100 показали, что увеличение относительной концентрации алмазов от 50 до 200% приводит к снижению удельного расхода алмазов в 1,5 раза. При обработке кругами на основе аналогичных алмазов с никелевым покрытием показано, что существенное уменьшение расхода алмазов имеет место при увеличении относительной концентрации алмазов от 50 до 100%, а при увеличении от 100 до 150% расход алмазов практически остается постоянным (рис. 1.11). Отсюда делается вывод, 100%-ная концентрация является оптимальным содержанием металлизированных алмазов при котором достигается максимальная износостойкость кругов [28].

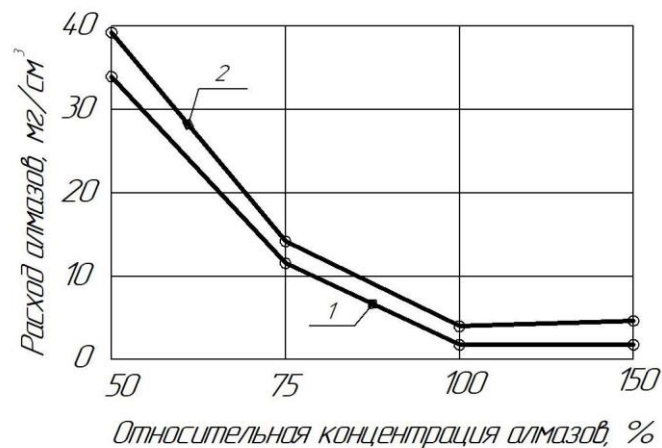


Рисунок 1.11 – Влияние относительной концентрации алмазов на удельный расход алмазов при обработке твердых сплавов марок: 1 – ВК8; 2 – Т15К6 (АЧК 125x10x3 – АС4 - 125/100М – В2-01 – 100%, Т15К6, без охлаждения,  $v_k=15$  м/с,  $s_{пр,к}=2$  м/мин,  $s_{поп,к}=0,05$  мм/дв. ход)

Контактные взаимодействия на границе покрытия и матрицы при температурно-временных режимах изготовления алмазно-абразивного инструмента существенно влияют на прочность удержания алмазов в матрице. В работе [24] изучалось взаимодействие никелевого покрытия алмазных зёрен с фенолформальдегидной смолой новолачного типа. Установлено, что на границе покрытия и полимерного связующего возникают более прочные связи, чем на границе алмаза и полимерного связующего. Авторы считают, что это происходит в результате адсорбции гидроксильных групп на поверхности и взаимодействия их с атомами металла, его оксидами и гидроксидами с образованием ионно-дипольных или водородных связей.

Технико-экономическую эффективность инструментов на основе металлизированных алмазов связывают с возможностью существенного сокращения расхода алмазов, повышения производительности и качества обработки деталей и инструментов. Технологии нанесения покрытий на алмазы, как правило, являются модульными и легко встраиваются в существующие технологические процессы изготовления инструмента (см. рис. 1.4). При этом применение алмазов с покрытием увеличивает себестоимость несущественно.

#### **1.4 Тепловой режим алмазного шлифования**

Тепловыделения в процессе резания в значительной степени определяют технико-экономические показатели абразивной обработки. Этим и определяется большое количество научных публикаций по теплофизике шлифования. Значительный вклад в исследования тепловых явлений при шлифовании внесли: Маслов Е.Н., Маталин А.А., Попов С.А., Резников А.Н., Силин С.С., Старков В.К., Худобин Л.В., Ящерицын П.И., Малкин С. и др.

При этом основное внимание уделяется изучению тепловых процессов в обрабатываемой детали для решения проблем обеспечения её качества. Тепловые процессы в шлифовальных кругах изучены существенно меньше,



несмотря на то, что при алмазном шлифовании основная часть тепла, выделяемого при резании, уходит в круг и, соответственно, тепловые процессы существенно влияют на работоспособность инструмента.

Известно, что практически вся механическая мощность шлифования преобразуется в тепловую энергию, а в энергию изменения кристаллической решетки обрабатываемого материала переходят только доли процента.

При обычном шлифовании (все виды шлифования, за исключением обработки кругами на основе алмазов и других сверхтвёрдых материалов), в связи с тем, что основная часть выделяемого уходит в обрабатываемую деталь, значительное внимание уделяется изучению тепловых процессов в детали для решения проблем обеспечения её качества. При алмазном шлифовании доля тепла, уходящего в круг может достигать 80% и, соответственно, актуальны и задачи исследования тепловых процессов в инструменте, существенно влияющие на его работоспособность [28, 82, 87, 112].

При шлифовании рассматривают следующие основные виды температур: 1) мгновенная, самая высокая и кратковременная, возникающая в зоне микрорезания шлифующим единичным зерном; 2) контактная, возникающая в зоне контакта круга с обрабатываемой заготовкой (определяется как средняя по высоте круга); 3) температура в детали и в инструменте [1, 51, 82, 112].

По данным научно-технической литературы, при обычном шлифовании распределение тепла находится в следующих пределах (%): в деталь 45 – 80, в инструмент 10 – 25, в стружку 5 – 15, в охлаждающую жидкость 5 – 20. Данные о средней температуре на поверхности детали изменяется в примерном диапазоне 20-350°C, контактная - 200-1100°C, мгновенная - от 1000°C до температуры плавления обрабатываемого материала [1, 42, 51, 70, 82, 88, 101].

При шлифовании алмазными кругами указанные температуры ниже из-за более низкого коэффициента трения алмаза и обрабатываемого материала, сравнительно небольшого объёма срезаемого слоя и меньшей степени деформации обрабатываемого материала; более высокой теплопроводности

алмазного зерна.

Отмечается, что шлифование, по сравнению с обработкой лезвийным инструментом, имеет две главные особенности. Первая особенность связана с тем, что зёрна поверхности абразивного инструмента расположены стохастически. В месте срезания стружки каждым зерном выделяется теплота и на поверхности контакта круга и детали возникают локальные источники тепла. В связи со случайным размещением зёрен, расположение этих источников непрерывно меняется во времени. Это, а также самозатачивание инструмента, содействуют выравниванию температур в зоне контакта. Рассмотренная особенность шлифования является основанием для описания локальных тепловых процессов единичным зерном с осреднёнными размерами и условиями работы [87].

Вторая особенность шлифования состоит в том, что каждое зерно в процессе работы срезает металл, предварительно нагретый в результате резания предыдущими зёрнами, а также трения связки круга и материала заготовки. Поэтому средняя температура на поверхности контакта инструмента с заготовкой складывается из двух составляющих. Первая - среднее по поверхности контакта повышение температуры вследствие предварительного нагрева, вторая – определяемая локальной температурой при резании одним зерном.

Как было отмечено выше локальные температуры могут достигать высоких значений. Тем не менее их вклад в среднюю температуру на поверхности контакта существенно меньше, чем предварительный нагрев. Исходя из этого при оценке термостойкости связующего или тепловых деформаций заготовки расчет проводится по температурам в контакте вследствие предварительного нагрева.

Локальные температуры влияют на изнашивание зёрен и прочность их удержания в матрице. Они часто ограничивают режимы резания, так как могут вызвать структурные изменения и прижоги в заготовке. Поэтому локальные температуры учитывают при выборе режимов резания и при оценке затрат,

связанных эксплуатацией инструментов. Значения мгновенной температуры сложно установить и теоретически и экспериментальным путем [87].

В работе [82] приведены результаты экспериментального определения коэффициентов распределения тепловых потоков между деталью и алмазным шлифовальным кругом. Исследования были проведены калориметрическим методом на плоскошлифовальном станке при обработке без СОЖ твёрдых сплавов ВК8 и Т15К6 периферией алмазных кругов с разными характеристиками. Эксперименты показали, что коэффициент теплового потока в деталь при изменении режимов шлифования в широких пределах оказался довольно стабильным и находился в пределах 0,28-0,33. Средние значения коэффициента теплового потока в алмазный круг при варьировании скорости шлифования и концентрации алмазов находились в диапазоне 0,63 – 0,73.

Исследовано влияние интенсивности съёма материала (производительности шлифования) на тепловой режим обработки. Эксперименты проводились при плоском шлифовании твердого сплава Т15К6 кругом прямого профиля АС2 100/80 100% на связке В2-01. Интенсивность съёма материала варьировалась изменением глубины шлифования и продольной подачи детали. Как видно из рис. 1.12а, установлена линейная зависимость между производительностью шлифования  $Q_m$  и мощностью теплового потока в деталь  $q_d$  при изменении подачи в пределах от 1 до 22 м/мин. Анализ результатов измерения температуры поверхности детали, приведенных на рис. 1.12б, показывает, что при заданной максимальной температуре можно увеличить интенсивность съёма материала (производительность) увеличением подачи и уменьшением глубины шлифования. Например, при фиксированной максимальной температуре поверхности 400°С можно увеличить скорость съёма с 300 до 700 мм<sup>3</sup>/мин, если увеличить подачу с 1 до 13 мм/мин и уменьшить глубину шлифования с 50 до 9 мкм [82].

В таблице 1.5 приведены результаты измерения температуры поверхности детали в зоне шлифования при обработке образцов из твердых сплавов Т15К6 и ВК8 при варьировании продольной подачи и глубины резания. Обработка осуществлялась на плоскошлифовальном станке кругом прямого профиля АС2 80/63 на связке В2-01 при скорости резания 28 м/с без СОЖ.

Из табл. 1.5 видно, что увеличение продольной подачи и глубины резания вызывает рост контактных температур, что связывается с увеличением интенсивности тепловыделения. Аналогичные исследования при шлифовании со струйным охлаждением показали, что указанная выше закономерность сохраняется, а температура поверхности в зоне шлифования снижается более существенно (до 50%) при малых режимах обработки. С повышением режимов обработки влияние СОЖ уменьшается (до 7%).

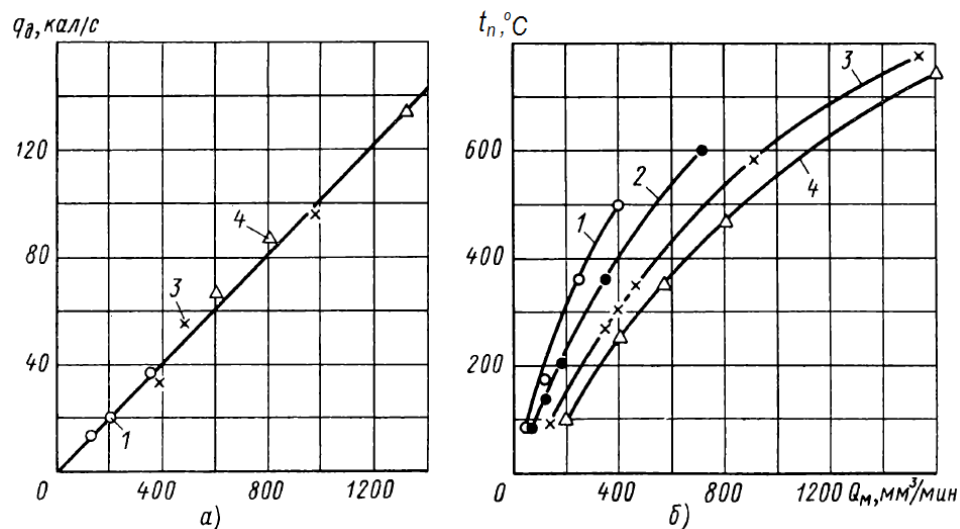


Рисунок 1.12 - Влияние интенсивности съема твердого сплава Т15К6 на тепловой поток в деталь (а) и температуру поверхности (б) при шлифовании с разными продольными подачами:  
1 - 1 м/мин; 2 - 3 м/мин; 3 - 8 м/мин; 4 - 13 м/мин [82]

Таблица 1.5 - Температура поверхности детали в зоне шлифования, °С

Продольная подача, м/мин	Глубина шлифования, мм							
	0,007	0,01	0,02	0,04	0,007	0,01	0,02	0,04
	Твердый сплав Т15К6				Твердый сплав ВК8			
1	-	93	159	357	-	66	120	250
3	145	198	357	600	86	132	250	460
8	240	330	570	830	170	230	410	715
13	345	450	750	-	250	330	560	850
22	500	-	-	-	384	-	-	-

Экспериментальные исследования показали, что с увеличением скорости резания количество тепла, уходящего в инструмент, возрастает. Увеличение скорости приводит к снижению толщины срезаемого слоя. При этом увеличивается число тепловых импульсов, но сокращается время их действия. Но в итоге, температура с ростом скорости шлифования растёт.

Также исследовано влияние концентрации алмазов и зернистости на температуру шлифования. С увеличением концентрации алмазов в круге температура снижается, так как возрастает число зерен, участвующих в удалении припуска, и доля отвода тепла в круг из-за повышения теплопроводности алмазоносного слоя.

### **1.5 Исследования температур, напряжений и деформаций в системе «алмаз-матрица»**

Наиболее целесообразным методом исследования системы «алмаз-матрица», процессы в которой в значительной степени определяют прочность удержания зёрен в инструменте, является численное моделирование. Это связано со сложностью экспериментальных методов исследования вследствие недоступности зоны резания и малых размеров зерен и аналитических математических моделей из-за неопределённости формы алмазов и

неоднородности свойств матрицы [54, 75, 96].

Исследованиям температур, напряжений и деформаций в системе «алмазное зерно-матрица» посвящены работы Александрова В.А., Воронина Г.А., Журавлева В.В., Кардановой М.Р., Куц В.И., Лавриненко В.И., Мечник В.А., Олейникова А.Б., Петасюк О.У., Чалого В.Т., Чистякова Е.М., Шило А.Е., Яхутлова М.М. и др.

В работе [132] показано, что даже для относительных концентраций алмазов 125–150% поля напряжений около зёрен перекрываются незначительно. Поэтому практически все расчетные схемы для исследований представляются в виде помещенного в матрицу единичного зерна. Формы алмазного зерна при схематизации системы «зерно-матрица» отличаются большим разнообразием: шар [68 и др.]; конус [37]; куб, цилиндр [69]; эллипсоид вращения [1, 62, 77, 112, 113]. В работе [45] проведен анализ степени приближения экспериментальных данных по формам алмазных зерен к различным моделям и показано, что эллипсоид вращения является наиболее близкой к реальной форме зерна. Авторами так же отмечено, что форма алмазного зерна зависит от зернистости и прочности порошка.

Для исследования напряжений и деформаций в системе «алмазное зерно-матрица» при статических силовых воздействиях используются натурные модели на основе фотоупругости или теоретические модели.

В работе [106] поляризационно-оптическим методом исследованы напряжения в системе «зерно-покрытие-матрица» шлифовального инструмента. Для этого использовалась построенная в принципах геометрического и силового подобий плоской модель. При этом покрытие в модели было в виде оболочки, охватывающей выступающую (свободную) часть зерна, а между зерном и матрицей покрытия не было. Авторами получена картина напряжений в конструкции при различных глубинах погружения зерна в матрицу и направлениях нагрузки.

В работах [42, 62, 68, 77, 112, 113, 129, 130] представлены результаты исследований системы «зерно-матрица» при силовых воздействиях с использованием расчетных моделей.

В работе [62] исследованы напряжения в системе «алмазное зерно – матрица» с использованием метода конечных элементов. Проведен анализ зависимости эквивалентных напряжений: от величины выступа алмазного зерна; от угла наклона оси зерна; от коэффициента абразивного резания. Распределение эквивалентных напряжений в матрице, в зависимости от силы резания, представлено на рис 1.13.

Расчетному определению температур и температурных напряжений в алмазных инструментах посвящены работы [2, 3, 6, 18, 32, 33, 34, 47, 56, 67, 85, 96, 103, 106, 109, 112, 119, 123, 127 и др.].

В процессе резания тепловые потоки через объем алмазного зерна воздействуют на связующее, прилегающее к поверхности кристалла, что приводит к деструкции связующего и резкому падению прочности алмазоудержания в матрице инструмента [29, 93].

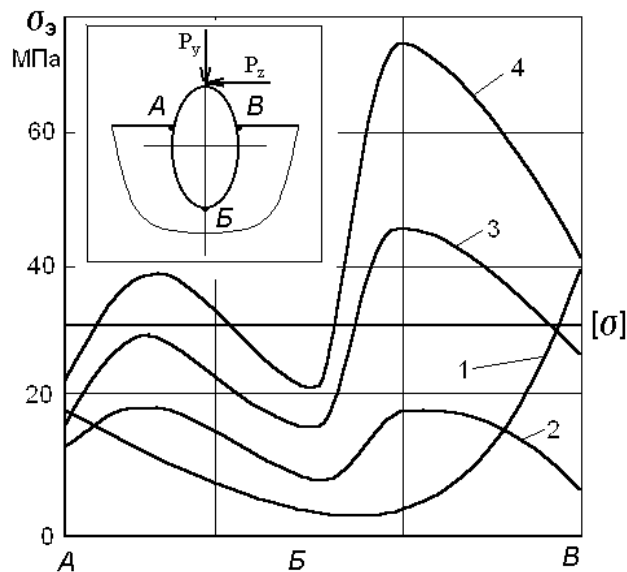


Рисунок 1.13 – Картина изменения эквивалентных напряжений в приконтактной с зерном зоне А-Б-В матрицы при  $P_z = \text{const}$  и отношении  $P_z/P_y$ , равном: 1,400 (1), 0,500 (2), 0,233 (3) и 0,140 (4)

Температурные напряжения в правящем алмазном карандаше исследованы в работе [67] с использованием метода конечных элементов. Авторы априори приняли допущение, что в алмазном зерне эллипсоидной

формы максимальная температура имеет место в точке его контакта с кругом и уменьшается в глубину кристалла вдоль его большой оси по экспоненте. Исследования показали, что максимальные напряжения возникают в зерне на небольшой глубине от точки контакта. Авторы подчеркивают, что причиной образования и роста трещин в структуре алмаза является многократно возникающие значительные напряжения в процессе работы правящего карандаша.

В работе [6] с использованием метода конечных элементов исследуется модель в виде единичного алмазного зерна, закреплённого в матрице и выступающего над её поверхностью. Параметры тепловой нагрузки задаются с учетом изменения конвективной теплоотдачи в системе и теплового потока, в период, равный одному обороту алмазного шлифовального круга. По результатам решения нестационарной задачи теплопроводности делается вывод, что вне зависимости от формы зерна имеет место быстрое выравнивание температуры в зерне, которое связывается с высокой теплопроводностью алмаза. При этом уменьшение глубины заделки зерна приводит к снижению температуры. Показано, что использование матрицы с низкой теплопроводностью приводит к росту температур в зоне контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью и на границе алмазного зерна и матрицы.

В работе [112] с использованием двухмерной конечно-элементной модели проведены комплексные исследования температур и напряжений и деформаций в системе «алмаз-твёрдосплавная матрица». В расчетной схеме в виде зерна в форме эллипсоида вращения, погружённого в матрицу, между алмазом и матрицей был выделен переходный слой для моделирования покрытий (рис. 1.14). Показано, что тепловыделения при резании являются практически определяющими в напряжённо-деформированном состоянии системы.



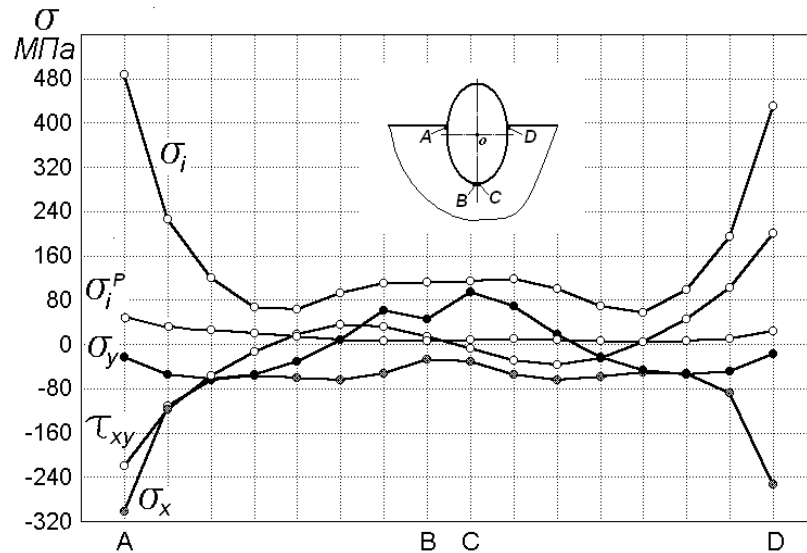


Рисунок 1.14 - Распределение напряжений в зоне контакта зерна и матрицы от сил и температур резания ( $\sigma_i^P$  - интенсивность напряжений при силовом воздействии)

В работе [47] проведено численное моделирование температур в системе «алмаз-покрытие-полимерная матрица». Показано, что нанесение на алмаз металлических покрытий или покрытия из стекла приводит к значительному снижению максимальной температуры за цикл работы зерна в шлифовальном круге. Авторы приходят к выводу, что механизмы снижения температуры различны (рис. 1.15).

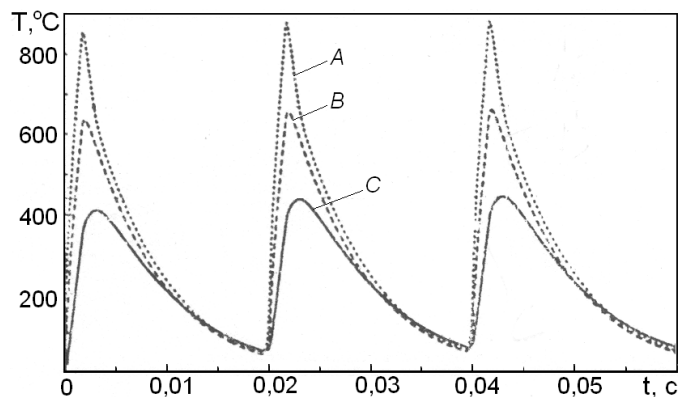


Рисунок 1.15 – Картина изменения температуры в зерне при резании в зоне контакта: А - зерно - обрабатываемая заготовка, В - зерно - покрытие из стекла и С - покрытие из стекла – полимерное связующее

Роль металлических покрытий сводится главным образом к тому, что увеличивают теплопроводность рабочей поверхности шлифовального круга, и

тем самым снижают значения температур в контакте «алмазное зерно-деталь». Покрытие из стекла действует как барьер для коротких тепловых импульсов. Представлены результаты исследования времени контакта и толщины покрытия на тепловой режим матрицы. Для расчета теплофизических свойств покрытий из стекла, авторами предлагаются аналитические зависимости.

В работе [113] разработано программно-алгоритмическое обеспечение для двумерного конечно-элементного моделирования и на ее основе проведены расчёты полей температур и напряжений в системе «алмаз-переходный слой-бакелитовая матрица». Отмечается, что на температурное поле в системе существенно влияет теплопроводность материала матрицы и практически не влияют теплопроводность покрытия и его толщина. Последнее утверждение противоречит практике использования алмазов с покрытием. Установлено, что также, как и в инструментах на твердосплавной матрице [112], напряжения от сил резания значительно меньше напряжений от тепловых воздействий (рис. 1.16).

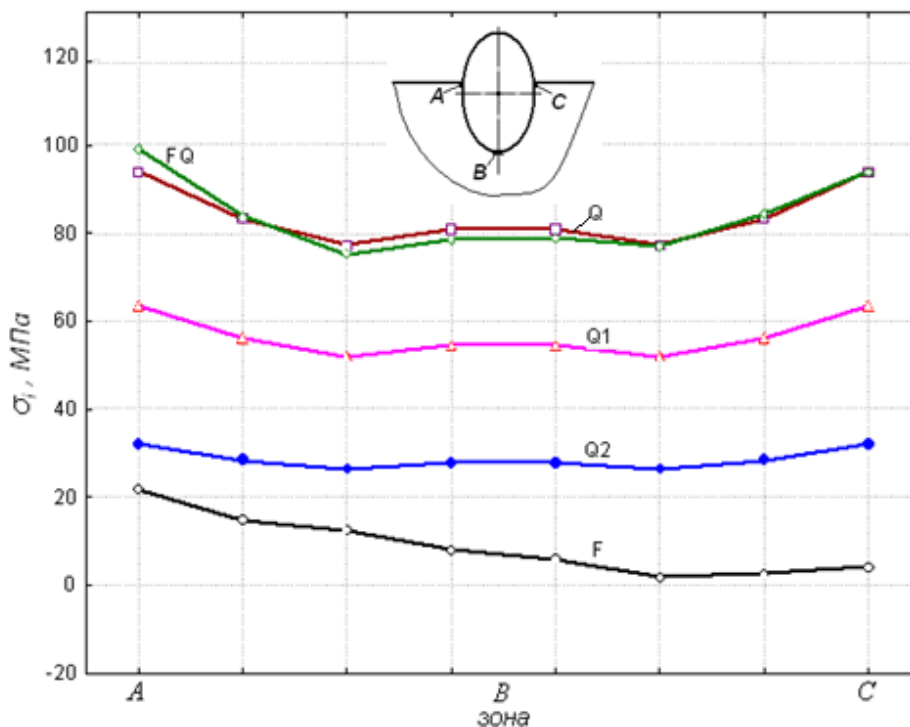


Рисунок 1.16 – Картина изменения интенсивности напряжений в покрытии при действии на систему нагрузки:  $F$  - силовой;  $Q$  - тепловой ( $Bm/m^2$ ) ( $Q = 3 \cdot 10^6$ ,  $Q1 = 2 \cdot 10^6$ ,  $Q2 = 10^6$ ),  $FQ$  - силовой и тепловой

Численное моделирование показало, что наибольшие температурные напряжения имеют место в переходном слое. Исследовано влияние на напряженное состояние указанной зоны коэффициентов теплопроводности и теплового расширения матрицы. Численные эксперименты показали, что нестационарное температурное поле в системе «алмаз-полимерная матрица» в основном определяется теплофизическими свойствами матрицы и конвективным теплоотводом в окружающую среду [113].

## 1.6 Выводы

1. Анализ показал, что тепловые возмущения от процесса резания существенно влияют на основные показатели работоспособности алмазных шлифовальных кругов на полимерной матрице. Это связано, прежде всего, со снижением прочности закрепления зерна в матрице инструмента вследствие тепловой деструкции связующего, отличающегося низкой теплостойкостью.

2. Наиболее эффективным методом исследования системы «алмаз-матрица» инструмента, процессы в которой в значительной степени определяют прочность алмазоудержания, является численное моделирование. Это связано со сложностью как аналитических моделей, так и экспериментальных исследований из-за малых размеров и неоднородности свойств объекта.

3. Известные результаты моделирования температур, напряжений и деформаций в системе «алмаз-полимерная матрица» получены на основе упрощенных моделей, результаты отдельных исследований не согласуются с экспериментальными данными.

4. Исследования и разработки покрытий на алмазы для кругов на полимерной матрице проводились в основном экспериментально для конкретных условий, а эффективность покрытий оценивалась по удельному расходу алмазов и другим интегральным показателям работоспособности инструмента, без раскрытия механизма влияния покрытия.

5. Экспериментально установлено, что для инструментов на полимерном связующем эффективны металлические, силикатные и некоторые другие покрытия на алмазные зерна, соизмеримые по толщине с их размерами.

6. Повышение работоспособности инструмента связывают с: увеличением прочности зерен за счет металлической оболочки покрытия и «залечивания» поверхностных дефектов на зернах материалом покрытия; усилением возникающего в процессе изготовления инструмента механического защемления зёрен в матрице за счет развитости микрогеометрии поверхности покрытия зёрен и алмазных агрегатов; снижением нагрева алмазоносной части инструмента за счет увеличения её теплопроводности при использовании металлических покрытий; уменьшением воздействия тепловых потоков на связующее при использовании покрытий, теплопроводность которых значительно ниже теплопроводности алмаза.

## **ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУР И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В СИСТЕМЕ «АЛМАЗНОЕ ЗЕРНО-ПОЛИМЕРНАЯ МАТРИЦА»**

Как было отмечено выше, прочность удержания зерна в матрице инструмента в значительной степени определяет работоспособность инструмента. Поэтому весьма актуально изучение тепловых процессов, напряжений и деформаций в системе «алмаз-матрица» при действии сил и температур от процесса резания. Недоступность зоны резания, малые размеры и неправильная форма зерен технических алмазов, а также неоднородность свойств матрицы не позволяют эффективно использовать экспериментальные методы исследования и аналитические математические модели. Поэтому для исследования системы «алмазное зерно-матрица» наиболее целесообразно численное моделирование.

### **2.1 Выбор и обоснование расчетной схемы**

Моделирование проводилось методом конечных элементов с использованием программного комплекса SolidWorks [4].

В численных экспериментах значения параметров исследуемой системы были приняты соответствующими условиям работы алмазных шлифовальных кругов на бакелитовом связующем. Силовая и тепловая нагрузки на систему задавались из условия соответствия усилия резания алмазным зерном и температур в системе известным экспериментальным данным [50, 64, 70, 82, 88, 101].

Результаты экспериментальных исследований синтетических и природных алмазных зерен различной зернистости, представленные в работе [45], показали, что эллипсоид вращения является наиболее приближенной к реальной форме зерна. Поэтому в качестве расчетной схемы принято единичное алмазное зерно эллипсоидной формы, помещенное в матрицу

(рис. 2.1). В расчетной схеме выделен переходный слой между алмазом и матрицей для моделирования покрытия на зерно.

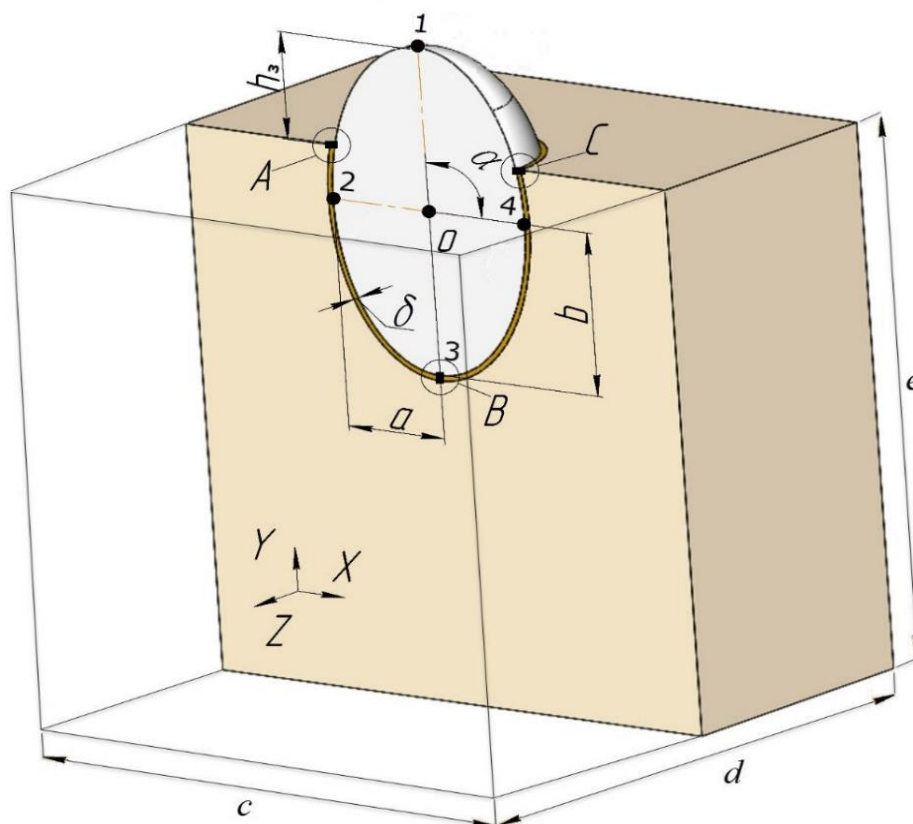


Рисунок 2.1 - Расчетная схема

Таким образом, рассматриваемая система состоит из трех элементов, изготовленных из изотропных материалов: алмазного зерна, покрытия матрицы. Отметим, что при использовании наполнителя матрица представляет собой композиционный материал, состоящий из полимерного связующего и наполнителя. При моделировании системы с алмазом без покрытия, свойства переходного слоя принимались одинаковыми со свойствами матрицы.

Расчетная схема определяется следующими параметрами:  $a$ ,  $b$  - полуоси алмаза;  $c$ ,  $d$ ,  $e$  - размеры матрицы;  $h_3$  - величина выступания алмаза из матрицы,  $\delta$  - толщина покрытия,  $\alpha$  - угол между вертикальной осью зерна и горизонтальной (свободной) плоскостью матрицы. Схема позволяет варьированием указанных параметров моделировать различные формы и размеры зерна, углы его наклона и разное погружение в матрицу (см. рис. 2.2).

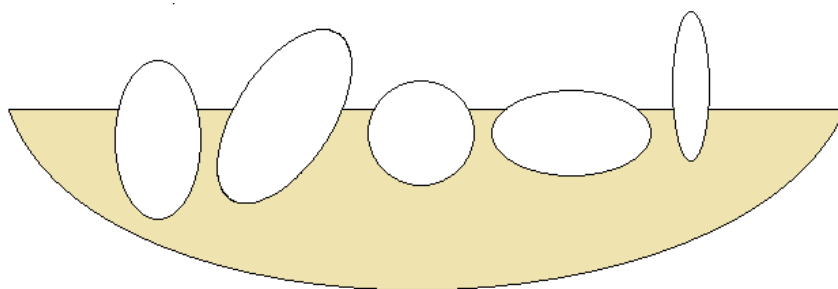


Рисунок 2.2 - Варианты расчетных схем

На рассчитываемую конструкцию в зоне контакта зерна с обрабатываемым материалом могут действовать силовые и тепловые факторы процесса резания: равнодействующая статической силы резания  $P$ , приложенная под углом  $\beta$  к вертикальной оси зерна и удельный тепловой поток  $q$  (см. табл. 2.1).

На этапе отработки методики численных экспериментов проводилось тестирование разработанной модели. В частности, оценивалась сходимость метода по температурам, напряжениям и перемещениям при различных значениях числа конечных элементов, проверялась точность получаемых результатов с учетом симметрии изучаемой системы, обеспечение условия суперпозиции напряжений и деформаций при действии силовых и температурных возмущений на конструкцию, а также проводилось сравнение результатов расчетов с известными решениями.

## 2.2 Моделирование температур в системе «алмаз-полимерная матрица»

Тепловая нагрузка на рассматриваемую систему определяется тепловыделением в зоне резания алмазным зерном и выражается удельным тепловым потоком  $q$ , приложенным к части поверхности зерна, непосредственно контактирующей с обрабатываемым материалом. Учитываются конвективные потери тепла в окружающую среду с коэффициентом теплоотдачи  $h$  на горизонтальной поверхности матрицы и свободной от теплового потока части поверхности зерна. Значения  $q$  и  $h$

определялись на основе известных экспериментальных данных о температурах при резании единичным алмазным зерном.

На рисунке 2.3 приведена расчетная схема системы «алмаз-матрица» при действии тепловых возмущений. Значение параметров модели и физические свойства элементов конструкции представлены в таблицах 2.1 и 2.2. Необходимо отметить значительное различие физических свойств алмаза и бакелита, принятого в качестве исходного связующего для моделирования матрицы. Например, модули упругости различаются в 225 раз, коэффициенты теплопроводности – в 814 раз, коэффициенты теплового расширения – в 67 раз.

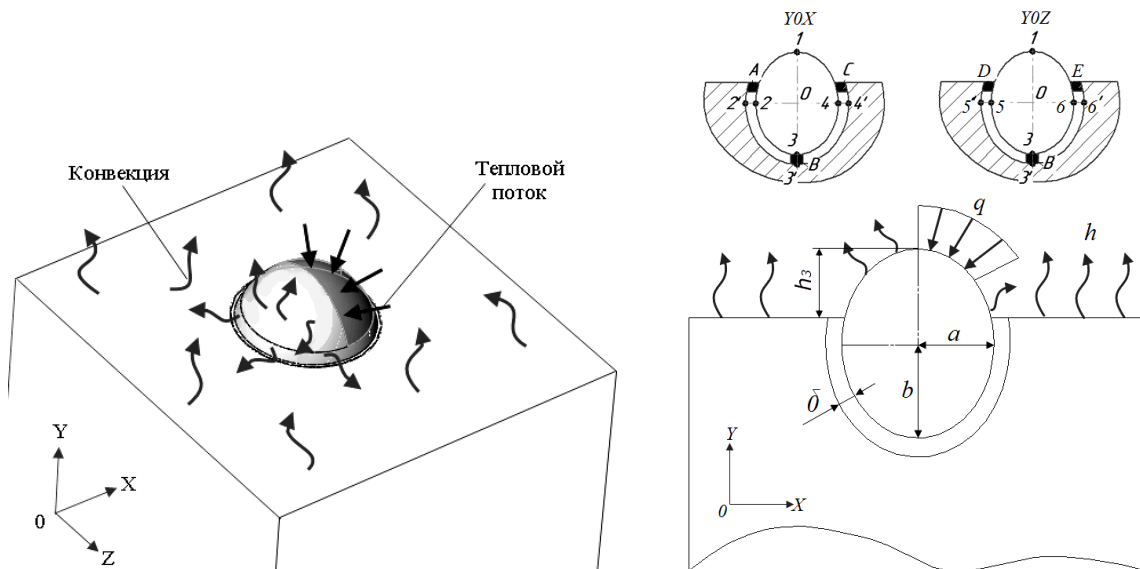


Рисунок 2.3 - Расчетная схема

Таблица 2.1 - Параметры расчетной модели

Геометрические							Силовые и тепловые			
$a$	$b$	$h_3$	$\delta$	$c$	$d$	$e$	$P, H$	$\beta, \text{град}$	$q, \frac{Вт}{м^2}$	$h, \frac{Вт}{м^2 \times \text{град}}$
0,20	0,25	0,15	0,01	2,00	2,00	2,00	10	30	$13 \times 10^6$	$5,0 \times 10^3$



Таблица 2.2 - Физические свойства элементов конструкции (при 20°C) [98, 99]

Материал	Плотность, $\rho_x, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Модуль упругости, $E, \text{ГПа}$	Коэфф. Пуассона $\nu$	Коэфф. теплопров., $\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$	Удельная теплоёмкость, $c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	Коэфф. теплового расширения, $\alpha_t \times 10^6, \text{град}^{-1}$
Алмаз	3520	900	0,072	146,5	502	1,05
Бакелит	1300	4	0,30	0,18	1600	70

Известно, что теплофизические свойства алмаза существенно зависят от температуры. В таблице 2.3 представлены данные о зависимостях коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости и коэффициента теплового расширения алмаза от температуры [93, 99].

Таблица 2.3 - Зависимость теплофизических свойств алмаза от температуры

Коэффициент теплопроводности, $\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$								
t, °C	0	100	300	500	800	1000	1500	
$\lambda$	146,5	96,2	50,2	33,5	29,3	25,1	20,9	
Удельная теплоемкость, $c, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$								
t, °C	20	75	175	275	425	525	725	925
$c$	0,502	0,706	1,003	1,237	1,493	1,617	1,794	1,884
Коэффициент теплового расширения, $\alpha_t \times 10^6, \frac{1}{\text{град}}$								
t, °C	25	125	225	325	525	925		
$\alpha_t$	1,05	1,79	2,70	3,17	3,81	4,93		

Расчет поля температур в конструкции велся на основе решения уравнения нелинейной стационарной теплопроводности в изотропной трехмерной среде [95]

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda(t) \frac{dt(x,y,z)}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left( \lambda(t) \frac{dt(x,y,z)}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left( \lambda(t) \frac{dt(x,y,z)}{dz} \right) = 0, \quad (2.1)$$

где  $t(x, y, z)$  - температура;  $\lambda(t)$  - коэффициент теплопроводности.

Уравнение (2.1) должно подчиняться следующим граничным условиям на поверхности зерна (см. расчетную схему).

1. На границе известна температура

$$t(x, y, z) = t_s(s),$$

где  $s$  - координаты точек границы.

2. На границе происходит конвективный теплообмен с коэффициентом теплоотдачи  $h$

$$\lambda(t) \left( \frac{dt(x,y,z)}{dx} l + \frac{dt(x,y,z)}{dy} m + \frac{dt(x,y,z)}{dz} n \right) + h[t(x, y, z) - t_\infty] = 0,$$

где  $t_\infty$  - температура окружающей среды;  $l, m, n$  - направляющие косинусы.

3. На границе действует источник с удельным тепловым потоком  $q$  ( $q$  считается положительным, если тепло теряется телом)

$$\lambda(t) \left( \frac{dt(x,y,z)}{dx} l + \frac{dt(x,y,z)}{dy} m + \frac{dt(x,y,z)}{dz} n \right) + q = 0.$$

4. Имеет место тепловая изоляция участка границы

$$\frac{dt(x,y,z)}{dx} l + \frac{dt(x,y,z)}{dy} m + \frac{dt(x,y,z)}{dz} n = 0.$$

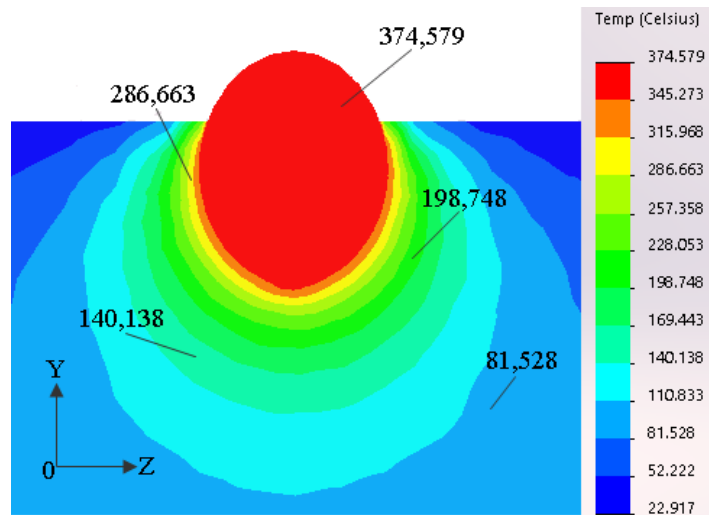
5. В узлах, расположенных на боковых и нижней гранях матрицы (см. рис. 2.1) избыточная температура равна нулю ( $t = 0$ ).

Моделирование стационарного температурного поля системы проводится решением уравнения теплопроводности (2.1) с соответствующими граничными условиями.

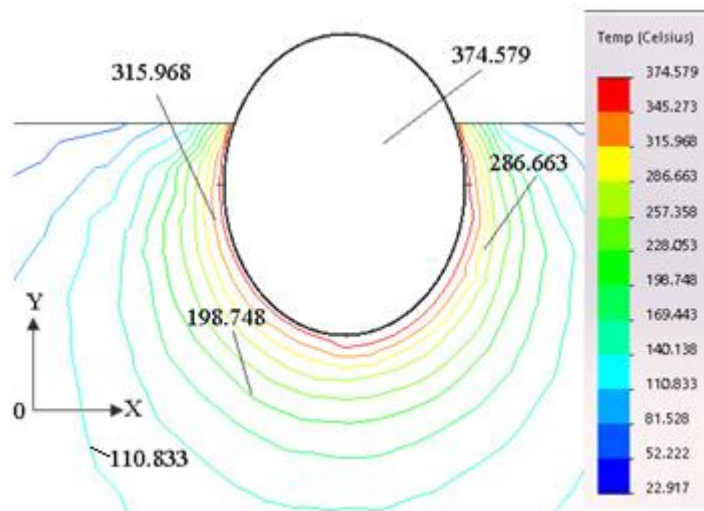
На первом этапе исследований проведены расчеты по уравнению (2.1) в линейной постановке (при постоянном значении коэффициента теплопроводности алмаза - см. табл. 2.2) и нелинейной постановке (с учетом

зависимости коэффициента теплопроводности от температуры – см. табл. 2.3).

На рисунке 2.4 представлены результаты расчетов температурного поля по линейной модели. В отличие от инструментов на металлической и твердосплавной матрицах [112], алмазное зерно прогревается практически равномерно, что связано с низкой теплопроводностью полимерной матрицы.



a)



б)

Рисунок 2.4 - Температурное поле в системе:  
 а) - в плоскости Y0Z; б) - в плоскости Y0X

Полученные по линейной и нелинейной модели распределения температуры в плоскости Y0X в сечениях по вертикальной и горизонтальной

оси зерна показаны на рис. 2.5 и 2.6, соответственно.

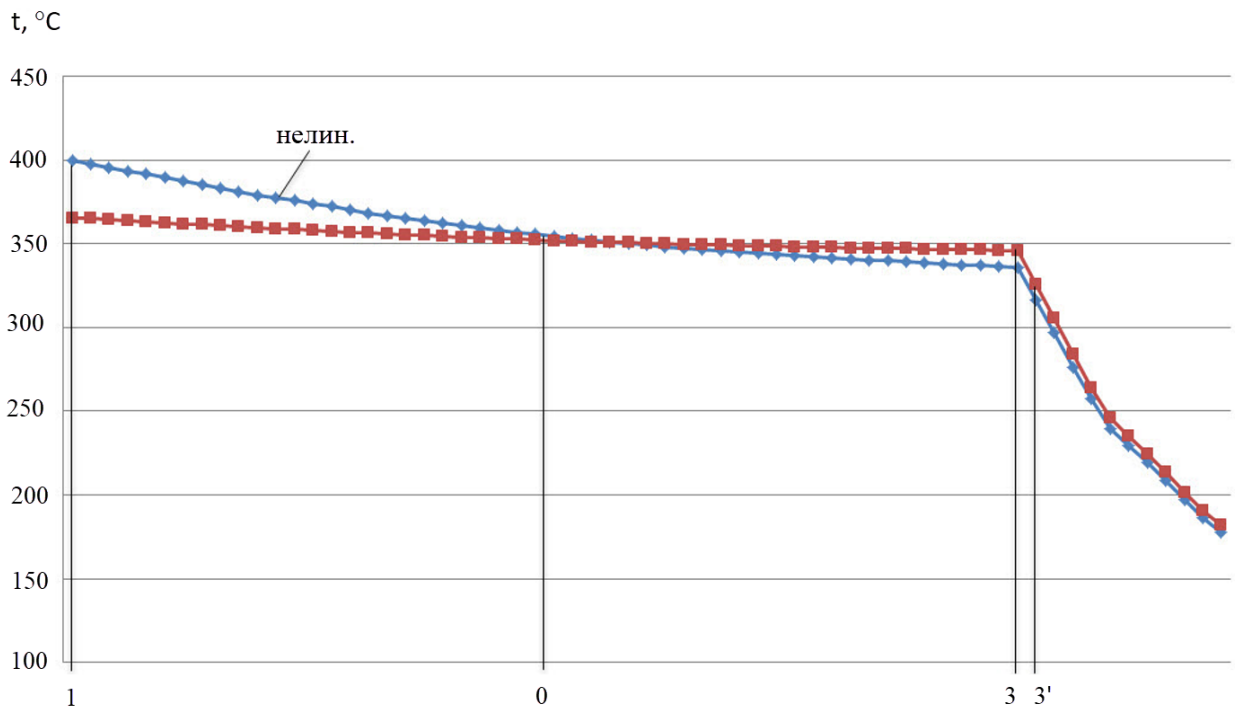


Рисунок 2.5 - Изменение температуры в сечении по вертикальной оси зерна для линейной и нелинейной моделей (плоскость YOX)

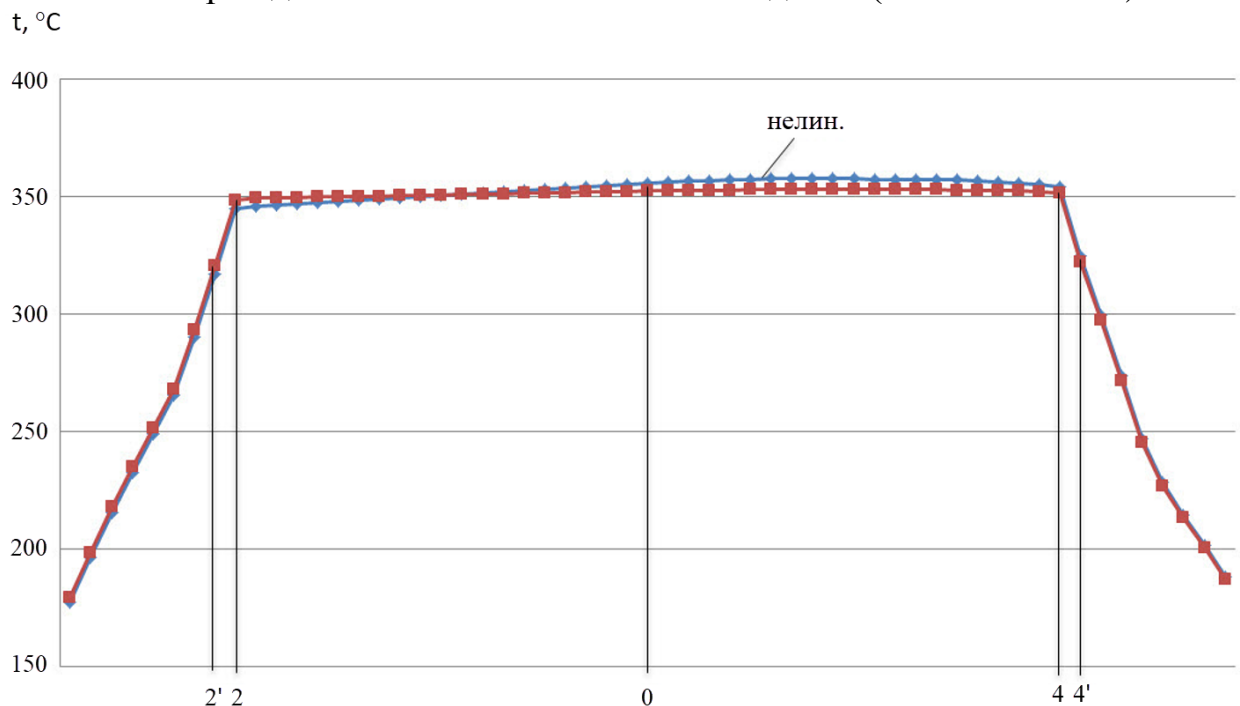


Рисунок 2.6 - Изменение температуры в сечении по горизонтальной оси зерна для линейной и нелинейной моделей (плоскость YOX)

Как видно из рисунков, наблюдается общая тенденция к снижению значений температуры в зерне по мере приближения к переходному слою, а в полимерной матрице происходит резкое снижение температуры. В

соответствии с расположением источника тепла (см. рис. 2.3) в плоскости  $Y0Z$  отмечена симметричная картина температур, а в плоскости  $Y0X$  - незначительное увеличение значений температур на отрезке 0 – 4 (см. рис. 2.1).

Аналогичные закономерности наблюдаются при исследовании распределения температур в переходном слое (см. рис. 2.7). Также имеет место резкое снижение температуры при приближении к охлаждаемой поверхности (к зонам А и С на рис. 2.1).

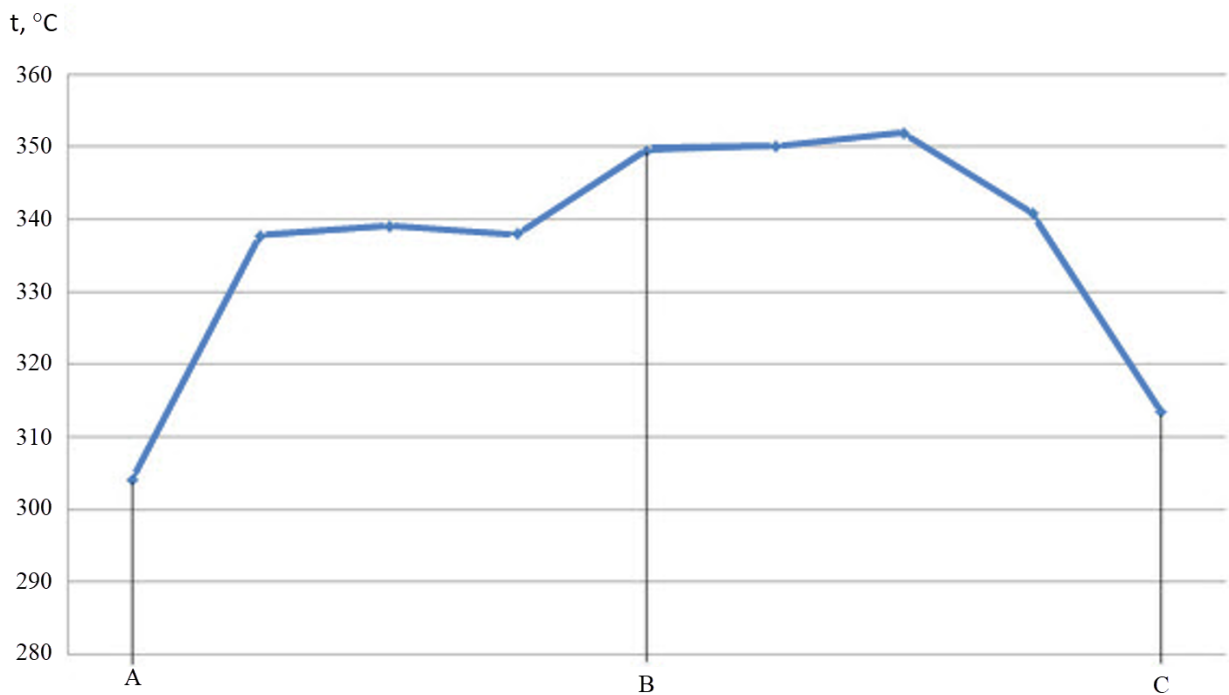


Рисунок 2.7 - Распределение температуры в переходном слое (плоскость  $Y0X$ )

Анализ результатов расчетов по линейной и нелинейной моделям, представленных на рис. 2.5 – 2.6, показал, что максимальные погрешности расчетов по линейной модели имеют место в алмазе и составляют не более 10-15%. В переходной зоне и в матрице температуры различаются не более чем на 5%. Исходя из этого, дальнейшие расчеты проводились решением задачи стационарной теплопроводности в линейной постановке.

Проведено моделирование температуры в системе в зависимости от теплопроводности матрицы. На рис. 2.8 - 2.10 представлены полученные закономерности изменения температуры в системе при значениях коэффициента теплопроводности ( $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$ ) 0,18; 0,5; 1,0; 2,0. Отметим,

что значение коэффициента теплопроводности  $\lambda = 0,18$  соответствует использованию бакелитового связующего.

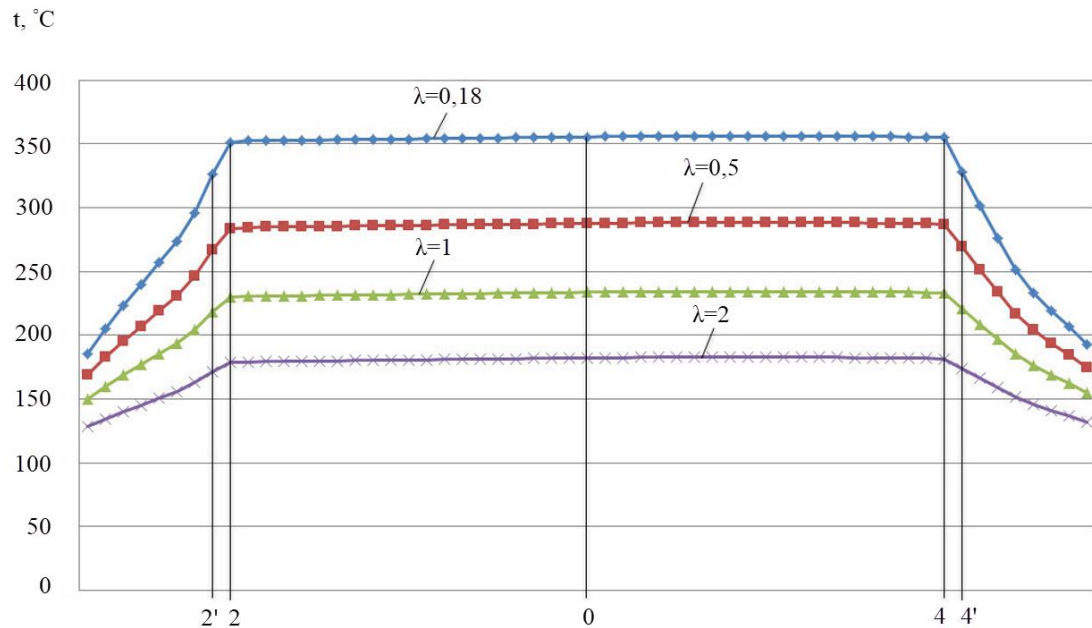


Рисунок 2.8 - Изменение температуры в сечении по горизонтальной оси зерна при различных значениях коэффициента теплопроводности матрицы (плоскость YOX)

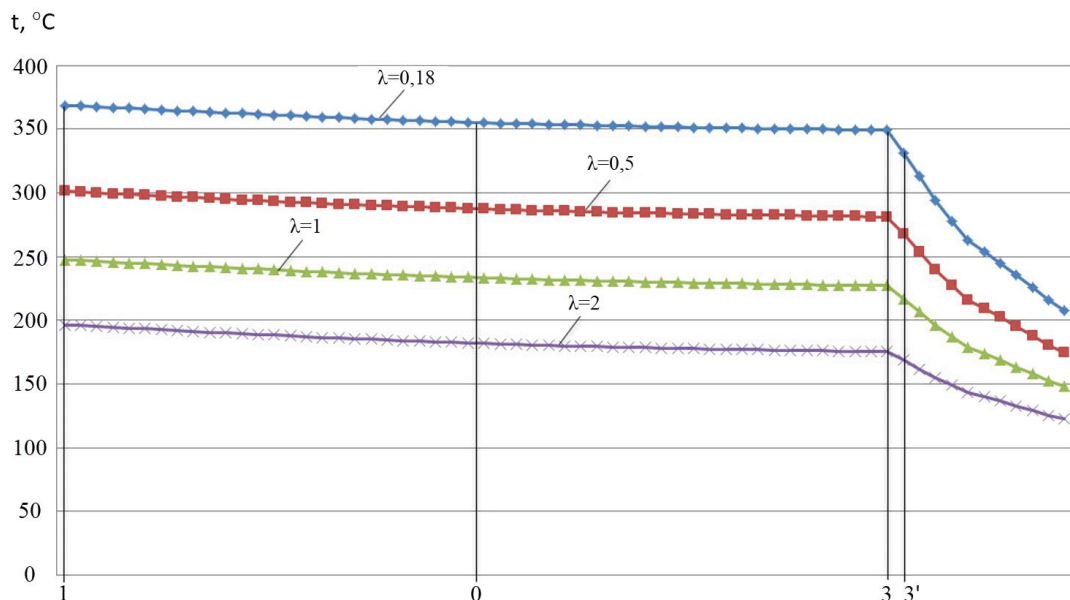


Рисунок 2.9 - Изменение температуры в сечении по вертикальной оси зерна при различных значениях коэффициента теплопроводности матрицы (плоскость YOX)

Результаты численных экспериментов показывают, что увеличение теплопроводности матрицы приводит к уменьшению температур в системе. Показано, что при всех значениях коэффициента теплопроводности, алмазное зерно прогревается практически равномерно. Средняя температура в алмазе составляет: при  $\lambda = 0,18$  (бакелит) -  $350^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda = 0,5$  -  $280^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda = 1,0$  -  $235^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda = 2,0$  -  $175^{\circ}\text{C}$ .

Отметим, что температура в приконтактном с зерном (переходном) слое матрицы (зоны А-В-С, D-В-Е на рис. 2.3) при заданном значении  $\lambda$  также изменяется незначительно – имеет место её незначительное уменьшение по мере приближения к охлаждаемой поверхности (рис. 2.10).

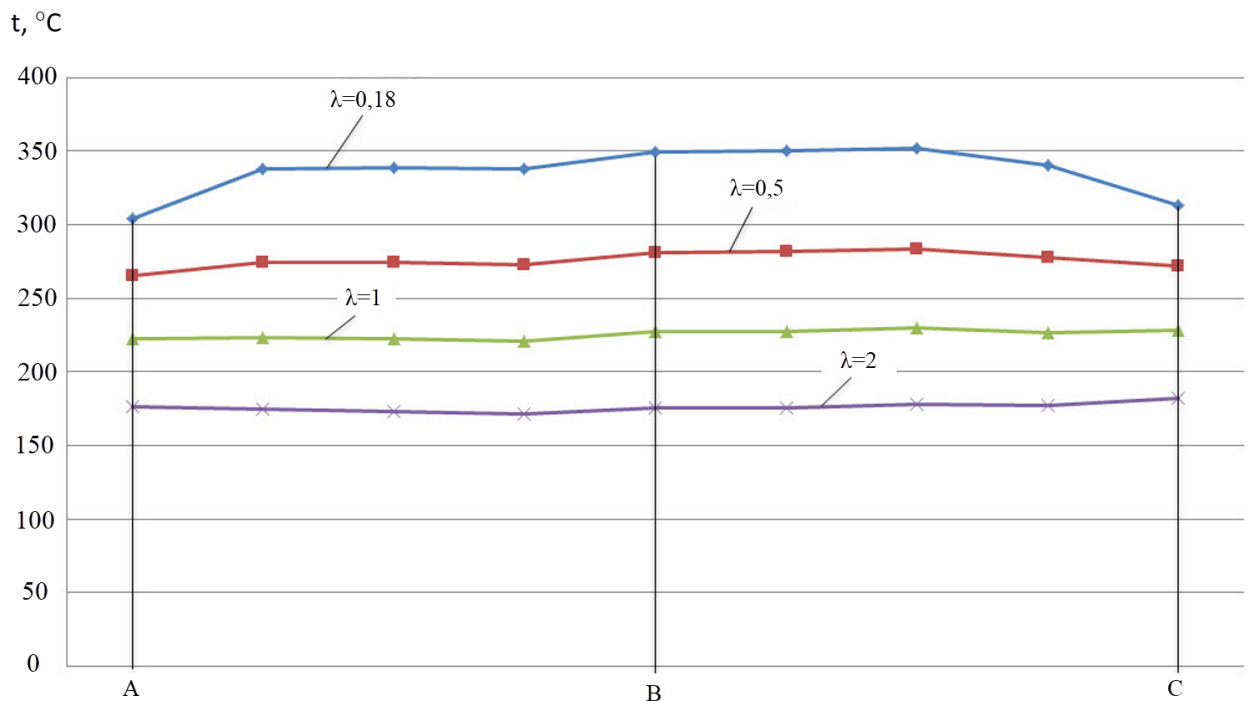


Рисунок 2.10 - Температура в приконтактном с зерном слое матрицы при различных значениях коэффициента теплопроводности матрицы (плоскость YOX)

### **2.3 Моделирование температур в системе «алмаз-покрытие-полимерная матрица»**

Как было отмечено выше, нанесение покрытий на поверхность алмазов является одним из эффективных способов повышения работоспособности инструмента и является инструментом направленного воздействия на систему «алмаз-матрица», в отличие, например, от изменения свойств матрицы по всему объему рабочей части инструмента, которое может привести к ухудшению некоторых из требуемых ее характеристик. При этом считается, что эффективность покрытия зависит, прежде всего, от характера влияния последнего на формирование межфазных границ в матрице инструмента [28, 30, 57, 93, 112, 60, 120, 121].

Основными факторами, учитываемыми при выборе материала покрытия и метода его нанесения, являются: качество алмазного сырья; состав и свойства матрицы и технология её изготовления; условия изготовления и эксплуатации инструмента. Как было отмечено в разделе 1, на алмазные зерна наносятся: металлы и их карбиды, оксиды и нитриды; различные сплавы; силикатные и органические материалы. Получают распространение композиционные покрытия, для использования наиболее ценных свойств каждого элемента композита.

Для инструментов на полимерных связующих экспериментально показано, что эффективная толщина покрытия соизмерима с размерами алмазных зерен [28, 82]. При этом считается, что покрытие создаёт более равновесную структуру околосрединной области, так как оно имеет более высокие чем матрица механические свойства. Необходимо также отметить, что для этих инструментов, в отличие от инструментов на керамической и металлической матрице, существует и проблема низкой теплостойкости полимера.

Проведены численные эксперименты по исследованию влияния покрытий на температурное поле в системе «алмаз-покрытие-полимерная



матрица». Параметры расчетной схемы и тепловая нагрузка на нее соответствовали табл. 2.1. В качестве материала покрытия рассматривались натрийборосиликатное стекло, никель, титан и медь (табл. 2.4), часто используемые на практике.

Таблица 2.4 - Физические свойства материалов покрытий [98]

Материал	Плотность, $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Модуль упругости, $E, \text{ГПа}$	Кoeff. Пуассона, $\nu$	Кoeff. теплопров., $\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$	Удельная теплоёмкость, $c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	Кoeff. теплового расширения, $\alpha_t \times 10^6, \text{град}^{-1}$
Стекло	2500	50	0,25	1,0	1000	5,0
Никель	8900	200	0,28	65	500	13,4
Титан	4500	116	0,32	15,1	528	8,7
Медь	8950	100	0,33	399	383	16,7

На рис. 2.11-2.13 представлены поля температур в системе при использовании различных покрытий, толщиной 0,1 мм. Отмечено, что при отсутствии покрытия и при всех использованных покрытиях зерно нагревается практически равномерно. Снижение температуры наблюдается в покрытии и в матрице. В случае применения металлических покрытий – никеля, меди и титана – равномерный нагрев распространяется и на слой покрытия, что связано с высокой теплопроводностью этих материалов (см. таблицу 2.4).

В данных условиях эксперимента в рассмотренных сечениях изучаемой системы (см. рис. 2.11 и 2.12) температура на границе контакта зерна и связующего (при отсутствии покрытия) составила  $\sim 350^\circ\text{C}$ . На границе покрытия из стекла и связующего температура увеличивается от охлаждаемой поверхности к зоне В (см. рис. 2.3) от 240 до  $260^\circ\text{C}$ . Для металлических покрытий температура на границе покрытия и связующего практически постоянна и равна  $\sim 270^\circ\text{C}$ .

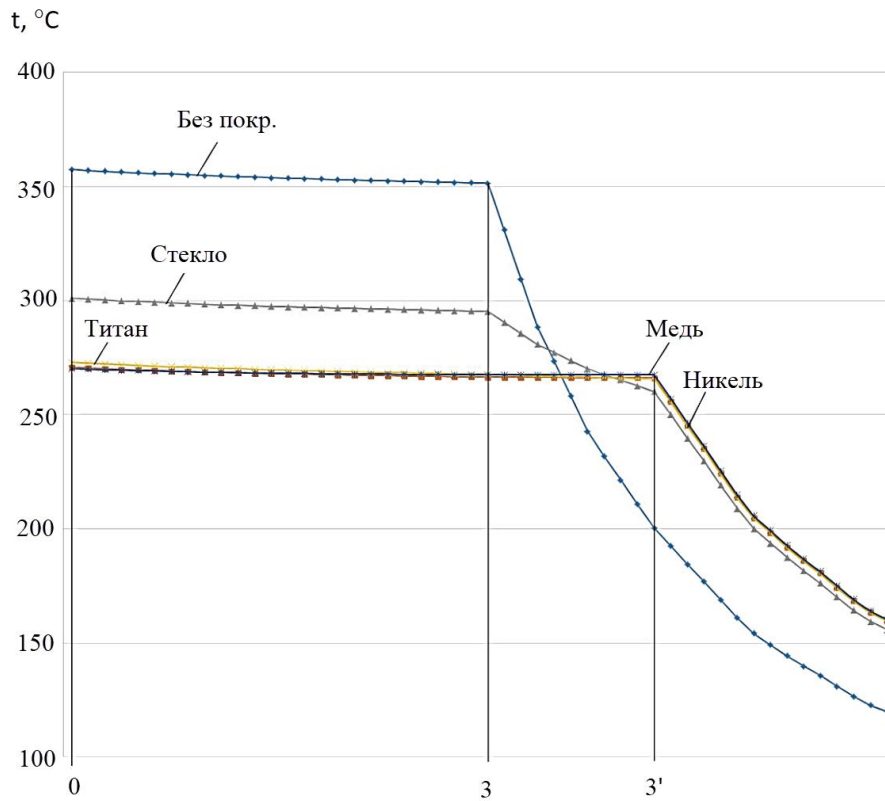


Рисунок 2.11 - Изменение температуры в сечении по вертикальной оси зерна с различными материалами покрытия (плоскость YOX)

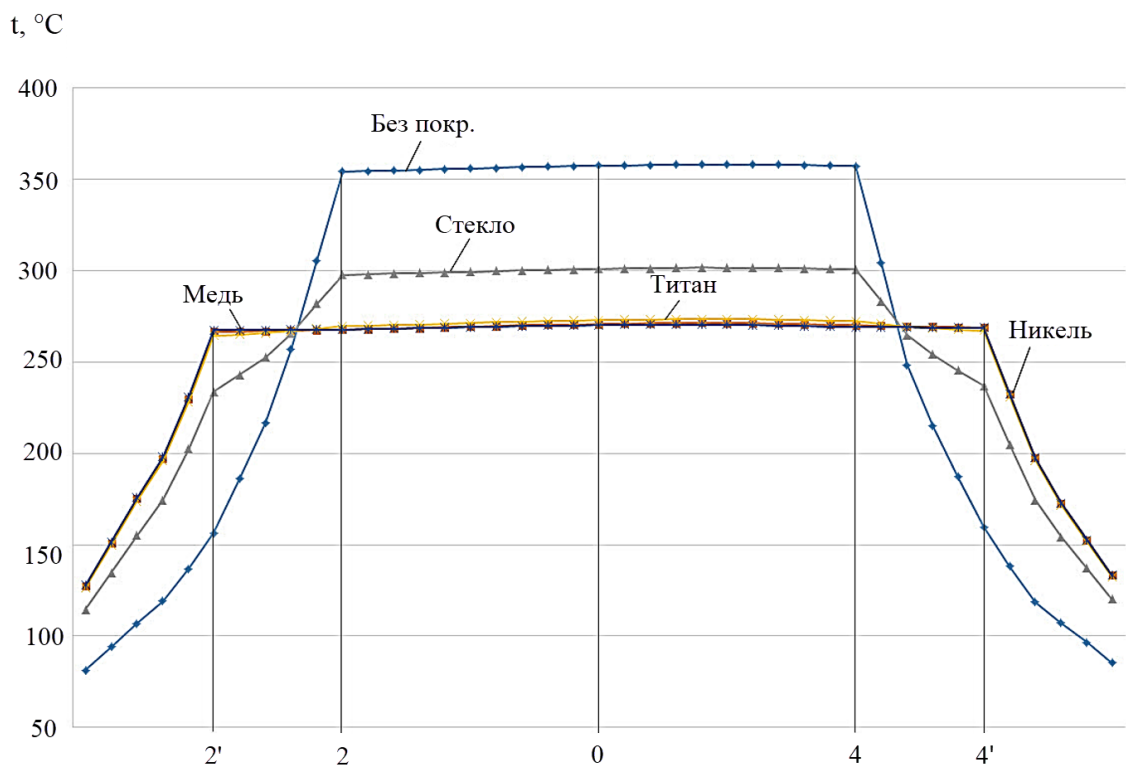


Рисунок 2.12 - Изменение температуры в сечении по горизонтальной оси зерна с различными материалами покрытия (плоскость YOX)

На рис. 2.13 показаны результаты расчетов для диапазона коэффициентов теплопроводности ( $Вт/(м \cdot град)$ ) покрытия  $0,1 \leq \lambda_{покр} \leq 399$ . Верхняя граница диапазона соответствует покрытию из меди. Отмечено, что при  $\lambda_{покр} \lesssim 4 Вт/(м \cdot град)$ , с увеличением коэффициента теплопроводности материала покрытия снижается температура в зерне, а градиент температуры в покрытии уменьшается. Таким образом, с увеличением теплопроводности материала покрытия увеличивается температура на границе покрытия и связующего. При  $\lambda_{покр} \gtrsim 4$ , температура в зерне не зависит от  $\lambda_{покр}$  и отсутствует падение температуры в покрытии. Таким образом, значение  $\lambda_{покр} \approx 4$  является пороговым, при превышении которого температура в системе, в том числе на границе раздела покрытия и матрицы практически не меняется.

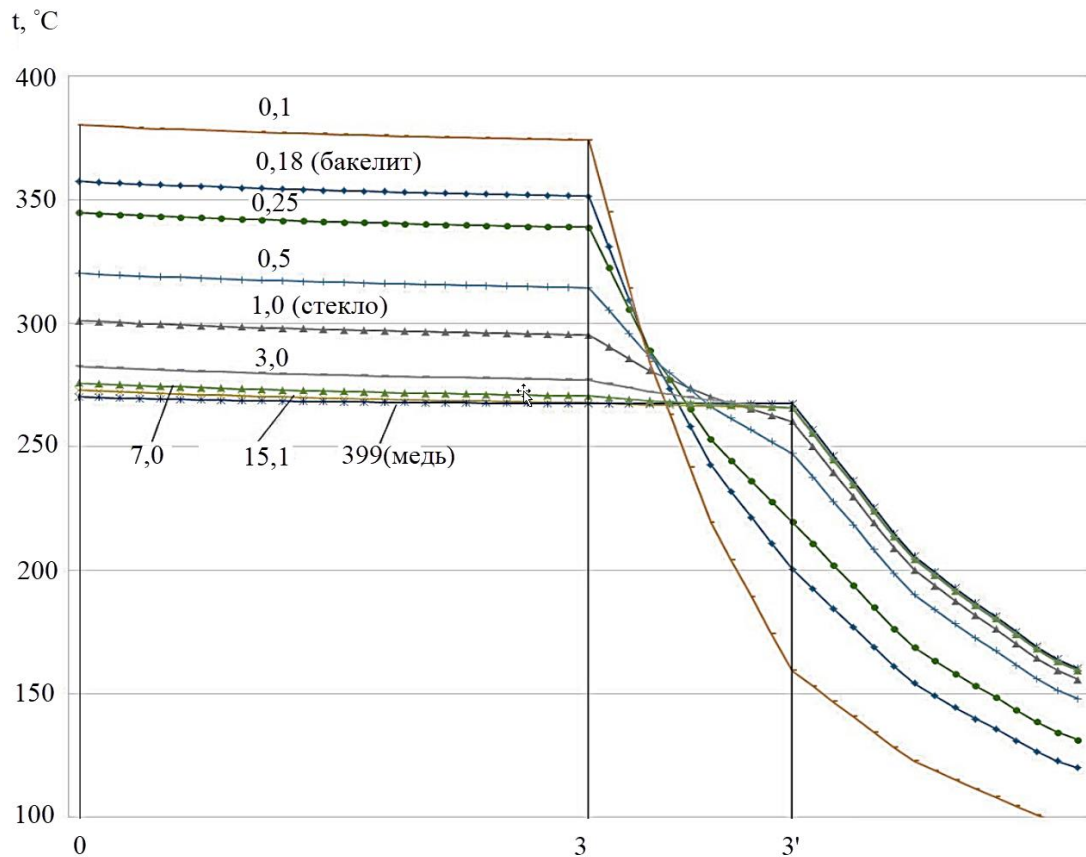


Рисунок 2.13 - Изменение температуры в сечении по вертикальной оси зерна при различной теплопроводности материала покрытия (плоскость Y0X)

Таким образом, задачу выбора теплопроводности материала покрытия в диапазоне  $\lambda_{\text{покр}} \leq \approx 4$  необходимо решать как оптимизационную, так как с увеличением теплопроводности материала покрытия, с одной стороны, температура в алмазе снижается, но, с другой стороны, повышается температура на границе покрытия и матрицы.

На рис. 2.14. показаны картины полей температур в системе «алмаз-покрытие-бакелитовая матрица» при различных коэффициентах теплопроводности материала покрытия.

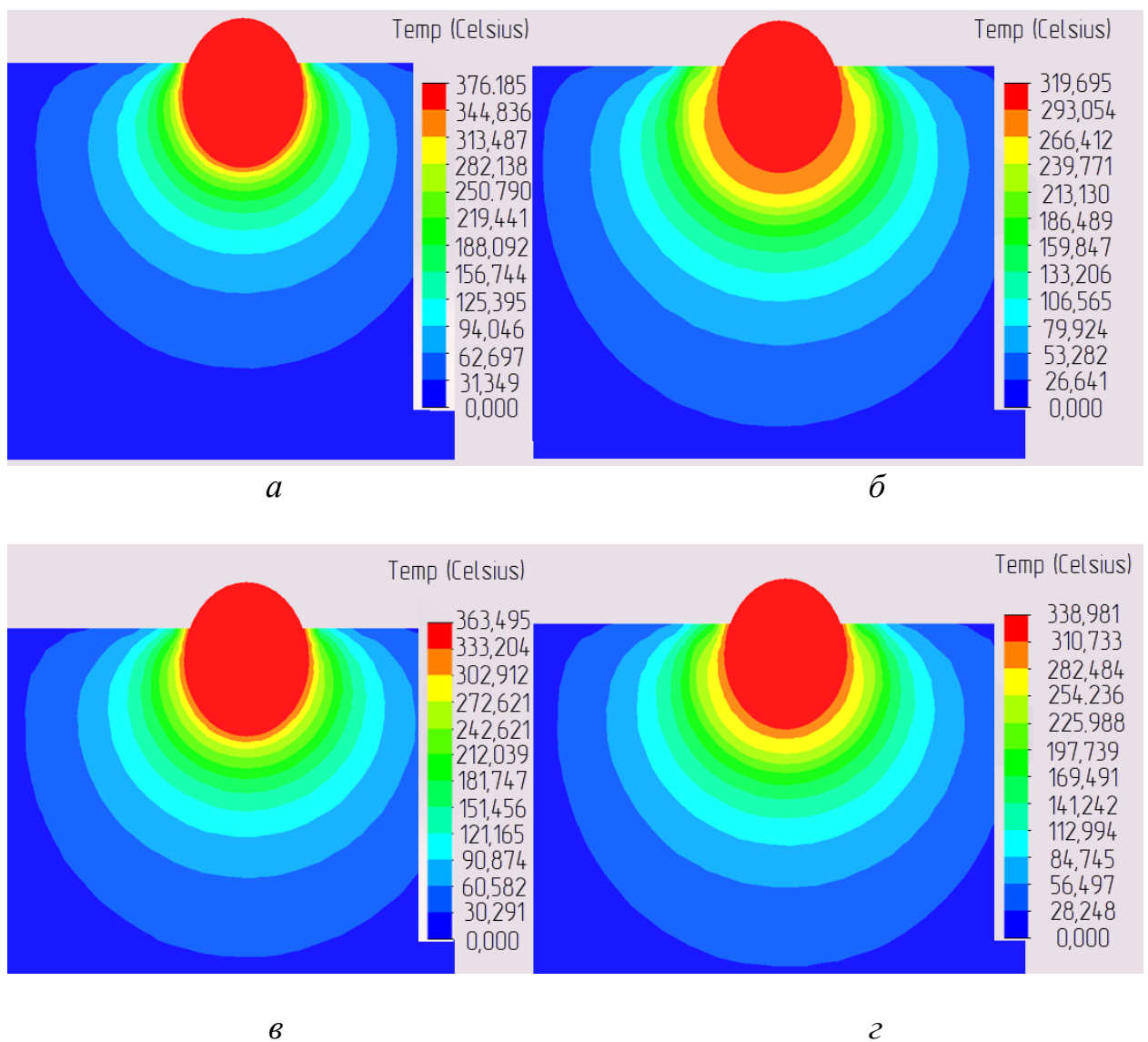


Рисунок 2.14 – Поля температур системы при различных значениях  $\lambda_{\text{покр}}$  :  
 а) 0,18 (бакелит); б) 1,0 (стекло); в) 0,25; г) 0,5 (плоскость YOX)

На рис. 2.15 показаны результаты исследования влияния толщины покрытия из никеля на температуру в исследуемой системе. Как было показано выше, при использовании никелевого покрытия тепловой поток из зоны резания прогревает зерно и покрытие до одинаковой температуры. Численные эксперименты показали, что на температуры в системе небольшие толщины практически не оказывают влияния. Для принятых условий численного эксперимента с заданными размерами конструкции, это толщины покрытия до  $\sim 0,02$  мм. Как видно из рис. 2.15, с увеличением толщины никелевого покрытия температура в зерне и, соответственно, в покрытии снижаются. Это связано, по-видимому, с повышением интенсивности теплоотдачи конвекцией за счет увеличения площади охлаждаемой поверхности покрытия. Так, при отсутствии покрытия температура зерна составляет  $370^{\circ}\text{C}$ , при толщине покрытия  $0,10$  мм -  $272^{\circ}\text{C}$ , при толщине  $0,20$  мм -  $217^{\circ}\text{C}$ .

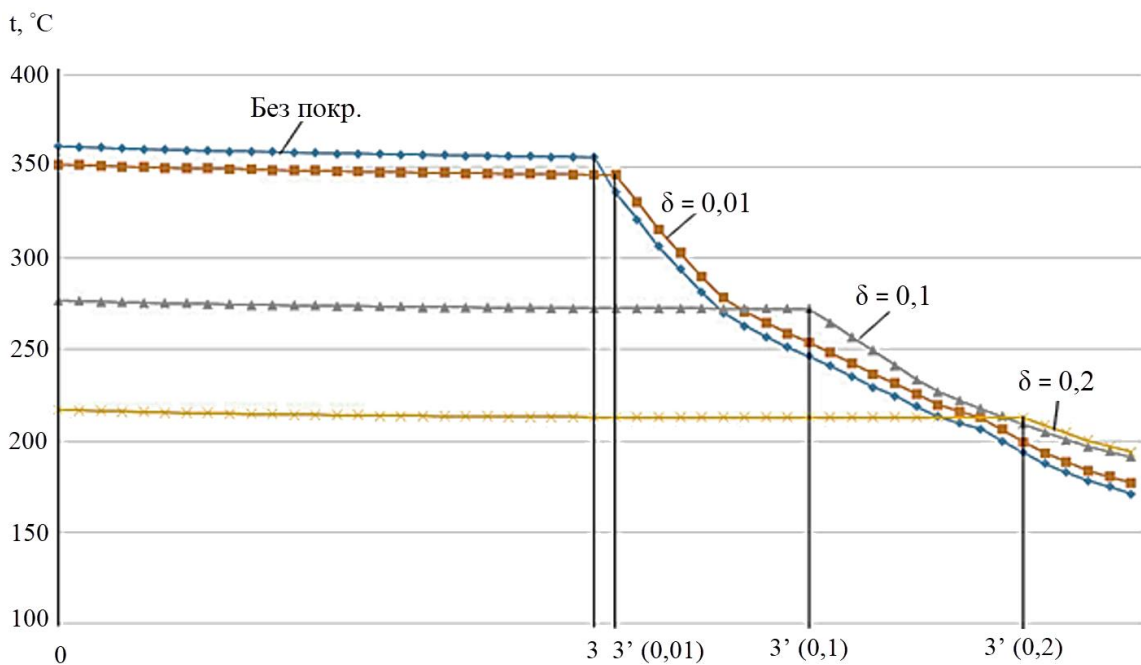


Рисунок 2.15 - Изменение температуры в сечении по вертикальной оси зерна при различной толщине (мм) никелевого покрытия (плоскость YOX)

Проведённые исследования температур в системе «алмаз–покрытие–полимерная матрица» и установленные зависимости температур на границе

покрытия и полимера от теплопроводности и толщины покрытия, позволяют решать практические задачи выбора параметров покрытия для снижения возможности термической деструкции полимера.

## 2.4 Моделирование напряжённо-деформированного состояния от силовых и тепловых возмущений

Как было отмечено выше, напряжённо-деформированное состояние при эксплуатации алмазного инструмента создается силовыми и тепловыми возмущениями от процесса резания. Компоненты деформаций и напряжений для рассматриваемой трехмерной задачи теории упругости имеют вид [97]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{du}{dx}; \quad \varepsilon_y = \frac{dv}{dy}; \quad \varepsilon_z = \frac{dw}{dz}; \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx}; \quad \varepsilon_{xz} = \frac{dv}{dz} + \frac{dw}{dx}; \quad \varepsilon_{yz} = \frac{dv}{dz} + \frac{dw}{dy}; \\ \sigma_x &= \frac{E}{1+\nu} \left[ \varepsilon_x + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) - \frac{1+\nu}{1-2\nu} \alpha_t(t)t \right]; \\ \sigma_y &= \frac{E}{1+\nu} \left[ \varepsilon_y + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) - \frac{1+\nu}{1-2\nu} \alpha_t(t)t \right]; \\ \sigma_z &= \frac{E}{1+\nu} \left[ \varepsilon_z + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) - \frac{1+\nu}{1-2\nu} \alpha_t(t)t \right]; \\ \tau_{xy} &= \frac{E}{2(1+\nu)} \varepsilon_{xy}, \quad \tau_{xz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \varepsilon_{xz}, \quad \tau_{yz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \varepsilon_{yz},\end{aligned}$$

где  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{xz}, \varepsilon_{yz}$  - линейные и угловые деформации;  
 $u, v, w$  - перемещения вдоль осей  $x, y$  и  $z$  соответственно;  
 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$  - нормальные и касательные напряжения;  
 $E, \nu$  - модуль упругости и коэффициент Пуассона;  
 $\alpha_t(t)$  - коэффициент теплового расширения.

Интенсивность напряжений вычисляется по формуле [26, 97]

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}.$$

Принято, что в узлах, расположенных на боковых и нижней гранях

матрицы (см. расчетную схему на рис. 2.1), перемещения  $u, v, w$  равны нулю.

На первом этапе численного моделирования исследованы напряжения и деформации в системе при действии сил резания.

На исследуемую конструкцию действует распределенная на поверхности алмазного зерна, контактирующей с обрабатываемой поверхностью, сила резания. Равнодействующая этой нагрузки равна 10 Н и приложена под углом  $30^\circ$  в плоскости  $Y0X$  (см. табл. 2.1). Эти параметры соответствуют известным из литературы условиям шлифования алмазными кругами на полимерном связующем [64, 68, 82].

На рис. 2.16 показаны изолинии интенсивности напряжений  $\sigma_i$ , возникающих при действии сил резания на поверхности конструкции и в центральном сечении в плоскостях  $Y0X$  и  $Y0Z$ .

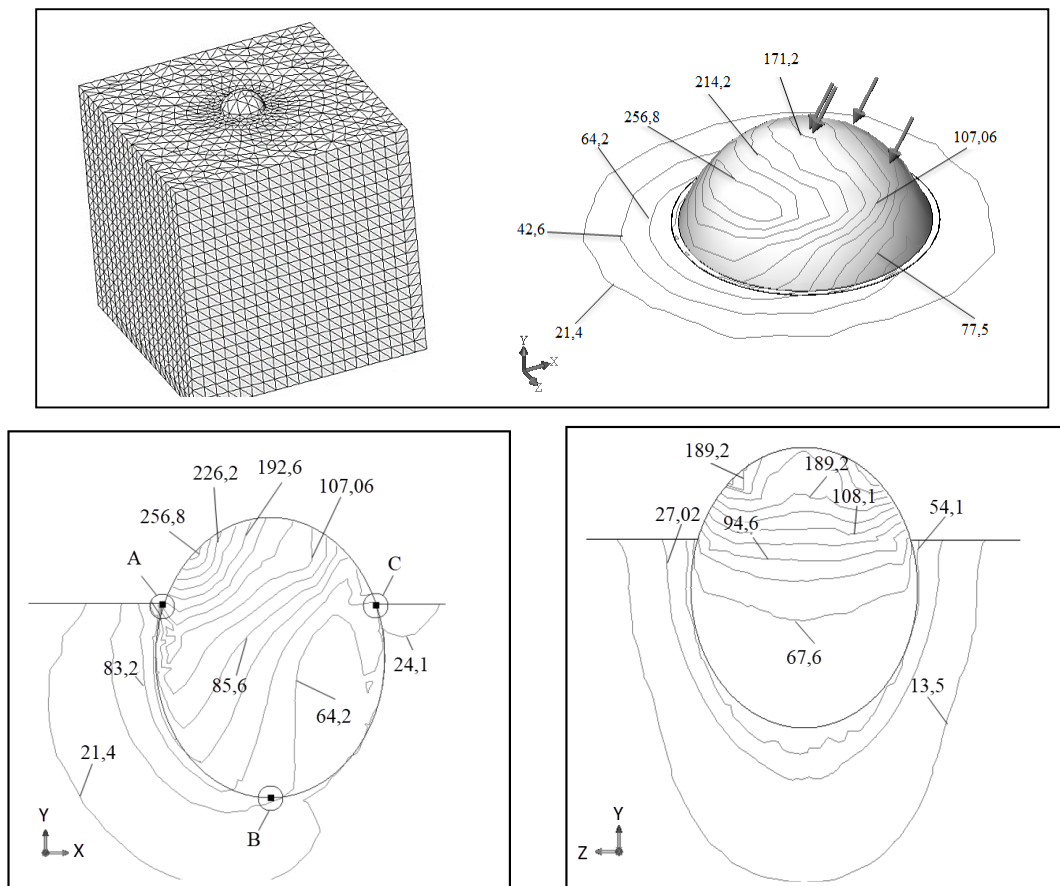


Рисунок 2.16 – Изолинии интенсивности напряжений  $\sigma_i$  (МПа) на поверхности конструкции и в центральных сечениях

С точки зрения влияния на прочность удержания алмаза в матрице, интерес представляют, прежде всего, напряжения в приконтактном с зерном слое матрицы. Отмечается возрастание интенсивности напряжений при приближении к линии сопряжения свободной и заземленной частей алмаза (к зоне концентрации напряжений).

На рис. 2.17 показаны картина напряжений в переходном слое в плоскости  $Y0X$ , а на рис. 2.18 - в сечении зерна по малой оси. Видно, что наиболее напряженной является левая относительно оси симметрии область системы, для которой характерны, в основном, сжимающие напряжения. Интенсивность напряжений увеличивается по мере приближения к границе между зерном и матрицей.

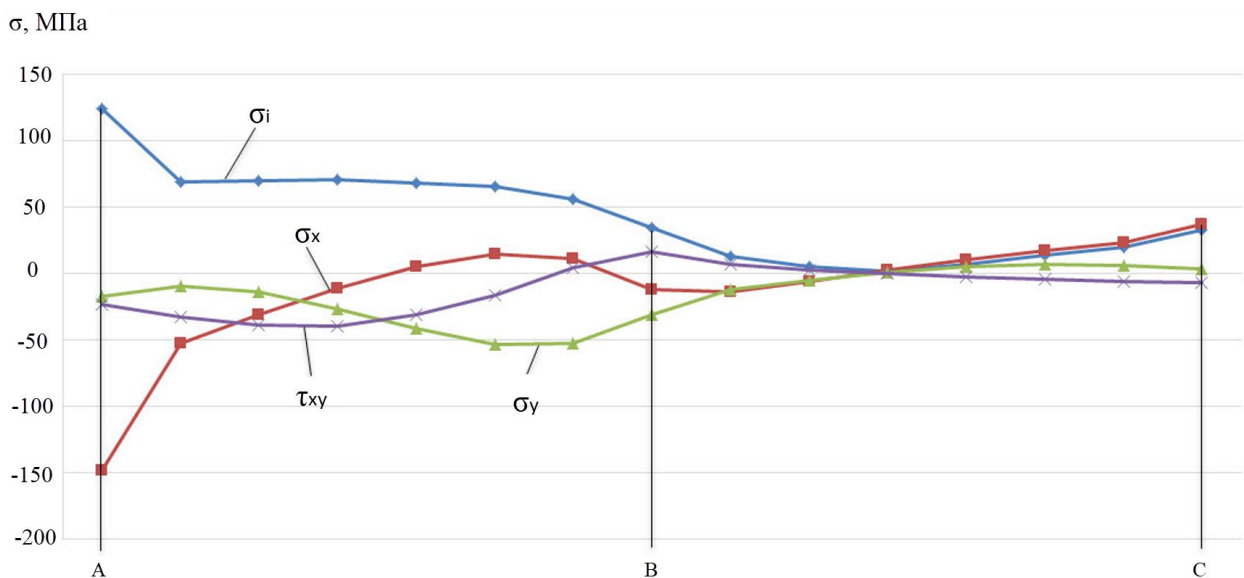


Рисунок 2.17 – Картина изменения напряжений в переходном слое (плоскость  $Y0X$ )

Распределение интенсивности напряжений  $\sigma_i$ , напряжений  $\sigma_x$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$  в зоне АЕСДА матрицы (см. рис. 2.3) – прилегающей к линии сопряжения свободной и заземленной частей зерна, являющейся зоной концентрации напряжений, представлены на рис. 2.19. Наибольшие напряжения наблюдаются в плоскости действия силы резания, при



приближении к зоне А интенсивность напряжений  $\sigma_i$ , увеличивается. Картина изменения значений напряжений в системе определяется принятой расчетной схемой и косвенно подтверждает правильность решения задачи.

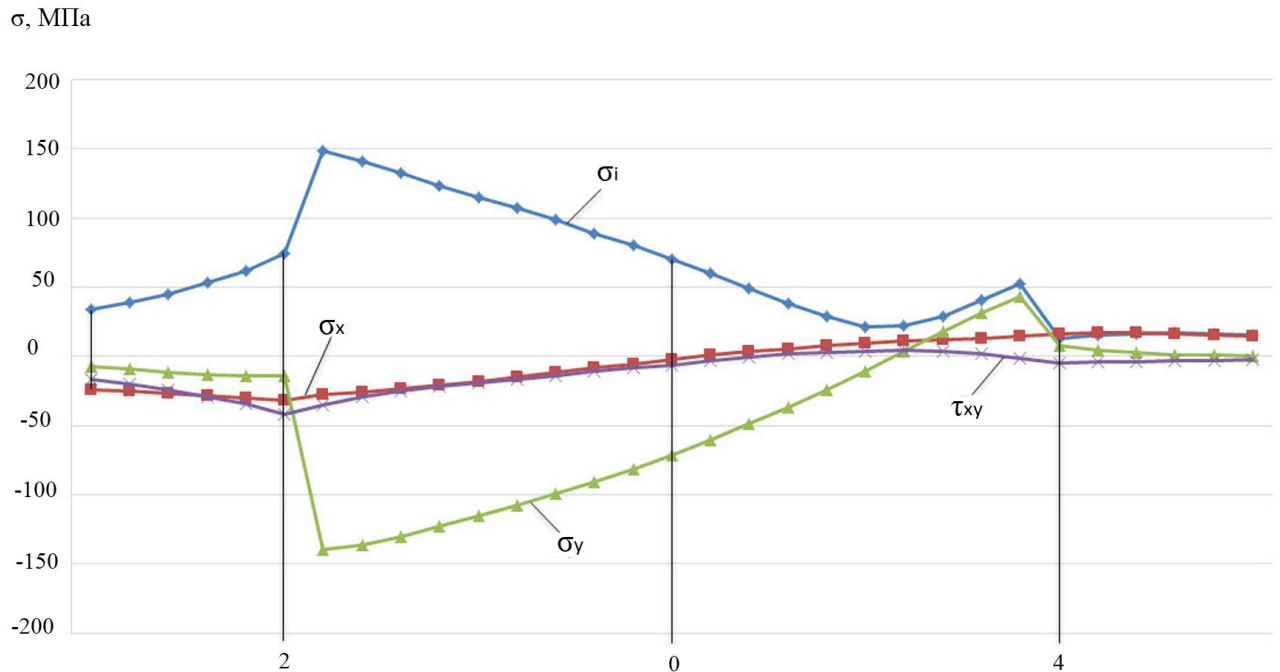


Рисунок 2.18 - Напряжение в системе в сечении алмаза по малой оси (плоскость YOX)

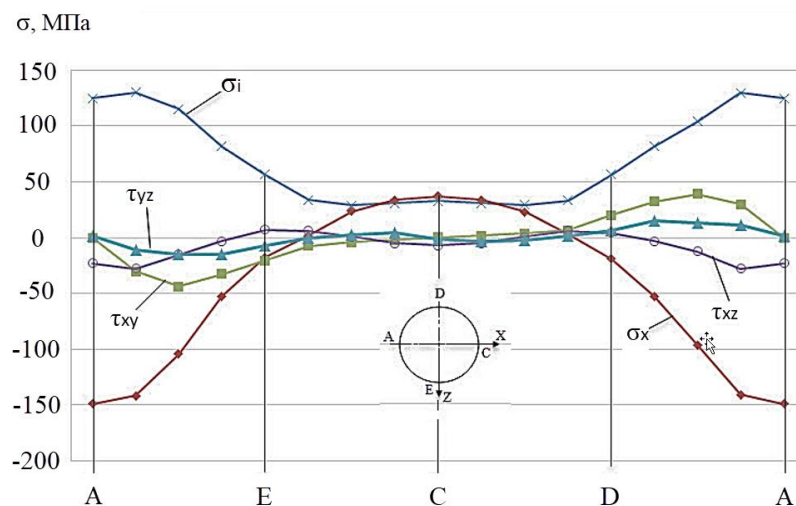


Рисунок 2.19 – Картина напряжений в слое матрицы, прилегающем к концентрации напряжений

На рис. 2.20 и 2.21. показаны результаты моделирования интенсивности напряжений в зонах А и С при изменении угла наклона зерна  $\alpha$  и его относительного выступания из матрицы (см. рис. 2.1). Расчеты показали, что минимальные значения интенсивности напряжений имеют место при  $\alpha = 50^\circ$ , когда рассчитываемая конструкция и действующая на неё сила имеют благоприятное с точки зрения напряжений и деформаций расположение.

Как видно из рисунка 2.21, при увеличении величины выступания алмаза, напряжения в зонах А и С возрастают. Например, в зоне А имеет место восьмикратное увеличение  $\sigma_i$  с 55,4 МПа при  $h_z/b=2/6$  (отношение выступания зерна  $h_z$  к большой полуоси алмаза  $b$ ) до 442,8 МПа при  $h_z/b=8/6$ , а в зоне С, имеет место практически пятнадцатикратное увеличение интенсивности напряжений.

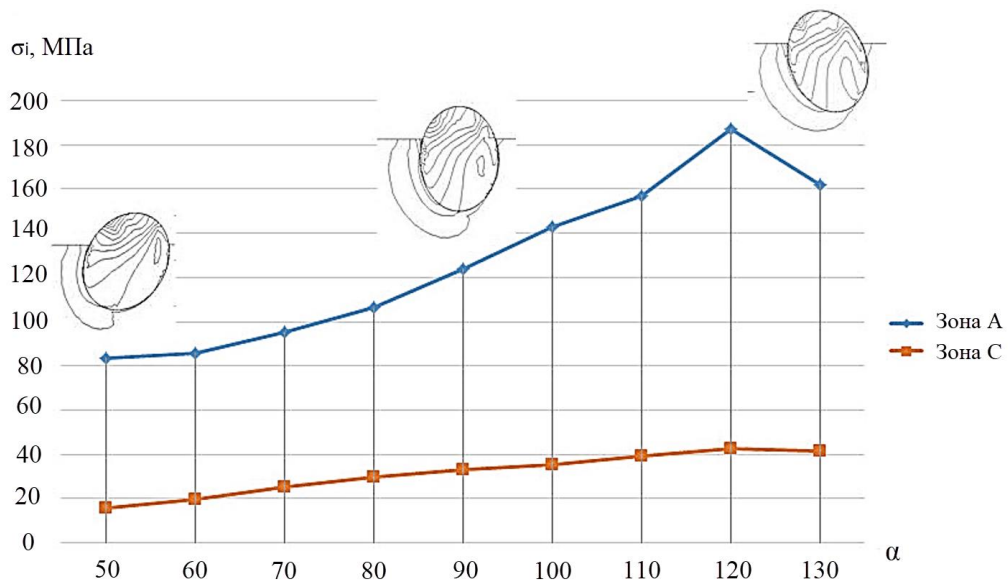


Рисунок 2.20 - Зависимость интенсивности напряжений в зонах А и С от угла наклона зерна (в плоскости действия равнодействующей силы YOX)

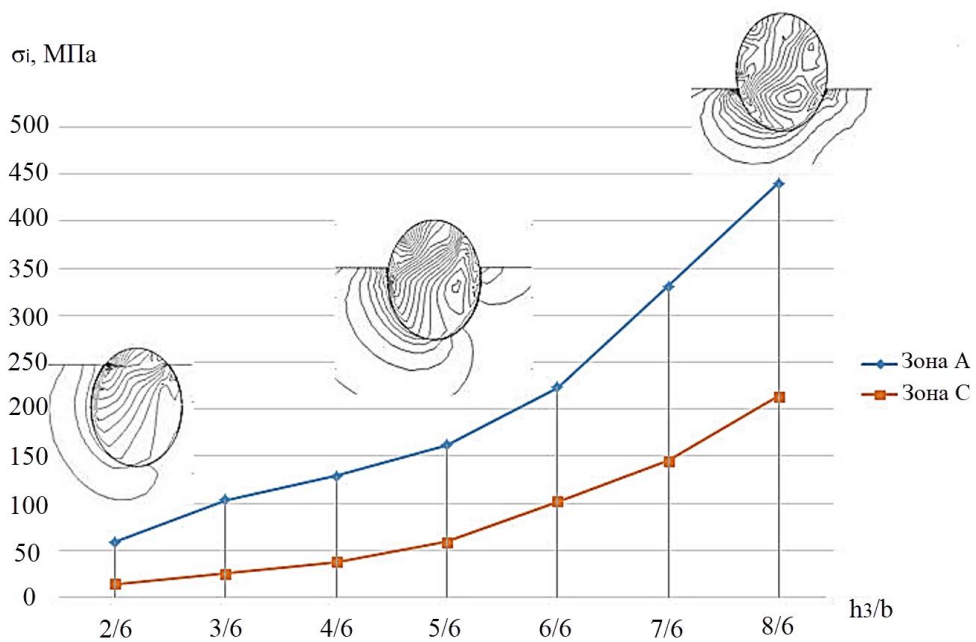


Рисунок 2.21 - Зависимость интенсивности напряжений в зонах А и С от высоты выступа алмаза (в плоскости действия силы Y0X)

Полученные результаты могут использоваться для дальнейшего развития существующих представлений о критической заделке зерна в матрице инструмента [110]. Кроме того, закономерности выявленные в процессе моделирования, могут быть полезны при разработке инструментов с ориентированными алмазно-абразивными зернами, а также при оптимизации уровня выступа последних над матрицей [42].

Расчетный анализ показал, что при изменении модуля упругости и коэффициента Пуассона матрицы напряженно-деформированное состояние системы меняется несущественно. Перемещения в системе и, соответственно, её жесткость нелинейно зависят от модуля Юнга матрицы  $E_m$ . На рис. 2.22 приведены данные о перемещениях  $u$  и  $v$  центра алмаза по осям  $x$  и  $y$  соответственно.

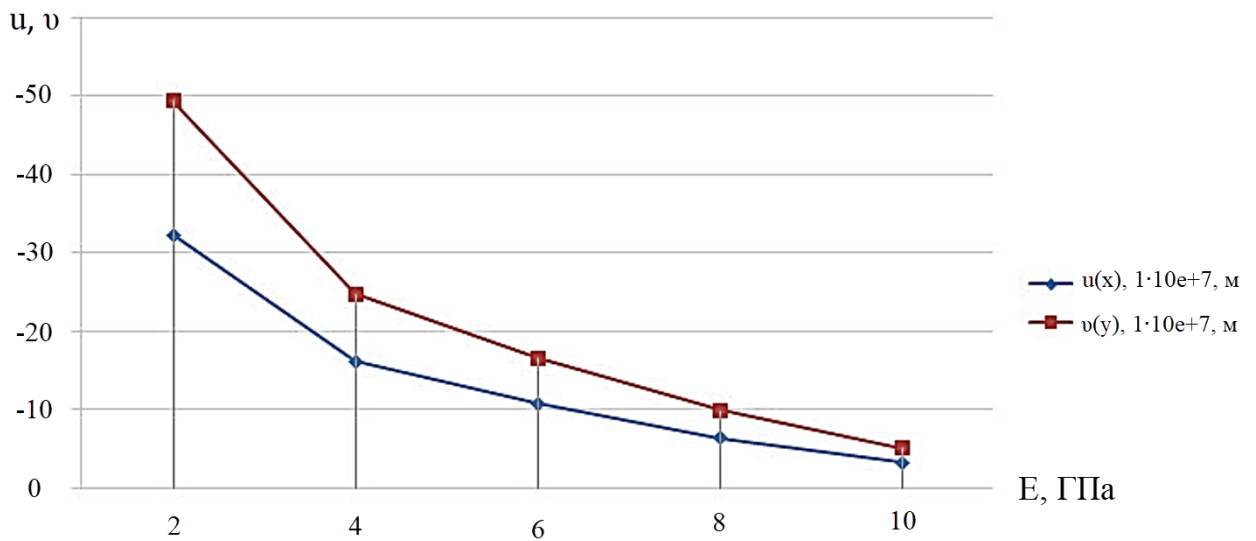


Рисунок 2.22 - Зависимость перемещений центра алмаза от модуля Юнга матрицы

Следующий этап численных экспериментов - исследования температурных напряжений в системе «алмаз-полимерная матрица». Полученные закономерности распределения температурных напряжений в плоскости  $XOY$  по вертикальной и горизонтальной оси зерна представлены на рис. 2.23 и 2.24. Анализ показывает, что максимальная интенсивность напряжений имеет место на границе зерна и матрицы. При этом, при приближении к границе со стороны алмаза имеет место скачок напряжений примерно в 2,5 раза, а при приближении к границе со стороны матрицы - более монотонное увеличение напряжений.

Представленные на рис. 2.25 картины эквивалентных деформаций и интенсивности напряжений соответствуют указанному выше значительному градиенту свойств алмаза, связующего и покрытий (см. табл. 2.2 и 2.4). Наибольшая интенсивность температурных напряжений имеет место по линии сопряжения заземленной в матрице и свободной частей алмазного зерна.

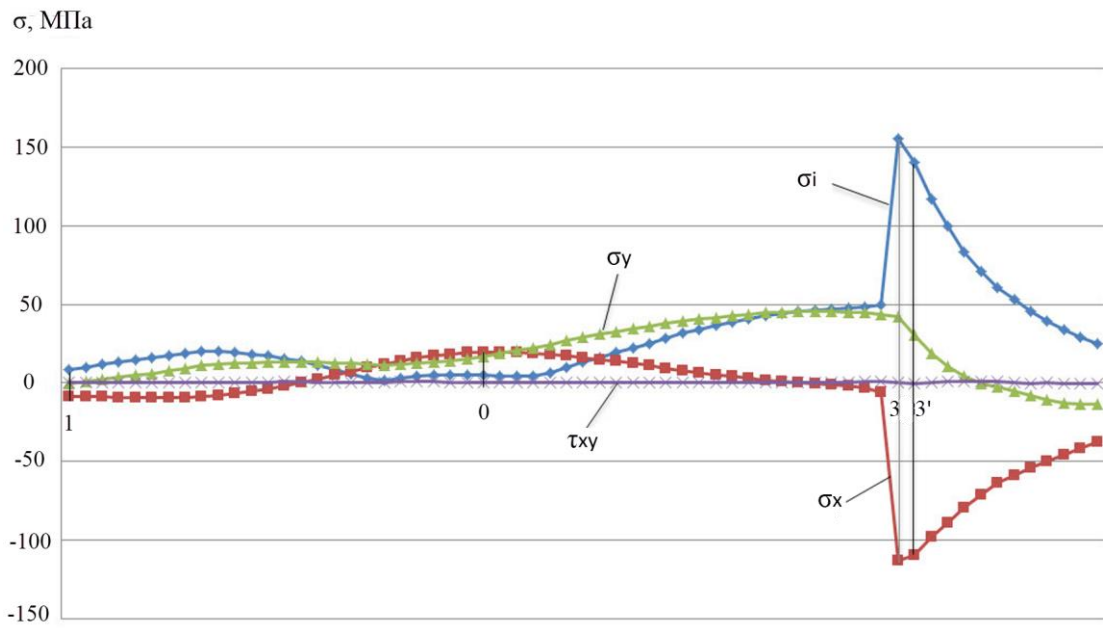


Рисунок 2.23 - Распределение температурных напряжений в сечении по вертикальной оси зерна (плоскость Y0X)

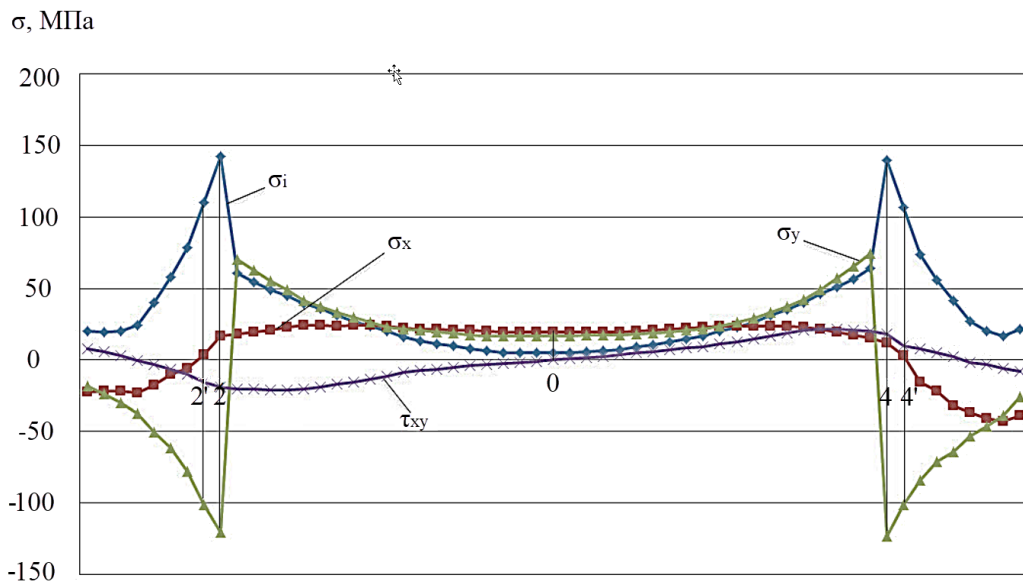


Рисунок 2.24 - Распределение температурных напряжений в сечении по горизонтальной оси зерна (плоскость Y0X)

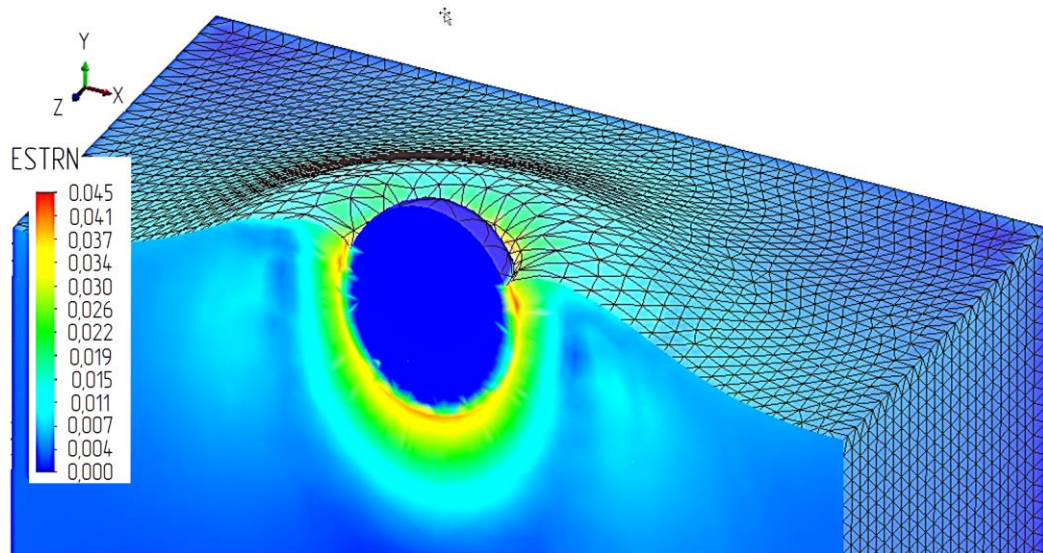
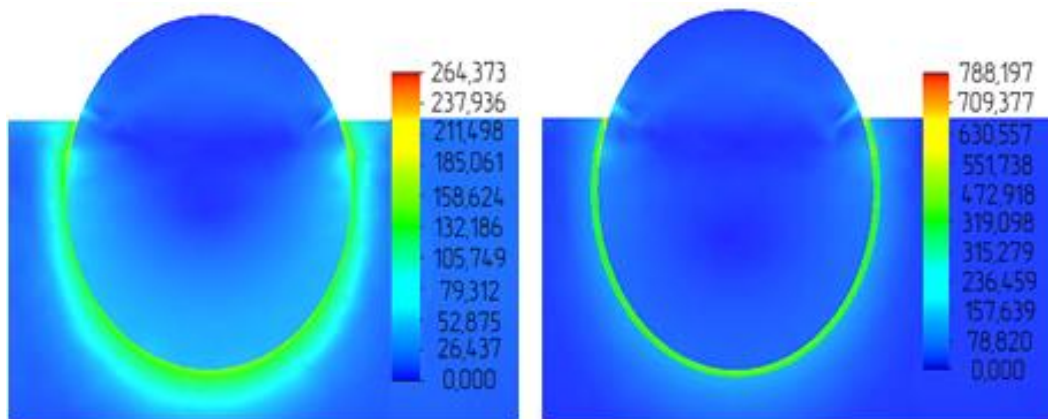
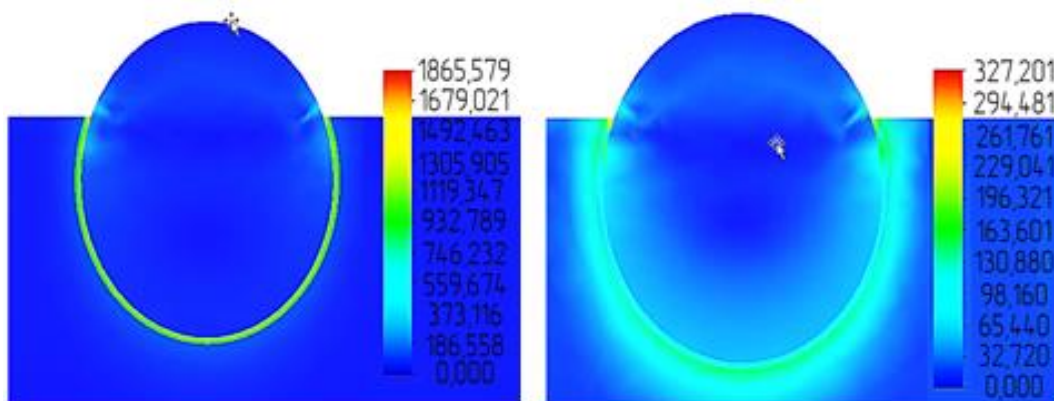
*a**б**в**з**д*

Рисунок 2.25 – Картины эквивалентных деформаций (*a*) и интенсивности напряжений (МПа) при отсутствии покрытия (*б*) и покрытиях из: титана (*в*); никеля (*з*); стекла (*д*) (плоскость Y0X)

На рис. 2.26 - 2.28 приведено распределение интенсивности температурных напряжений в конструкции при различных материалах покрытия толщиной 0,1 мм. Численные эксперименты показали, что температурные напряжения в системе «алмаз-покрытие-полимерная матрица» значительно выше, чем в системе «алмаз-полимерная матрица». При этом максимальные напряжения имеют место на границе раздела зерна и покрытия, а напряжения на границе покрытия и матрицы в несколько раз меньше.

Напряжения существенно зависят от материала покрытия. Наименьшие значения напряжений отмечены для покрытия из стекла. Далее следуют в порядке возрастания напряжений титан, медь и никель. С учетом того, что температуры в системе при покрытиях из этих металлов практически одинаковые, полученные закономерности объясняются значениями модуля Юнга и коэффициентов теплового расширения этих материалов.

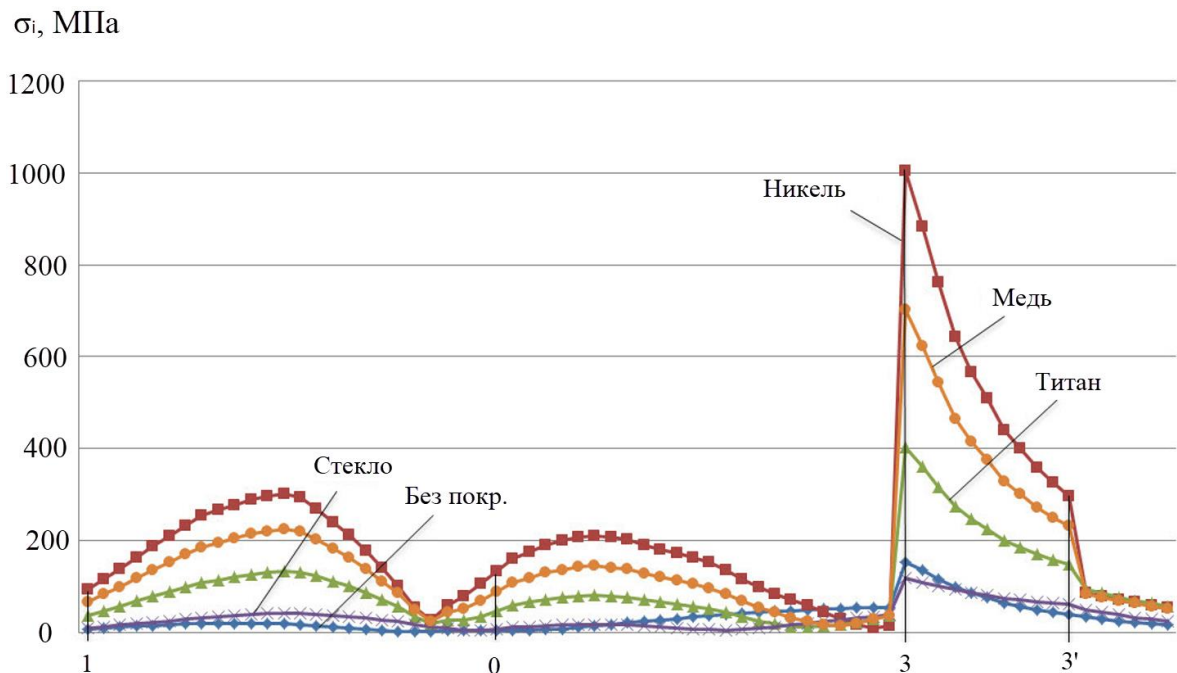


Рисунок 2.26 - Изменение интенсивности температурных напряжений в сечении зерна по вертикальной оси при использовании покрытий из различных материалов (плоскость  $Y0X$ )

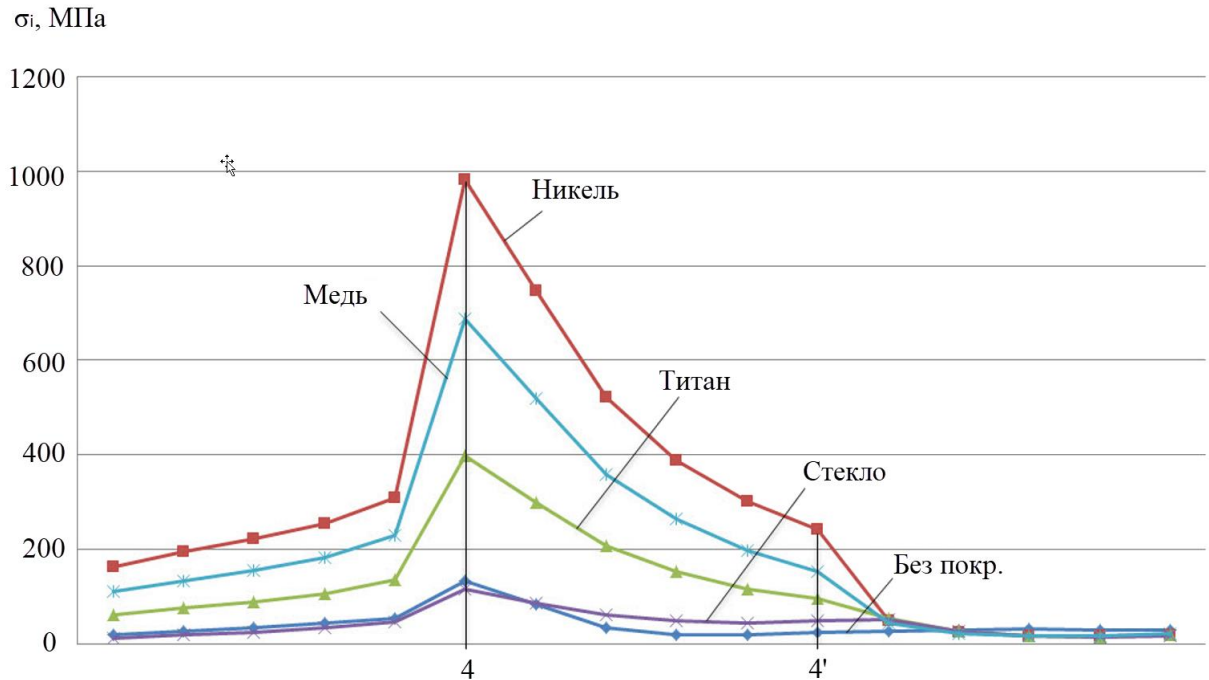


Рисунок 2.27 - Изменение интенсивности температурных напряжений в сечении по горизонтальной оси зерна при различных материалах покрытия (плоскость  $Y0X$ )

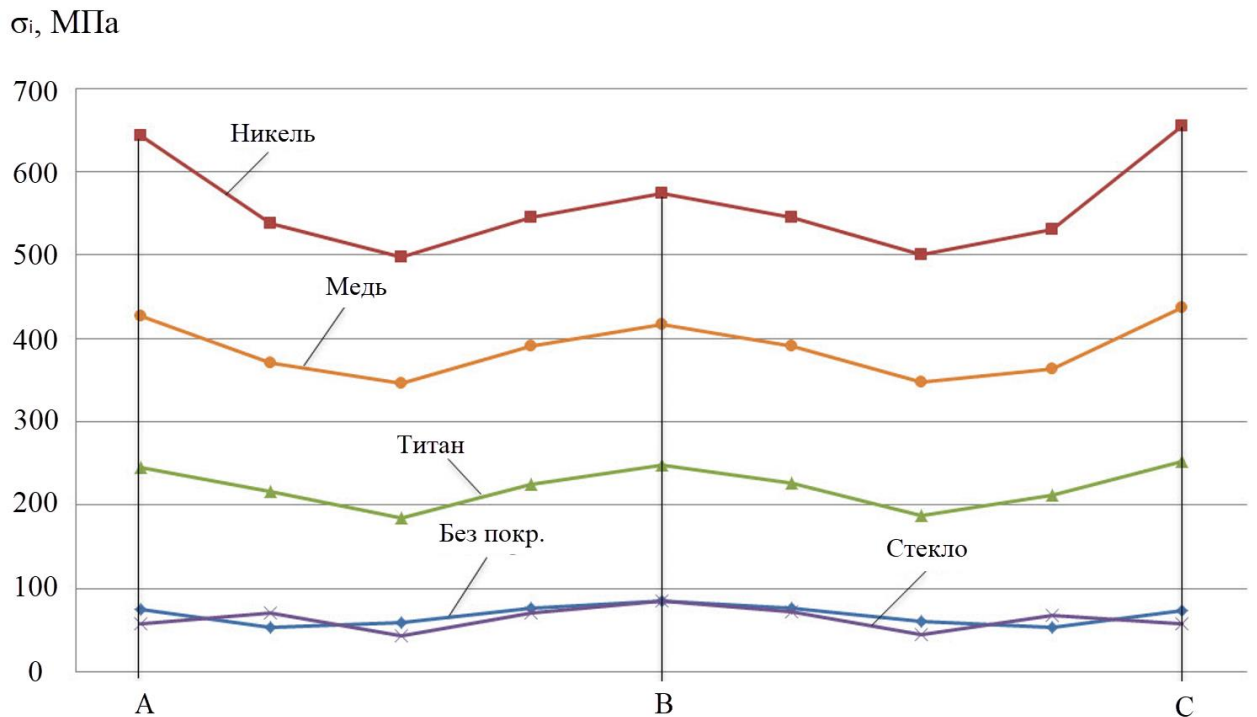


Рисунок 2.28 - Температурные напряжения в покрытиях при различных материалах покрытия (плоскость  $Y0X$ )



Проведены численные эксперименты по исследованию зависимости температурных напряжений от толщины никелевого покрытия (рис. 2.29). Увеличение толщины от базового значения в экспериментах, равного 0,01 мм, до 0,1 мм приводит к снижению максимальных напряжений (на границе зерна и покрытия) примерно в 1,25 раза, а увеличение толщины до 0,2 мм - к снижению примерно в 1,63 раза. Интенсивность напряжений на границе покрытия и матрицы снижаются более существенно: при увеличении толщины до 0,10 мм – в 4,5 раза, до 0,20 мм – в 8 раз.

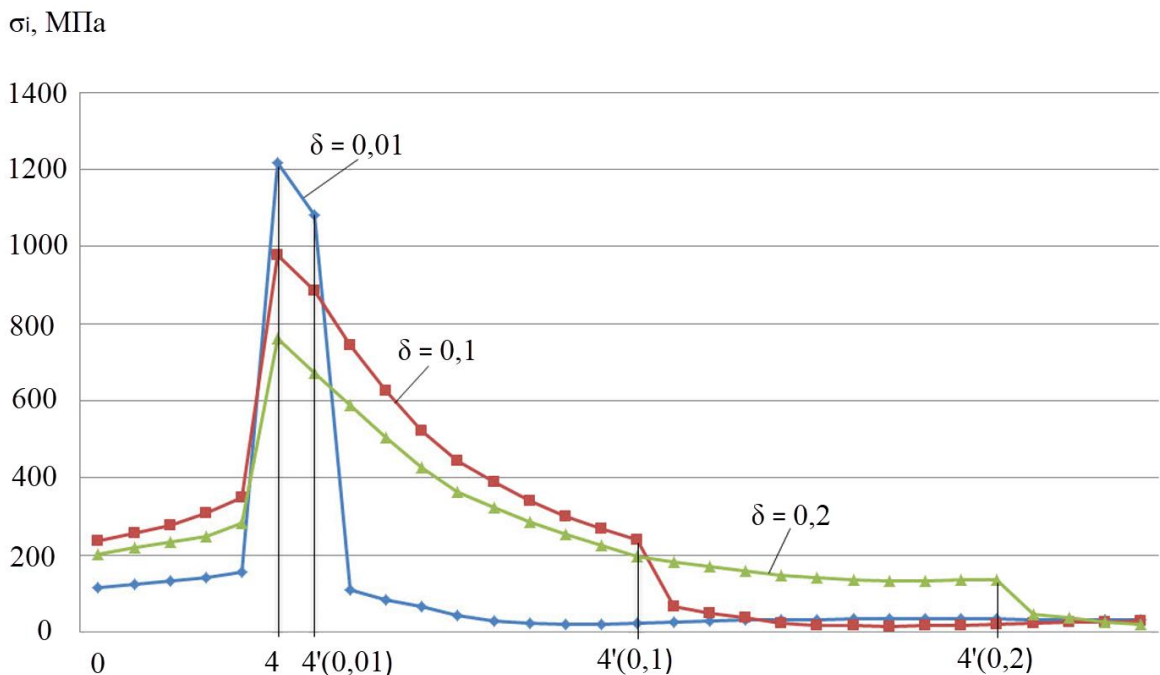


Рисунок 2.29 - Распределение температурных напряжений по горизонтальной оси зерна при разных толщинах никелевого покрытия (мм) (плоскость YOX)

Для покрытий на алмазы из никеля, меди, титана, стекла, а также для случая использования зёрен без покрытия получены зависимости интенсивности температурных напряжений от коэффициента теплопроводности и коэффициента теплового расширения материала матрицы. На рис. 2.30 показаны зависимости интенсивности температурных напряжений в зоне В покрытия (см. рис. 2.3) от коэффициента теплопроводности матрицы для различных материалов покрытия. Для всех рассматриваемых случаев имеет место снижение интенсивности напряжений при увеличении теплопроводности матрицы, что связывается, прежде всего, с

соответствующим характером изменения температурного поля в системе. Отмечено, что при меньших значениях коэффициента теплопроводности матрицы эти зависимости имеют более выраженный нелинейный характер.

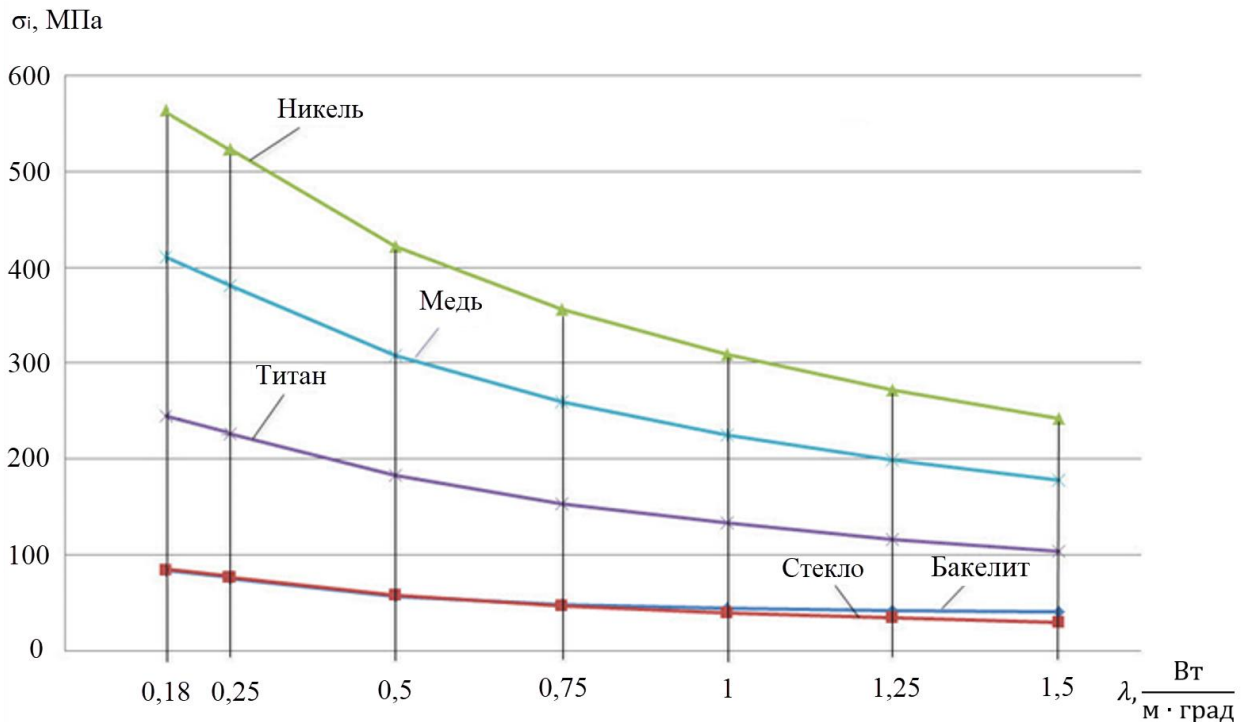


Рисунок 2.30 – Зависимость температурных напряжений в зоне В от коэффициента теплопроводности матрицы

Зависимости интенсивности температурных напряжений в зоне В (см. рис. 2.3) от коэффициента теплового расширения матрицы  $\alpha_t$  для различных материалов покрытия показаны на рис. 2.31. Значения  $\alpha_t$  в численных экспериментах варьировались в диапазоне, середина которого приходится на значение коэффициента теплового расширения бакелита, которое равно  $70 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ . Зависимости имеют общую тенденцию к уменьшению интенсивности напряжений при уменьшении  $\alpha_t$ .

При исходных значениях параметров модели (см. табл. 2.1) исследованы напряжения при различных комбинациях силового и теплового нагружений системы «алмаз-матрица». На рис. 2.32 показана картина изменения интенсивности напряжений в переходном слое при воздействии на систему:  $P$  - силового,  $q$  - теплового,  $qP$  – силового и теплового одновременно.

Численные эксперименты показали, что напряженно-деформированное состояние исследуемой системы в значительной степени определяется тепловыми возмущениями от процесса резания. Влияние сил резания менее значимо.

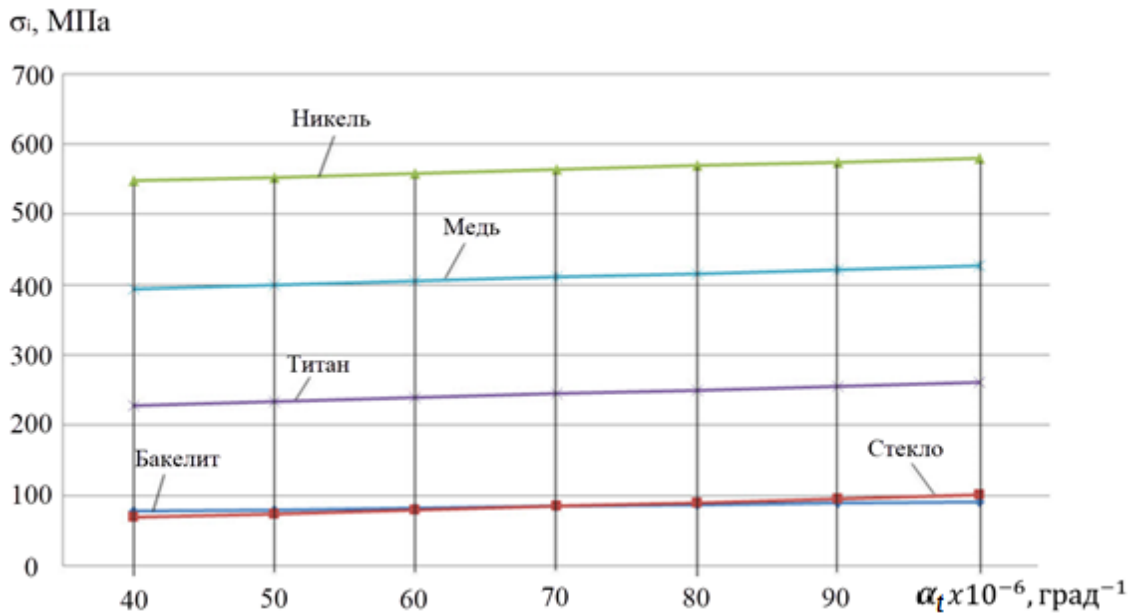


Рисунок 2.31 – Зависимости температурных напряжений в зоне В от коэффициента теплового расширения матрицы

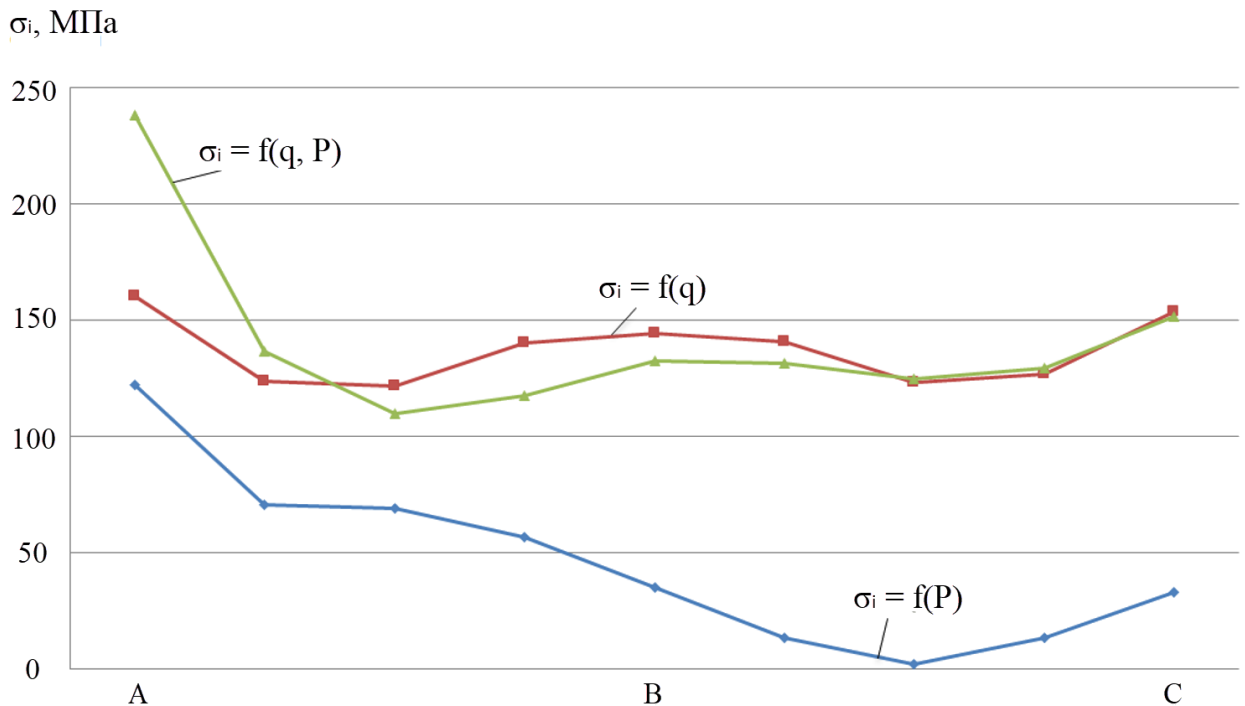


Рисунок 2.32 - Интенсивность напряжений в переходном слое при воздействии на систему:  $P$  - силовом,  $q$  - тепловом,  $qP$  – силовом и тепловом

## 2.5 Выводы

1. Разработана трехмерная конечно-элементная модель для расчета стационарных полей температур, напряжений и деформаций в системе «алмаз-покрытие-матрица» с использованием программного комплекса SolidWorks, позволяющая варьировать физическими свойствами элементов, геометрией системы и параметрами силовых и тепловых возмущений на неё.

2. Численным моделированием установлено, что в процессе эксплуатации инструмента на бакелитовой матрице алмаз практически равномерно прогревается по всему объему, а уровень температур в системе «алмаз-матрица» существенно зависит от теплопроводности матрицы.

3. Исследования показали, что с увеличением теплопроводности материала покрытия на зерно значения температур в алмазе падают и одновременно уменьшается градиент температуры по толщине покрытия. Такая тенденция сохраняется до определенного значения коэффициента теплопроводности материала покрытия, выше которого температуры в зерне и покрытии выравниваются и не изменяются.

4. Исследования показали, что при увеличении толщины никелевого покрытия температуры в алмазе и, соответственно, на границе покрытия и матрицы снижаются. Так, в принятых условиях численного эксперимента, при толщине покрытия 0,10 мм температура на границе покрытия и матрицы составила около 75% от соответствующей температуры при отсутствии покрытия, а при толщине 0,20 мм – около 60%.

5. Исследовано напряженно-деформированное состояние системы «алмаз-полимерная матрица» под действием сил резания и его зависимость от модуля упругости материала матрицы. Получены зависимости напряжений от степени погружения зерна в матрицу и угла наклона зерна.

6. Исследования показали, что максимальная интенсивность температурных напряжений в системе «алмаз-полимерная матрица» имеет место на границе раздела зерна и матрицы. При этом отмечено, что градиент

температур от границы в стороны алмаза значительно выше, чем в сторону матрицы.

7. Исследования показали, что температурные напряжения в композитах на полимерной матрице на основе алмазов с покрытием значительно выше, чем с алмазами без покрытия. Максимальные напряжения в системе имеют место на границе зерна и покрытия, а напряжения на границе матрицы и покрытия в несколько раз меньше.

8. Получены закономерности распределения температурных напряжений в системе при использовании различных покрытий. Для случая использования никелевого покрытия показано, что с увеличением его толщины напряжения в системе снижаются. Для различных покрытий на алмазы получены зависимости температурных напряжений от коэффициентов теплового расширения и теплопроводности материала матрицы.

9. Исследования показали, что в системе «алмаз-полимерная матрица» напряжения от тепловых факторов процесса резания значительно превышают напряжения от сил резания, что подтверждает актуальность изучения тепловых процессов в исследуемых композитах.

10. Результаты исследования температур и напряженно-деформированного состояния в системе «алмаз-покрытие-полимерная матрица» позволяют найти параметры системы, обеспечивающие снижение температур на границе покрытия и матрицы, температурных напряжений в системе, и, соответственно, повышение прочности удержания алмазных зёрен в рабочей части инструмента.

### ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА БАКЕЛИТОВОМ СВЯЗУЮЩЕМ

Как отмечалось выше, рабочая часть алмазно-абразивных инструментов является композиционным материалом, в котором полимер выступает в качестве дисперсной среды по отношению к алмазам и частицам наполнителя. Соответственно, разработка алмазного инструмента должна быть основана на комплексном исследовании свойств композиционного алмазосодержащего материала (алмаза, наполнителя, структуры и свойств связки, физико-химических явлений на границах раздела фаз) и процессов в инструменте при эксплуатации, влияющих на его работоспособность.

Физико-механические и эксплуатационные свойства алмазосодержащего композита в значительной степени определяются особенностями его структуры, и в первую очередь характером взаимодействия компонентов, а также локализацией алмазных зерен и частиц наполнителя в связующем, степенью кристалличности, типом и размерами надмолекулярных образований полимера.

Исследованы морфология и химический состав поверхности зёрен алмазного синтетического монокристаллического шлифпорошка АС4 зернистостью 200/160 в исходном состоянии и с покрытием никелем. АС4 отличается повышенной хрупкостью и применяется для производства алмазно-абразивного инструмента на полимерных связующих, используемых для финишной обработки твердых сплавов [30].

Проведены исследования характера взаимодействия в процессе изготовления инструмента компонентов композитов на бакелитовом связующем с алмазными зёрнами без покрытия и с покрытием.

Характеристики образцов, использованных в экспериментальных исследованиях, приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Образцы для экспериментов

№	Обозначение	Состав
1	АС4 200/160	Шлифпорошок из синтетических монокристаллов алмаза АС4, зернистостью 200/160
2	АС4 200/160 Ni56	Шлифпорошок из синтетических монокристаллов алмаза АС4, зернистостью 200/160, с никелевым покрытием массовой долей 56%.
3	В1-О1 АС4 200/160 (серийный круг)	Фрагменты алмазоносного слоя серийных кругов. Объемный состав: алмазный шлифпорошок АС4, зернистостью 200/160 - 25%; связка В1-О1 - 75% (фенольное порошкообразное связующее (пульвербакелит) СФП-012А – 50%; наполнители - медь и висмут – 40%, и карбид бора – 10%).
4	В1-О1 (круг без алмазов)	Фрагменты рабочей части круга без алмазов, изготовленного по технологии производства серийных кругов.
5	В1-О1 АС4 200/160 Ni56 (круг с алмазами с покрытием)	Фрагменты алмазоносного слоя круга на основе алмазного порошка АС4 зернистостью 200/160 с никелевым покрытием с массовой долей 56% и связки В1-О1.

### 3.1 Исследование морфологии и химического состава поверхности алмазных зерен

Исследовалась поверхность алмазных зерен шлифпорошков АС4, зернистостью 200/160 без покрытия и с покрытием никелем массовой долей 56% (образцы 1 и 2 в табл. 3.1). Исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA3LMH с EDX микрозондом для химического анализа (рис. 3.1). Прибор позволяет сканировать поверхности твердых поверхностей (металлических и неметаллических) и проводить химический анализ поверхности образца. Он отображает объекты путем сканирования поверхности образца, расположенного в камере микроскопа, узким пучком электронов. Качество изображений в первую очередь зависит от параметров пучка электронов (электронного зонда) - размера зонда, апертурного угла и интенсивности пучка.



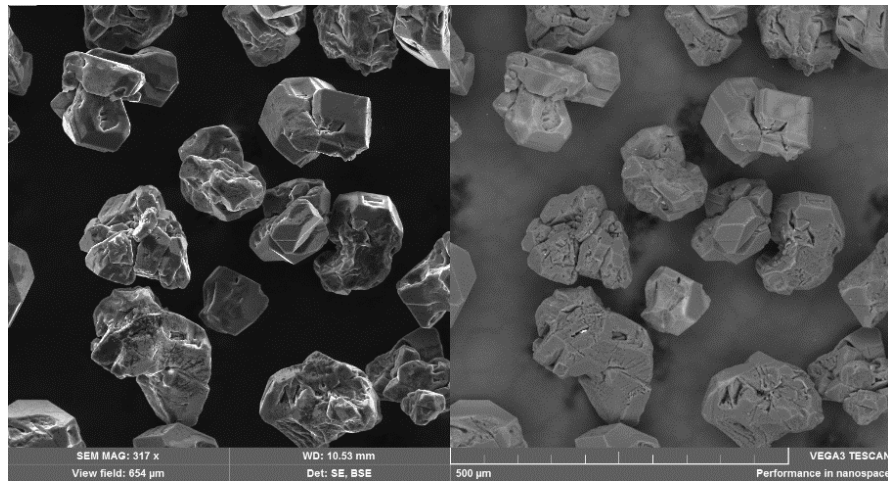
Рисунок 3.1 - Сканирующий электронный микроскоп Tescan VEGA3LMH

Сигналы, полученные в результате контакта электронного пучка с поверхностью исследуемого объекта, фиксируются с помощью детектора для вторичных электронов, работающего в режиме высокого вакуума (0,005 Па).

Детектор вторичных электронов формирует изображение с топографическим контрастом. Решетка детектора находится под положительным потенциалом, притягивая низкоэнергетические вторичные электроны. Электроны ускоряются под действием еще более высокого напряжения сцинтиллятора и излучают свет, когда попадают в сцинтиллятор. Этот свет регистрируется фотоумножителем вне камеры микроскопа и используется для формирования сигнала от детектора вторичных электронов.

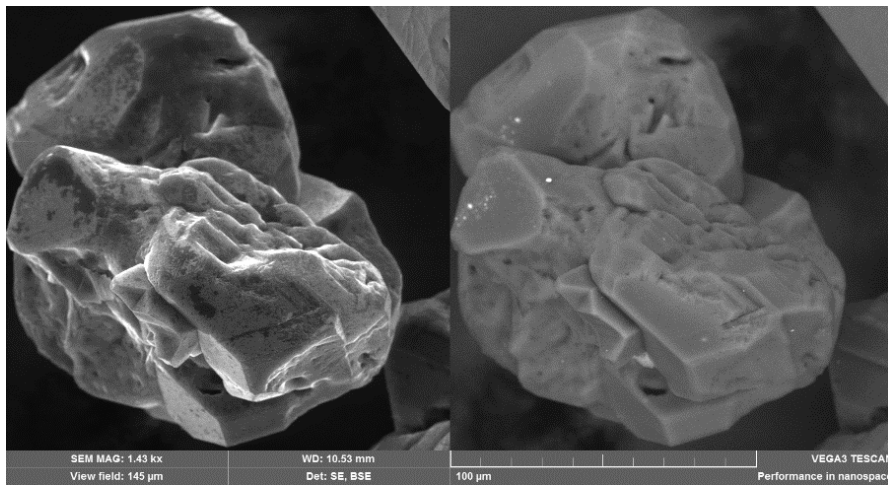
На рис. 3.2 приведены изображения алмазного шлифпорошка АС4, зернистостью 200/160, полученные на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA3LMH. На снимках видно, что в порошке присутствуют, наряду с отдельными зернами, сrostки и агрегаты, а на поверхностях компонентов порошка имеются значительное количество сколов, трещин и пор.





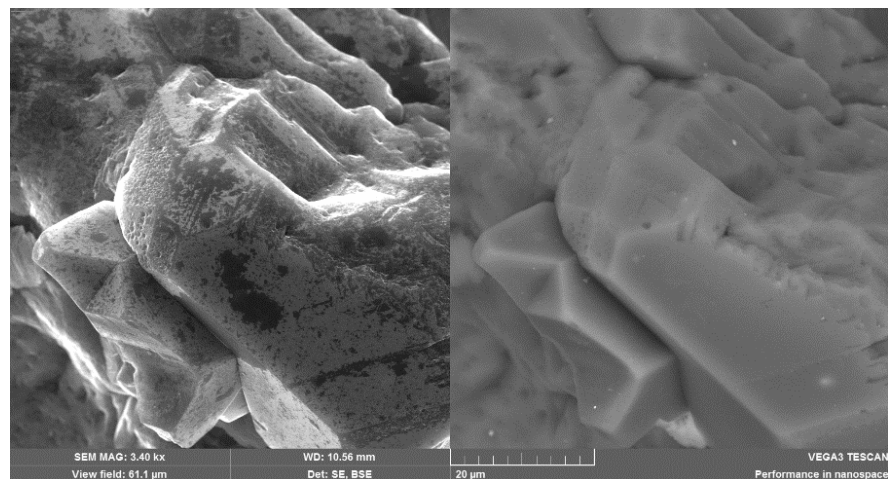
317x

а



1430x

б



3400x

в

Рисунок 3.2 - Электронно-микроскопические изображения алмазов марки АС4 200/160: а – общий вид порошка; б – отдельное зерно; в – поверхность зерна

На рис. 3.3 представлены результаты химического анализа поверхности зерен шлифпорошка АС4, зернистостью 200/160, выполненного EDX микронзондом микроскопа.

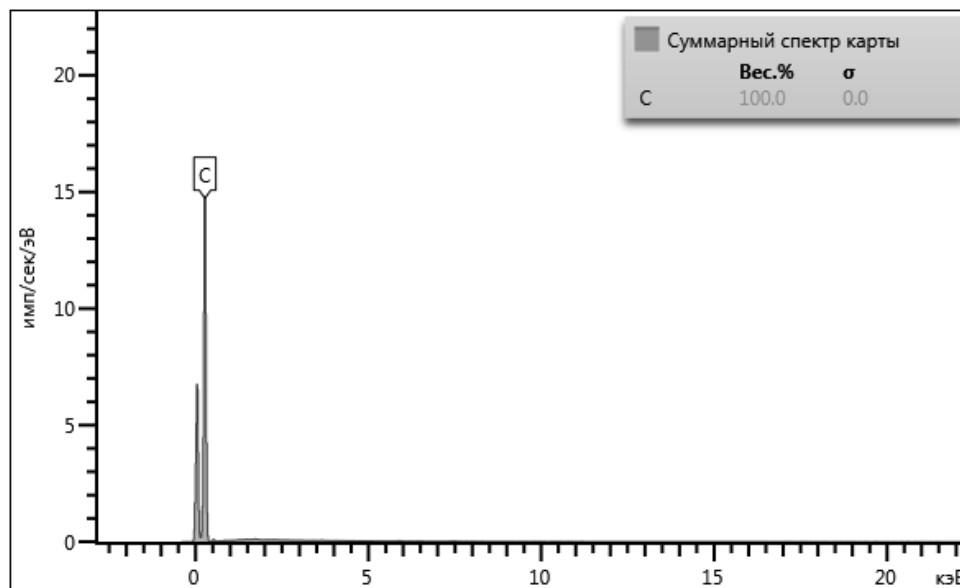
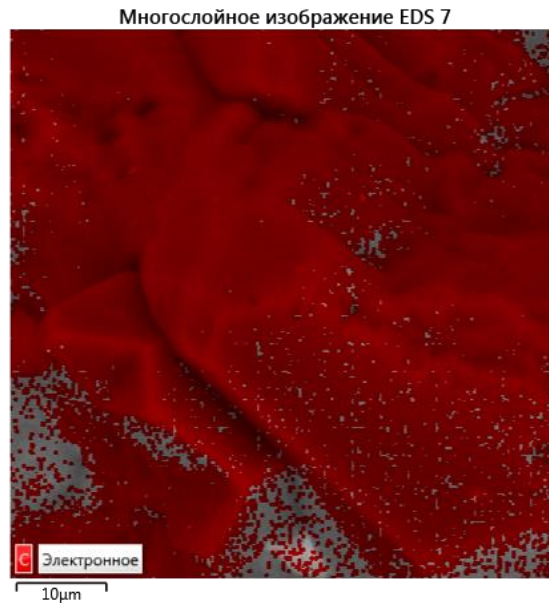
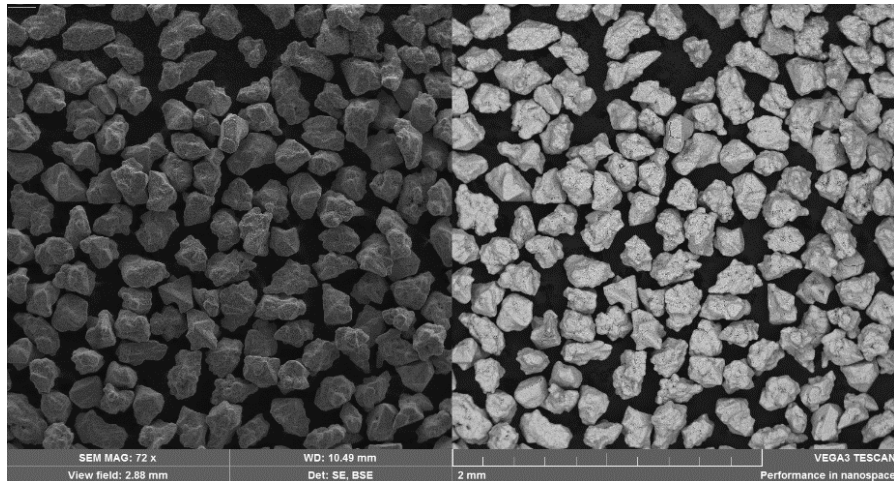


Рисунок 3.3 - Результаты химического анализа поверхности зерен алмазного шлифпорошка АС4, зернистостью 200/160

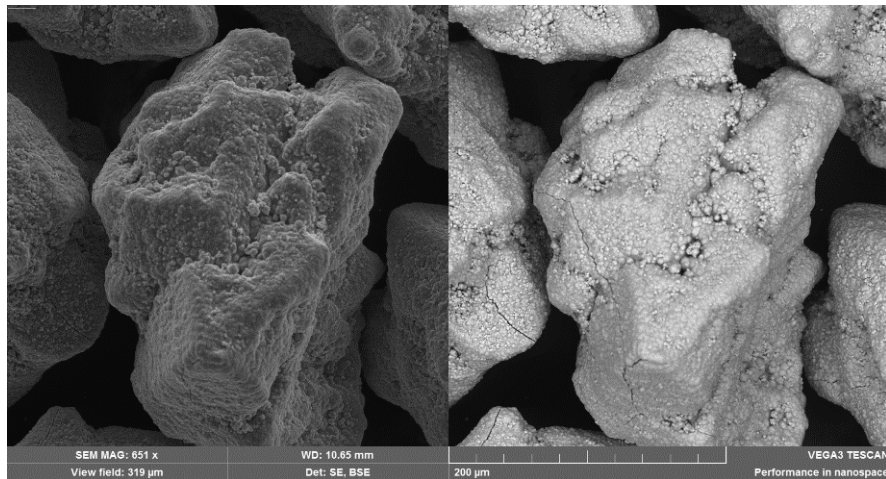
Аналогичным методом исследована поверхность алмазных зерен шлифпорошка АС4 зернистостью 200/160 с покрытием никелем, нанесённым электрохимическим методом с массовой долей 56%. На рис. 3.4 и 3.5 представлены электронно-микроскопические снимки и результаты

химического анализа поверхности, соответственно.



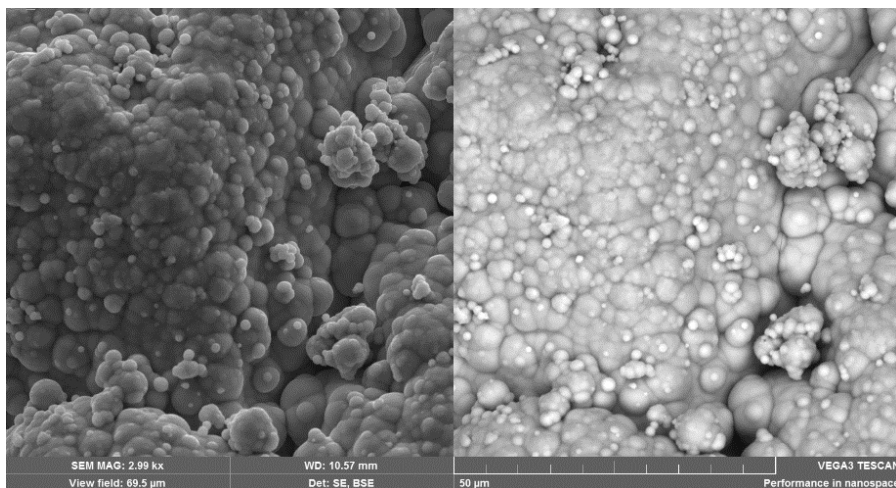
72x

а



651x

б



2990x

в

Рисунок 3.4 - Электронно-микроскопическое изображение алмазов марки АС4 200/160 с покрытием никелем: а – общий вид порошка; б – отдельное зерно; в – поверхность зерна

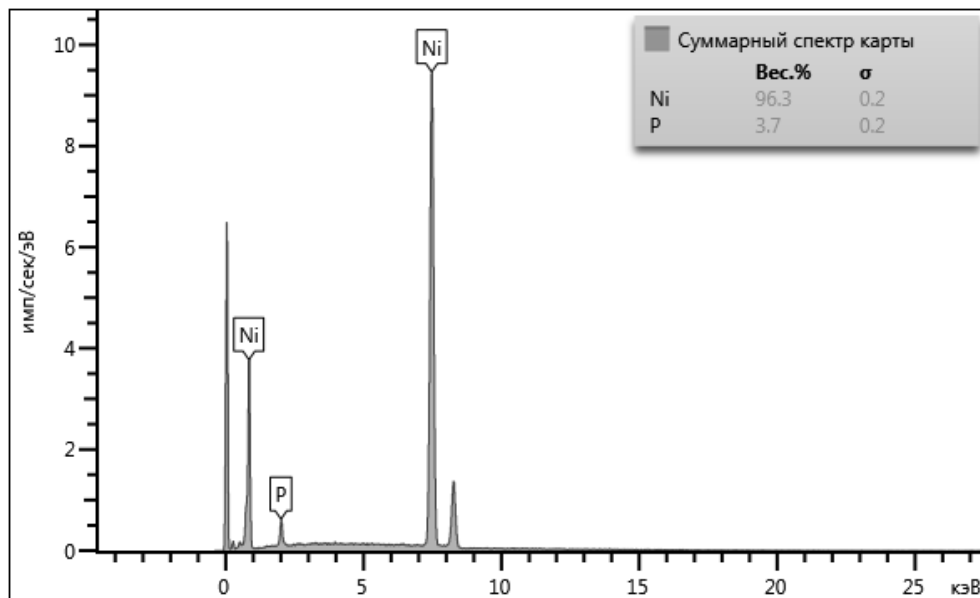
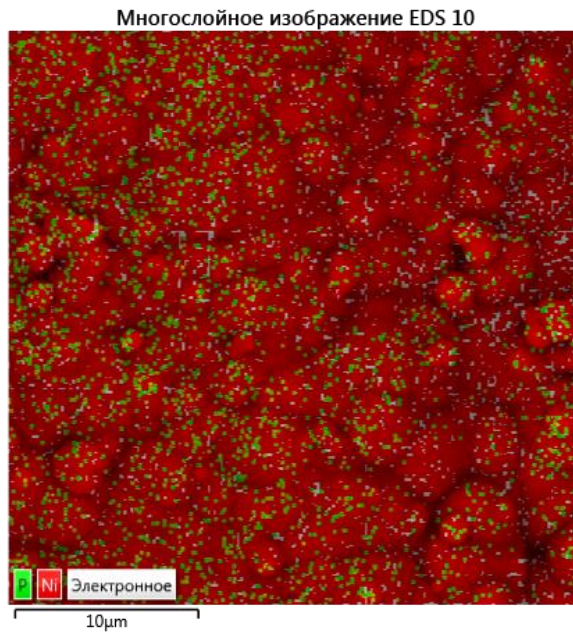


Рисунок 3.5 - Результаты химического анализа поверхности зерна алмазного шлифпорошка АС4, зернистостью 200/160 с покрытием никелем

Как видно на этих снимках, вся поверхность зёрен, включая дефектности, отмеченные в исходном состоянии, закрыта никелем. Об этом свидетельствуют и результаты химического анализа поверхности, приведенные на рис. 3.5. Отмечено, что поверхности зёрен имеют хорошо развитую микрогеометрию в виде многочисленных бугорков (полусфер). Они созданы специально регулированием условий осаждения покрытия для увеличения прочности закрепления зёрен в матрице за счет их механического

защемления. Известны и другие аналогичные решения, например, метод нанесения «шипообразного» никелевого покрытия [133].

### **3.2 Исследование особенностей взаимодействия компонентов композиционного алмазосодержащего материала на бакелитовом связующем**

Как подчеркивалось выше, важнейшим направлением повышения работоспособности алмазного инструмента является увеличение прочности удержания зерен в матрице. В свете этого, весьма важно изучение характера взаимодействия между алмазами и связующей. Изучен характер взаимодействия в процессе изготовления инструмента между компонентами алмазонасной части инструмента на бакелитовом связующем, оснащённом алмазами без покрытия и с покрытием никелем.

Исследования проводились с использованием рентгеновского дифрактометра D2 Phaser. Он представляет собой компактную систему для проведения широкого спектра анализов с высокоточным вертикальным гониометром и позволяет проводить анализ различных образцов, таких как порошки, тонкие пленки, труднорастворимые и легкоплавкие образцы. Дифрактометр оснащен современным программным обеспечением для съемки, идентификации фаз, нестандартного количественного фазового и структурного анализа и базами данных порошков.

Результаты исследования системы «алмаз-бакелитовое связующее» представлены в виде рентгенограмм образца №3 (серийный круг) - на рис. 3.6 и образца №4 (круг без алмазов) - на рис. 3.7. Анализ этих результатов не выявил взаимодействия бакелита с углеродом фазы алмаза.

## Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

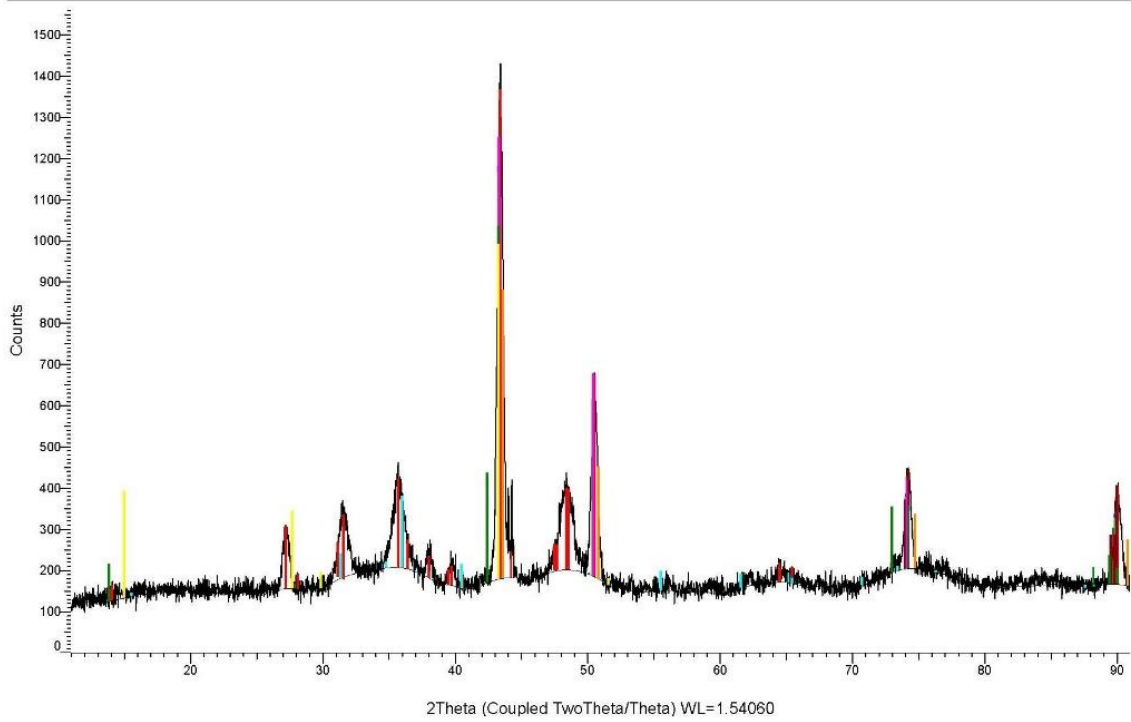


Рисунок 3.6 - Рентгенограмма образца №3 (серийный круг)

## Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

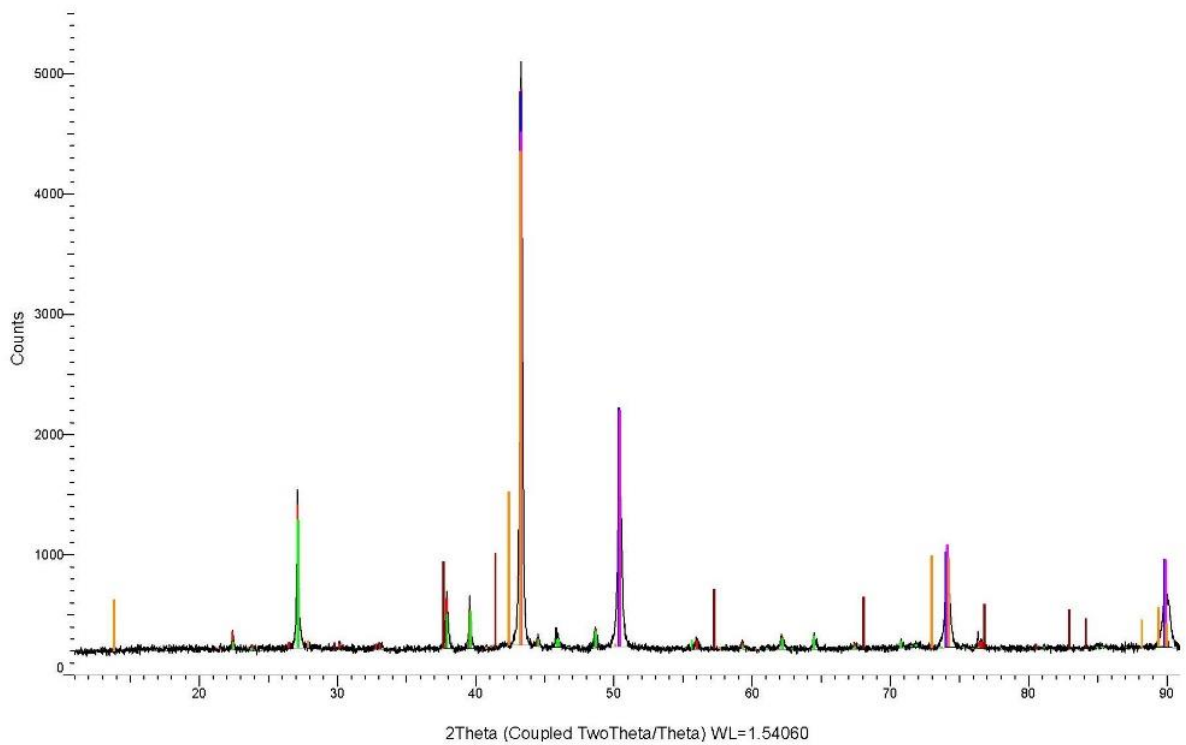


Рисунок 3.7 - Рентгенограмма образца №4 (круг без алмазов);

На рис. 3.8 приведена рентгенограмма образца №5 (круг с алмазами с покрытием). Её сравнение с рентгенограммой образца №4 (круг без алмазов), как и в предыдущем случае, не выявило взаимодействия никелевого покрытия алмаза с бакелитом.

Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

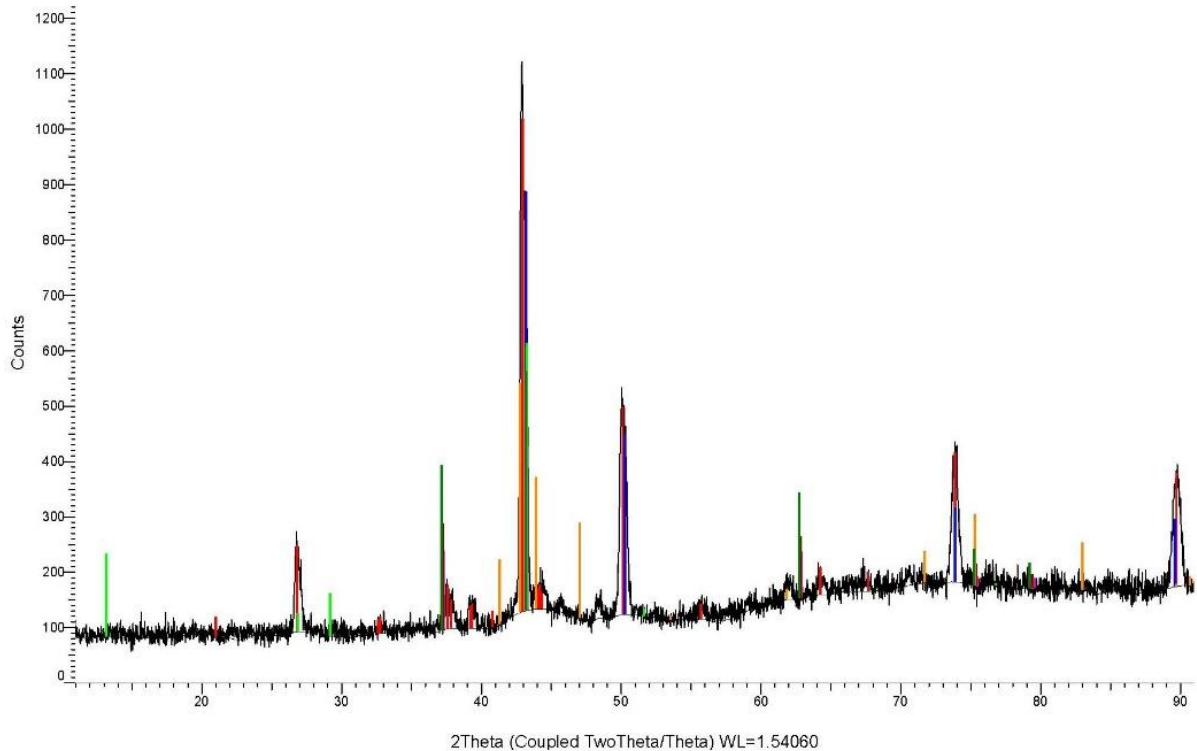


Рисунок 3.8 - Рентгенограмма образца №5 (круг с алмазами с покрытием)

Возможности взаимодействия никеля с другими компонентами связки – висмутом и медью – анализировали по соответствующим диаграммам состояния. По диаграмме состояния Vi-Ni (рис. 3.9), построенной на основании результатов дифференциально-термического, микроструктурного и рентгеноструктурного анализов, представленной в работе [21], можно видеть, что при температурах прессования и термообработки в процессе изготовления алмазных шлифовальных кругов 180-200°C, не происходит диффузионного взаимодействия висмута с никелем.

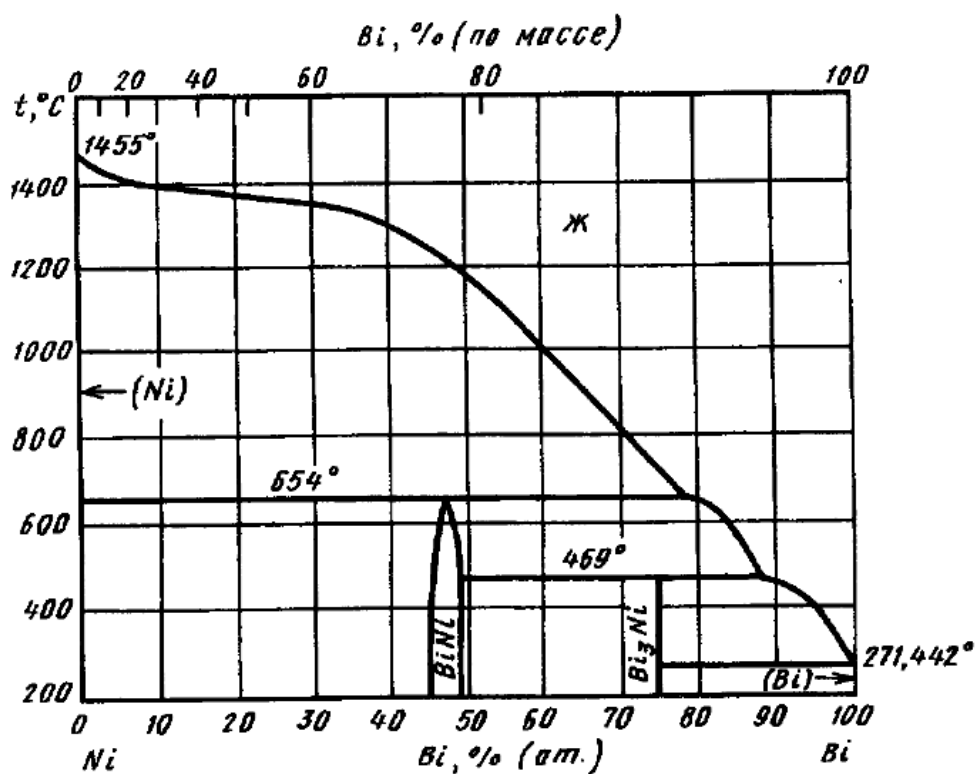


Рисунок 3.9 – Диаграмма состояния Bi-Ni

Компоненты Bi и Ni практически нерастворимы друг в друге в твердом состоянии. По данным работы [21] соединение  $\text{BiNi}$  имеет узкую область гомогенности с избытком Bi ( $51 \pm 0,3\%$  (ат.) Bi). Температуры перитектических реакций образования соединения  $\text{BiNi}$  и  $\text{Bi}_3\text{Ni}$  составляют  $646 \pm 0,2$  и  $467 \pm 0,2$  ( $^\circ\text{C}$ ). Соответственно, эвтектическая температура реакции  $\text{Bi}_3\text{Ni} + (\text{Bi})$  равна  $271 \pm 0,1^\circ\text{C}$ .

Диаграмма состояния Cu-Ni приведена на рис. 3.10. В работе [22] на основании расчетов, проведенных по термодинамическим константам, приведена граница расщепления твердого раствора и критическая точка несмешиваемости, соответствующая концентрации  $69,7\%$  (ат.) и температуре  $342^\circ\text{C}$ .



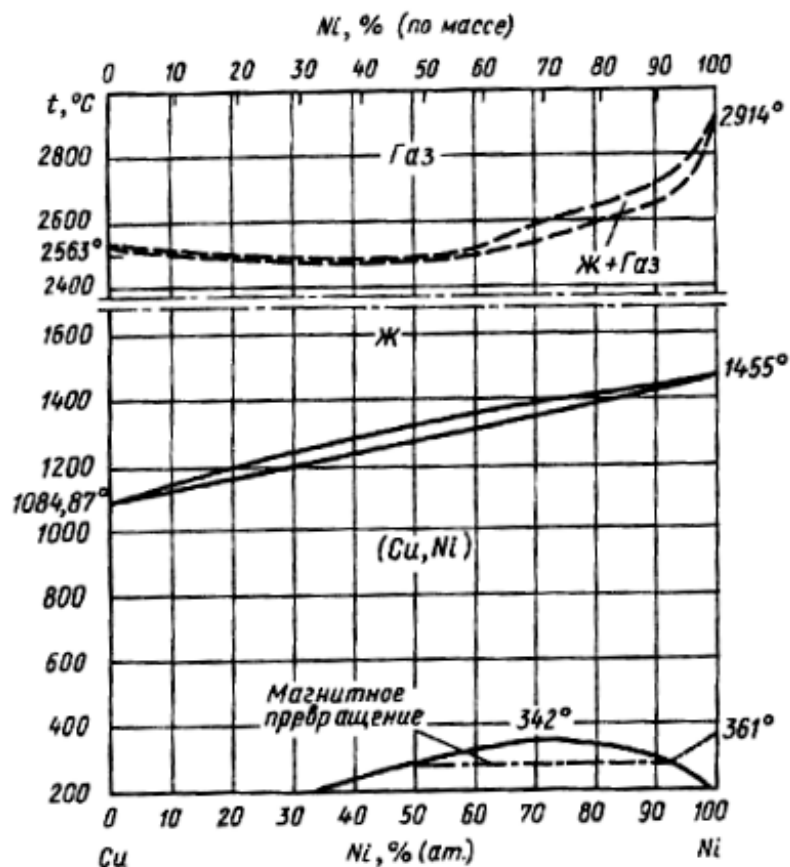


Рисунок 3.10 – Диаграмма состояния Cu-Ni

Таким образом, на основании проведенных исследований показано, что в процессе изготовления алмазных шлифовальных кругов на связке В1-01 с алмазами АС4 100% концентрации с никелевым покрытием не происходит химического взаимодействия компонентов рабочей (алмазоносной) части инструмента.

### 3.3 Выводы

1. Методом сканирующей электронной микроскопии изучены морфология и химический состав поверхности зерен алмазного шлифпорошка АС4 зернистостью 200/160 в исходном состоянии и с покрытием никелем массовой долей 56%. Показано, что исходный порошок состоит из отдельных зерен, агрегатов и сростков, на поверхности которых заметны поры, трещины и сколы. Никелевое покрытие закрывает всю поверхность зёрен, отмечается

развитая микрогеометрия поверхностей покрытия в виде многочисленных бугорков (полусфер), покрывающих практически всю поверхность зерна.

2. Методом рентгенофазового анализа исследован характер взаимодействия в процессе изготовления инструмента между компонентами композиционного алмазосодержащего материала на бакелитовой матрице на основе алмазов без покрытия и с покрытием никелем. Показано, что в обоих случаях все компоненты композита сохраняют свои особенности, не претерпевая никаких химических изменений.

## **ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АЛМАЗНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ НА ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕ**

Проведены экспериментальные исследования влияния на показатели работоспособности шлифовальных кругов на полимерном связующем никелевого покрытия на алмазы. Исследовалась работоспособность серийных кругов, оснащенных алмазными синтетическими монокристаллическими шлифпорошками АС4 на матрице В1-01 и аналогичных экспериментальных кругов с никелевым покрытием алмазных зерен.

### **4.1 Методика исследований**

В качестве основного показателя работоспособности кругов использовался удельный расход алмазов, который определялся в соответствии с ГОСТ 16181-82 как отношение массы израсходованного алмаза к объёму снятого с заготовки материала при плоском шлифовании. Кроме того, в процессе экспериментов контролировался другой показатель работоспособности кругов – шероховатость обработанной поверхности и оценивалось её соответствие требованиям указанного стандарта.

Перед экспериментами алмазные шлифовальные круги проверялись на соответствие требованиям стандартов. Контроль размеров кругов осуществляется с помощью штангенциркуля ШЦ-П-250-0,05, с ценой деления 0,05 мм и погрешностью  $\pm 0,025$  мм (ГОСТ 166-89). До установки на шлифовальный станок все круги проверялись на наличие трещин и сколов. Статическую балансировку алмазных шлифовальных кругов проводили на специальном стенде.

Обрабатывались заготовки из твердосплавной пластины ВК8 ГОСТ 19106-73, изготовленные из одной партии. Материал заготовки отвечал требованиям стандарта по физико-механическим свойствам и по химическому составу (см. табл. 4.1). Размеры шлифуемых поверхностей (рис. 4.1)

соответствуют требованиям ГОСТ 16181-82.

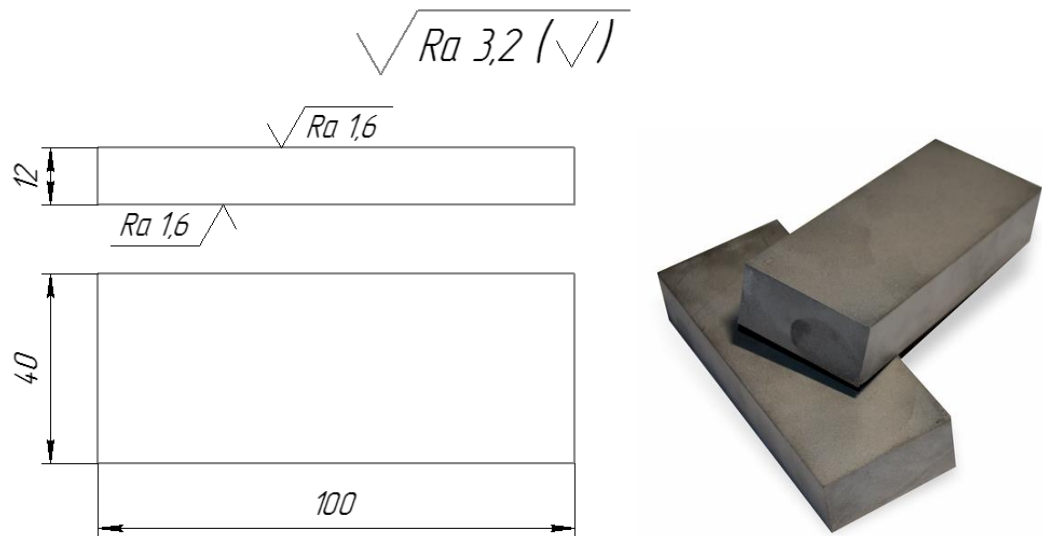


Рисунок 4.1 – Заготовки из твердосплавной пластины ВК8 ГОСТ 19106-73 для шлифования периферией круга

Таблица 4.1 – Характеристика твердого сплава ВК8 [98]

Марка сплава	Содержание основных компонентов, %		Физико-механические свойства		
	Карбид, вольфрама	Кобальт	Предел прочности при изгибе, МПа, не менее	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Твердость HRC, не менее
ВК8	92	8	1700	14,8	87,5

Испытания проводились с использованием охлаждающей жидкости (3%-ная водная эмульсия из эмульсола НГЛ-205 (ТУ38-1-242-69)), подаваемой в зону шлифования непрерывно с расходом жидкости 3-4 л/мин.

Контроль размеров заготовки до и после обработки осуществлялся штангенциркулем ШЦ-II-250-0,05 и микрометром МК 25 (ГОСТ 6507-90, цена деления 0,01 мм, диапазон измерения 0...25 мм, погрешность измерения  $\pm 0,002$  мм).

Измерение массы материала образца, сошлифованного за испытание, проводилось с использованием лабораторных электронных весов OHAUS NVL1101 (см. рис. 4.2). Технические характеристики весов представлены в таблице 4.2.



Рисунок – 4.2 Лабораторные электронные весы OHAUS NVL1101

Таблица 4.2 - Технические характеристики электронных весов OHAUS NVL1101

Наибольший предельный вес (НПВ), г	Дискретность, г	Воспроизводимость на НПВ, г	Нелинейность, г	Размеры весовой платформы, мм
1100	0,1	0,1	±0,2	190 × 138

При измерении радиального износа круга использовался многооборотный индикатор часового типа фирмы Mitutoyo 2109E-10, с ценой деления 0,001, с диапазоном измерения 0...1 мм, погрешностью измерения ±0,007 мм.

Экспериментальные исследования проводились на универсальном плоскошлифовальном станке модели 3Г71 (рис. 4.3). Индикатор для измерения радиального износа круга устанавливался в приспособление, смонтированное на верхней части защитного кожуха круга (рис. 4.4).

Перед началом испытаний станок проверялся на соответствие его нормам точности и жесткости, предусмотренным паспортом станка.

Режимы шлифования при испытаниях соответствовали требованиям ГОСТ 16181-82. Окружная скорость шлифовального круга составляла 28,3 м/с. Скорости продольной и поперечной подачи -  $S_{\text{прод}}=10$  м/мин и  $S_{\text{поп}}=2$  мм/дв.ход. Глубина резания  $t=0,02$  мм.



Рисунок 4.3 – Плоскошлифовальный станок модели 3Г71

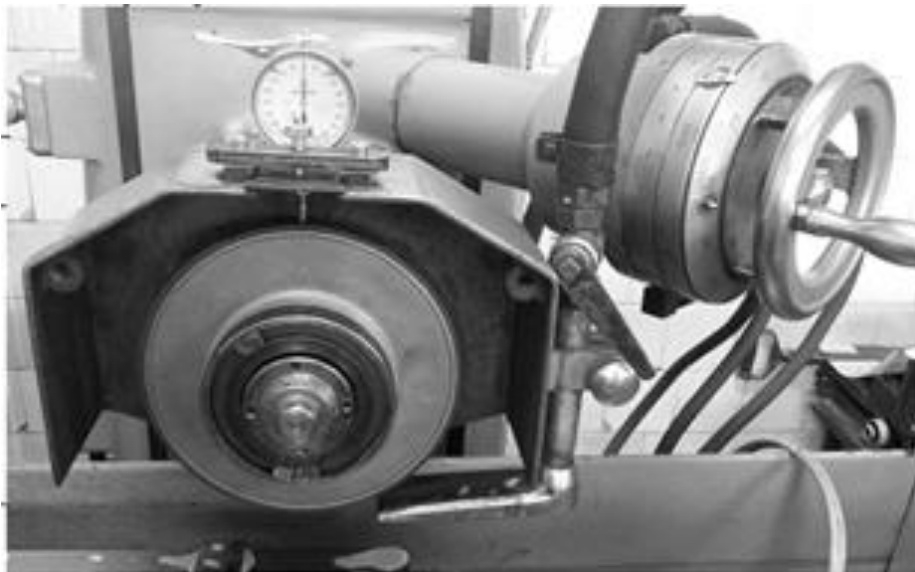


Рисунок 4.4 – Схема измерения радиального износа алмазоносного слоя круга

С целью выбора зазоров и разогрева масла в системе смазки станка шлифовальный круг приводили во вращение за 30 минут до начала испытаний.

На рис. 4.5 представлены основные этапы подготовки и проведения испытаний алмазных шлифовальных кругов в соответствии с ГОСТ16181- 82 [19].

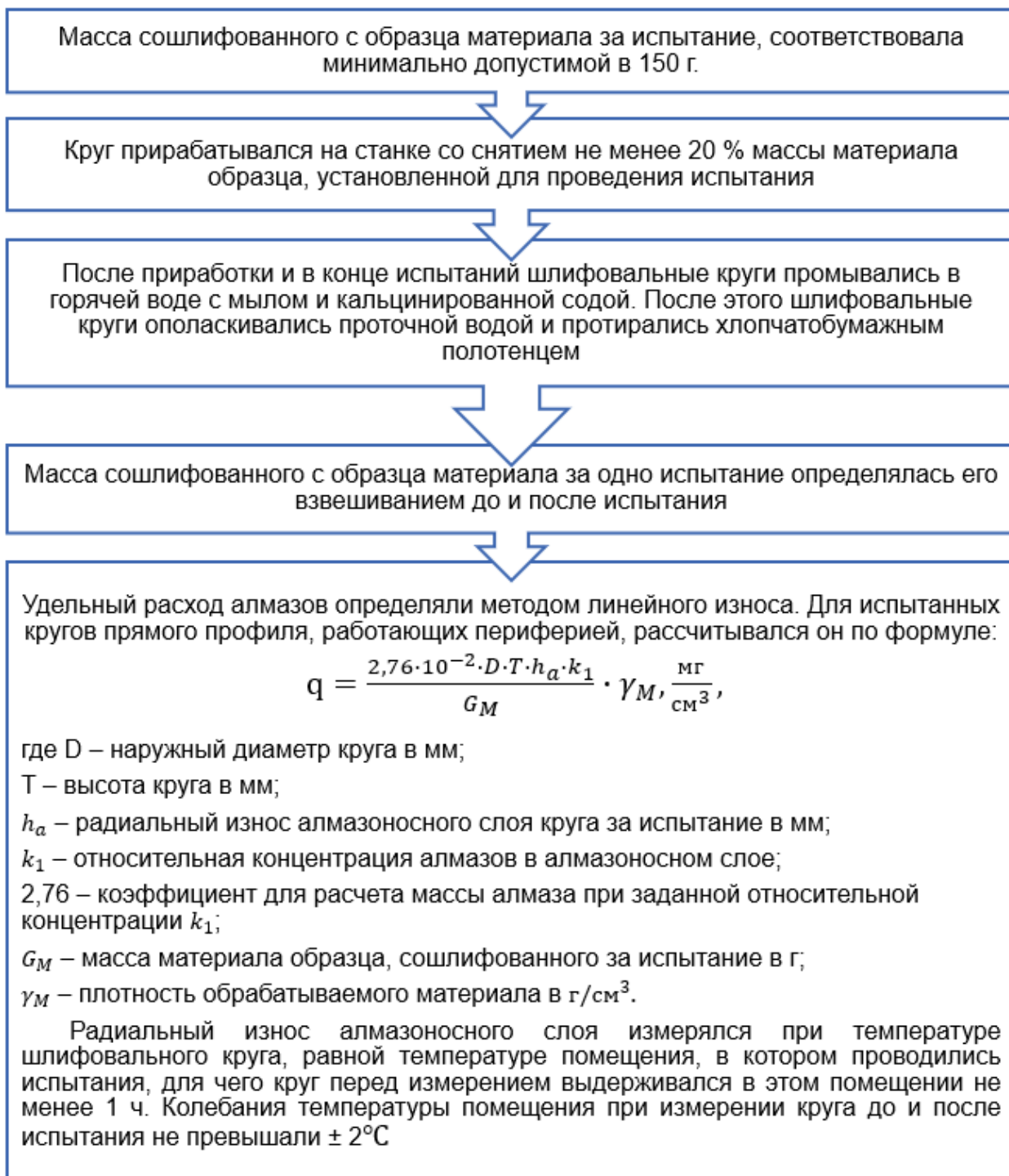


Рисунок 4.5 – Основные этапы подготовки и проведения испытаний кругов

Толщина слоя  $h$ , необходимого для снятия массы в 150 г, рассчитывалась по формуле:

$$h = \frac{1000 \cdot 150}{l \cdot b \cdot \gamma_M} = \frac{1000 \cdot 150}{100 \cdot 40 \cdot 14,8} = 2,533 \text{ мм},$$

где  $l$  и  $b$  – длина и ширина, мм;

$\gamma_M = 14,8 \text{ г/см}^3$  – плотность сплава марки ВК8.

Масса на приработку составила:

$$m_{\text{прир}} = 150 \cdot 0,20 = 30 \text{ г}.$$

Глубина снимаемого слоя, необходимого для приработки круга:

$$h = \frac{1000 \cdot 30}{100 \cdot 40 \cdot 14,8} = 0,5 \text{ мм}.$$

В соответствии с требованиями стандарта [19] контроль шероховатости шлифованной поверхности осуществлялся по параметру  $Ra$  - среднему арифметическому отклонению профиля, который измеряли на профилограф-профилометре модели 201. Шероховатость измерялась после 20 двойных ходов стола с заготовкой, в том числе 5 двойных ходов на выхаживание. При этом измерение осуществлялось не менее чем на 3 базовых линиях, перпендикулярных направлению шлифования. Погрешность измерения составляла 10-15%.

## 4.2 Экспериментальные исследования работоспособности алмазных шлифовальных кругов на полимерной матрице

В соответствии с изложенной выше методикой были проведены эксперименты по определению основного показателя работоспособности алмазных шлифовальных кругов - удельного расхода алмазов и шероховатости обработанной поверхности.

Для экспериментов были изготовлены по пять серийных 1A1 200×10×5×76 AC4 200/160 B1-O1 100 и экспериментальных 1A1 200×10×5×76 AC4 200/160 Ni56 B1-O1 100 кругов (см. табл. 3.1). Как



видно из обозначений серийные круги отличались от экспериментальных только алмазным оснащением (рис. 4.6).

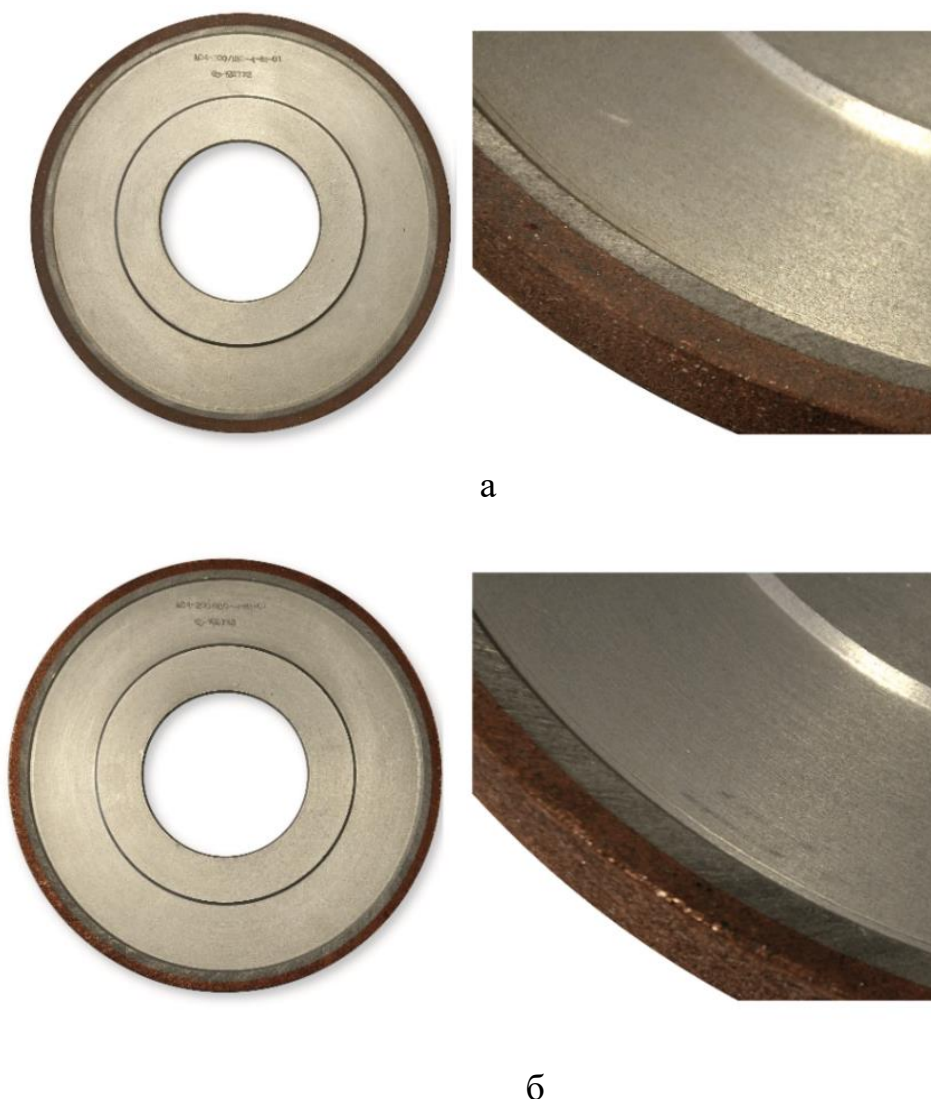


Рисунок 4.6 – Шлифовальные круги, оснащённые алмазами без покрытия (а) и с никелевым покрытием (б)

С использованием разработанной численной модели была проведена оценка эффективности покрытия никелем алмазов экспериментальных кругов для снижения температуры в контакте бакелита с покрытием.

Для этого, по методике, приведенной в [1], были определены расчетные размеры зерна: зерно шлифпорошка зернистостью 200/160 приводится к эллипсоиду вращения с полуосями, равными  $a=0,06$  мм,  $b=0,09$  мм (см. рис. 2.1). Значение удельного теплового потока  $q = 29,8 \times 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  определяли из

условия обеспечения максимальных температур в системе известным экспериментальным данным (см. разд. 2.1). Параметры расчетной модели (см. рис. 2.1) приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. - Параметры расчетной модели

Геометрические, мм							Тепловые	
$a$	$b$	$h_3$	$\delta$	$c$	$d$	$e$	$q, \frac{Вт}{м^2}$	$h, \frac{Вт}{м^2 \times град}$
0,060	0,090	0,054	0,012	2,00	2,00	2,00	$29,8 \times 10^6$	$5,0 \times 10^3$

На рис. 4.7. приведены результаты моделирования для разных толщин никелевого покрытия в виде картины распределения температуры по вертикальной оси алмаза.

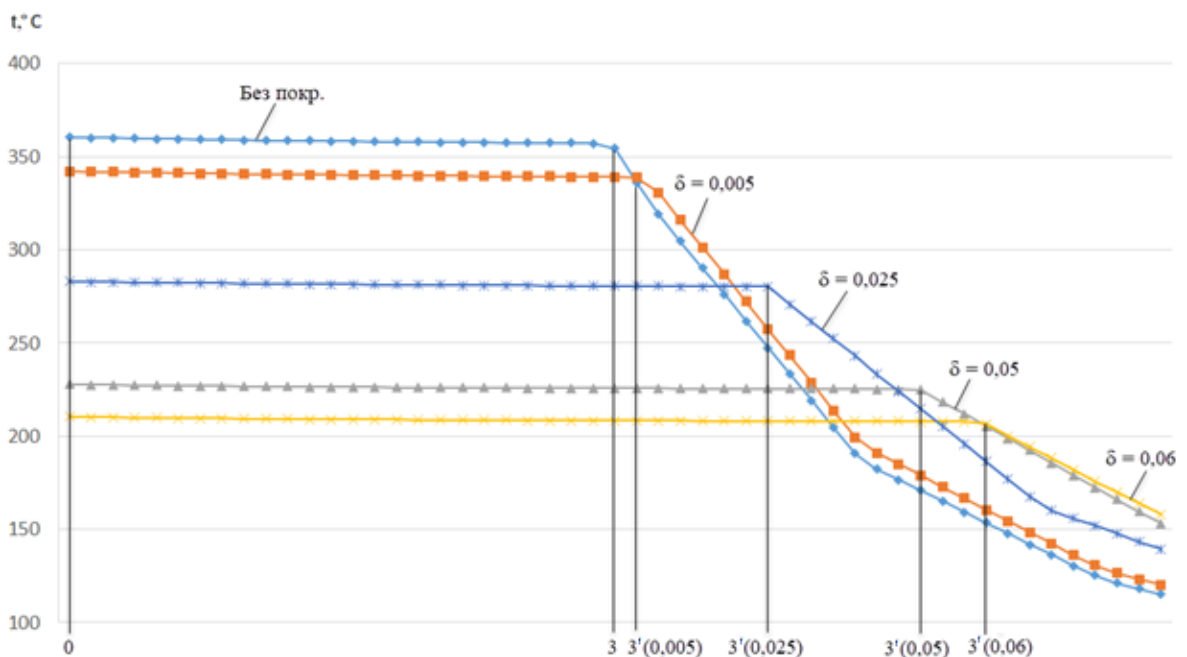


Рисунок 4.7 – Графики изменения температуры по вертикальной оси зерна при различных толщинах (мм) никелевого покрытия (плоскость YOX)

Массовой доле никелевого покрытия 56% на алмазных шлифпорошках зернистости 200/160 соответствует толщина покрытия на зернах порядка

0,012 мм [28, 105, 111].

По рис. 4.7, при отсутствии покрытия температура на границе покрытия и бакелитового связующего равна 363°C. При толщине покрытия 0,012 мм расчетная температура на указанной границе около 300°C. Расчетное снижение температуры составляет около 18%. Как видно по графикам на рис. 4.7, имеется существенный резерв снижения указанной температуры. Например, увеличением толщины покрытия до 0,05 мм можно было снизить расчетную температуру на границе покрытия и связующего до 220°C (на 40%).

Результаты экспериментальных исследований кругов по определению удельного расхода алмазов ( $q$ , мг/см<sup>3</sup>) представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты экспериментальных исследований кругов

Круги без покрытия		Круги с покрытием	
№	$q$ , мг/см <sup>3</sup>	№	$q$ , мг/см <sup>3</sup>
1	16,69	1	7,82
2	14,67	2	9,11
3	16,13	3	9,29
4	15,79	4	8,93
5	14,29	5	7,75
$q_{\text{ср}}$	15,51	$q_{\text{ср}}$	8,58

Как следует из таблицы среднее значение удельного расхода алмазов по результатам испытаний кругов с алмазами без покрытия составляет 15,51 мг/см<sup>3</sup>, а кругов, оснащенных алмазами с никелевым покрытием, – 8,58 мг/см<sup>3</sup>. Таким образом, удельный расход алмазов экспериментальных кругов в 1,81 раза ниже, чем серийных.

Отметим, что контроль шероховатости обработанной поверхности в процессе экспериментов не выявил отклонений от требования стандарта — среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$  не превышал 1,25 мкм.

Таким образом, испытания показали, что круги на основе алмазов с никелевым покрытием имеют существенно более высокую работоспособность, чем серийные круги.

Подчеркнём, что этот эффект не связан со смачиванием и адгезией бакелита к алмазу и к никелю (см. разд. 1). Исключаются и химические изменения в композитах на основе алмазов без покрытия и с покрытием в процессе изготовления инструмента (см. разд. 3).

Как было отмечено в разд. 2, система «алмаз-полимерная матрица» отличается большим градиентом механических и теплофизических свойств элементов. В таблице 4.5 приведены значения модуля упругости  $E$ , коэффициента Пуассона  $\nu$ , коэффициента теплового расширения  $\alpha$ , коэффициента теплопроводности  $\lambda$  и удельной теплоёмкости  $c$  алмаза, никеля и бакелита [98, 99].

Таблица 4.5 – Свойства алмаза, никеля и бакелита

Характеристики	Алмаз	Никель	Бакелит
$E, \text{ГПа}$	900	200	4
$\nu$	0,072	0,28	0,30
$\alpha \times 10^6, \frac{1}{\text{град}}$	1,05	13,4	70
$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$	146,5	65	0,18
$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	502	500	1600

Введение в эту систему никеля в качестве покрытия на алмаз существенно снижает указанный градиент. Покрытие, как было показано в разделе 2, оказывает существенное влияние на поля температур, напряжений

и деформаций в системе и подбором параметров покрытия можно добиться снижения тепловой нагрузки на связующее.

Считаем, что эффективность шлифовальных кругов, оснащенных алмазами с покрытием связана с уменьшением тепловой нагрузки на связующее в процессе эксплуатации инструмента и с лучшим механическим заземлением зерен с покрытием вследствие большей развитости их поверхностей. Эти два фактора обеспечивают более высокую прочность закрепления алмазов с покрытием в инструменте, по сравнению с зёрнами без покрытия.

### **4.3 Выводы**

1. Проведены экспериментальные исследования удельного расхода алмазов кругов на бакелитовом связующем, оснащенных алмазами без покрытия и с покрытием никелем. Эксперименты показали, что удельный расход алмазов кругов на основе зёрен с покрытием в 1,81 раза меньше, чем у кругов с алмазами без покрытия. При этом, моделирование показало, что при заданной толщине никелевого покрытия расчетное снижение температуры на границе покрытия и связующего составляет около 18%, и имеется резерв снижения указанной температуры за счет увеличения толщины покрытия.

2. Полученный результат связывается с повышением прочности удержания зёрен в матрице инструмента за счет никелевого покрытия, обеспечивающего снижение тепловой нагрузки на бакелит и имеющего более развитую микрогеометрию поверхности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выполненных исследований в работе решена актуальная научно-техническая задача по повышению работоспособности алмазных шлифовальных кругов на полимерной матрице. Для этого проведено комплексное исследование алмазоносной части инструмента. Численным моделированием получено системное представление о полях температур, напряжений и деформаций в композите при действии силовых и тепловых возмущений от процесса резания. Экспериментально изучены морфология и химический состав поверхности алмазных зёрен в исходном состоянии и с покрытием никелем, а также проведены структурные исследования композита на бакелитовом связующем с указанными алмазами.

Совокупность полученных результатов позволяет сделать следующие **выводы:**

1. Разработана трехмерная конечно-элементная модель для расчета стационарных полей температур, напряжений и деформаций в системе «алмаз-покрытие-матрица» с использованием программного комплекса SolidWorks, позволяющая варьировать физическими свойствами элементов, геометрией системы и параметрами силовых и тепловых возмущений на неё.

2. Численным моделированием установлено, что в процессе эксплуатации инструмента на бакелитовой матрице алмаз практически равномерно прогревается по всему объему, а уровень температур в системе «алмаз-матрица» существенно зависит от теплопроводности матрицы.

3. Исследования показали, что с увеличением теплопроводности материала покрытия на зерно значения температур в алмазе падают и одновременно уменьшается градиент температуры по толщине покрытия. Такая тенденция сохраняется до значения коэффициента теплопроводности покрытия  $\approx 4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$ , выше которого температуры в зерне и покрытии выравниваются и не изменяются. Показано, что при увеличении толщины

никелевого покрытия температуры в зерне и, соответственно, на границе покрытия и матрицы снижаются.

4. Исследовано напряженно-деформированное состояние системы «алмаз-полимерная матрица» под действием сил резания и его зависимость от модуля упругости материала матрицы. Получены закономерности изменения напряжений в зависимости от степени погружения зерна в матрицу и угла наклона зерна.

5. Установлено что температурные напряжения значительно превышают напряжения от силовых воздействий. Определены закономерности распределения температурных напряжений в системе «алмаз-полимерная матрица». Показано, что максимальная интенсивность температурных напряжений имеет место на границе раздела зерна и матрицы.

6. Исследования показали, что в композитах на полимерной матрице на основе алмазов с покрытием температурные напряжения значительно выше, чем с алмазами без покрытия. Отмечено, что максимальные напряжения имеют место на границе раздела зерна и покрытия, а напряжения на границе покрытия и матрицы в несколько раз меньше.

7. Получены закономерности распределения температурных напряжений в системе при использовании различных покрытий. Для случая использования никелевого покрытия показано, что с увеличением его толщины напряжения в системе снижаются. Для различных покрытий на алмазные зёрна получены зависимости температурных напряжений от коэффициентов теплопроводности и теплового расширения материала матрицы.

8. Результаты исследования температур и напряженно-деформированного состояния в системе «алмаз-покрытие-полимерная матрица» позволяют определить параметры системы, обеспечивающие снижение температур на границе покрытия и матрицы, температурных напряжений в системе, и, соответственно, повышение прочности удержания алмазных зёрен в рабочей части инструмента.

9. Методом сканирующей электронной микроскопии изучены морфология и химический состав поверхности зерен алмазного синтетического шлифпорошка АС4 зернистостью 200/160 в исходном состоянии и с покрытием никелем. Отмечено, что покрытие закрывает всю поверхность зёрен, в том числе дефектности в виде пор и трещин, и создает развитую микрогеометрию поверхностей зерен.

10. Методом рентгенофазового анализа исследован характер взаимодействия в процессе изготовления инструмента между компонентами композиционного алмазосодержащего материала на бакелитовой матрице на основе алмазов без покрытия и с покрытием никелем. Показано, что в обоих случаях все компоненты композита сохраняют свои особенности, не претерпевая никаких химических изменений.

11. Проведены экспериментальные исследования удельного расхода алмазов кругов на бакелитовом связующем, оснащенных алмазами без покрытия и с покрытием никелем. Эксперименты показали, что удельный расход алмазов кругов на основе зёрен с покрытием в 1,81 раза меньше, чем кругов с алмазами без покрытия. Полученный результат связывается с повышением прочности удержания зёрен в матрице инструмента за счет никелевого покрытия, обеспечивающего снижение тепловой нагрузки на бакелит и имеющего более развитую микрогеометрию поверхности.

12. Результаты работы используются в АО «Терекалмаз» при выборе параметров покрытий на алмазные синтетические шлифпорошки, применяемые для изготовления шлифовальных кругов на полимерных связующих. Отдельные результаты работы используются в учебном процессе в Кабардино-Балкарском государственном университете при подготовке магистров направления подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».



**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Абразивная и алмазная обработка материала. Справочник. / Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 392 с.
2. Александров, В.А. Изучение нестационарного температурного поля алмазного круга при резании с охлаждением / В.А. Александров, В.А. Мечник, А.В. Верхоярный. // Сверхтвердые материалы. –1989. – №1. – С. 40–45.
3. Александров, В.А. Температурное поле, термоупругое состояние и износ алмазного круга при резании с охлаждением / В.А. Александров, А.Н., Жуковский, В.А. Мечник. // Трение и износ. – 1991. – №3.
4. Алямовский, А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation/ А. А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
5. Анализ влияния металлизации алмазов на эффективность использования инструментов / З.Ж. Беров, Б.С. Хапачев, Р.М. Нартыжев, А.З. Беров. // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. Том V, – №1, – 2015. – С. 38–41.
6. Анализ теплового режима рабочей поверхности однослойного инструмента из СТМ методом конечных элементов / А.Е. Шило, В.И. Куш, В.А. Дудка [и др.]. // Сверхтвердые материалы. – 1989. – №5. – С. 38–41.
7. Андреев, В.И. Некоторые задачи и методы механики неоднородных тел: монография / В.И. Андреев. – М.: Издательство АСВ, 2002. – 288 с.
8. Андреева, А.В. Основы физикохимии и технологии композитов: Учеб. пособие для вузов/ А.В. Андреева. – М.: ИПРЖР, 2001. – 192 с.
9. Антонюк, В.С. О снижении остаточных напряжений в вакуум-плазменных покрытиях дискретной структуры / В.С. Антонюк, Б.А. Ляшенко, Е.Б. Сорока, А.В. Рутковский. // Сверхтвердые материалы. –2005, – №2. С. 72–75.
10. Артеменко, С.Е. Связующие для полимерных композиционных материалов / С.Е. Артеменко, Л.Г. Панова. – Саратов: СГТУ, 1994. – 98 с.

11. Байкалов, А.К. Введение в теорию шлифования материалов / А.К. Байкалов. – Киев: Наукова думка, 1978. – 207 с.
12. Бартенев, Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров / Г.М. Бартенев. – М.: Химия, 1984. – 345 с.
13. Берлин, А.А. Основы адгезии полимеров/ А.А. Берлин, В.Е. Басин – М.: Химия, 1974. – 392 с.
14. Брандон, Д. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля / Д. Брандон, У. Каплан. – М.: Техносфера, 2006. – 384 с.
15. Васильев, В.В. Механика конструкций из композиционных материалов/ В.В. Васильев – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
16. Винокуров, Г.Г. Износостойкость шлифовальных кругов из алмазосодержащих материалов инструментального назначения / Г.Г. Винокуров, Н.Ф. Стручков. // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т.7. – №S1 – 1. – С. 430–432.
17. Возможность повышения прочности удержания алмазов в связке / Г.П. Богатырева, Г.Ф. Невструев, Г.Д. Ильницкая [и др.]. // Сверхтвердые материалы. – 2001. – №2. – С. 21–25.
18. Воронин, Г.А. Термические напряжения в материалах на основе абразива и связующего / Г.А. Воронин, А.Е. Шило. // Сверхтвердые материалы. – 1982. – №5. – С. 19–22.
19. ГОСТ 16181-82. Межгосударственный стандарт. Круги алмазные шлифовальные. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. – 28с.
20. Деунежев, З.Н. Снижение тепловой нагрузки на полимерную матрицу алмазных шлифовальных кругов / З.Н. Деунежев. // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. Т. XII, №1. Нальчик: Каб.-Балк. Ун-т. – 2022. – С. 43–48.
21. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: Н.П. Лякишев (ред.). / В 3 т.: Т. 1 – М. Машиностроение, 1996. – 992 с.
22. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: Н.П. Лякишев (ред.). / В 3 т.: Т. 2 – М. Машиностроение, 1996. – 1021с.

23. Дувакина, Н.И. Выбор наполнителей для придания специальных свойств полимерным материалам/ Н.И. Дувакина, Н.И. Ткачёва. // Пластические массы. – 1989. – №11. – С. 46–48.
24. Емельянов, Б.М. Взаимодействие органической связки с поверхностью металлизированных алмазов / Б.М. Емельянов, З.Р. Ульберг, Л.М. Когосов. // Синтетические алмазы. – 1974. – Вып. 3. – С. 16–19.
25. Журавлев, В.В. Влияние металлизации на прочность алмаза и величину внутренних напряжений системы алмаз-металл / В.В. Журавлев. // В сб. Повышение эффективности применения алмазных инструментов. – М. Труды ВНИИалмаза. –1986. – С. 50–56.
26. Зубчанинов, В.Г. Основы теории упругости и пластичности / В.Г. Зубчанинов. – М.: Высш. шк., 1990. – 368 с.
27. Зуев, В.В. Физика и химия полимеров / В.В. Зуев, М.В. Успенская, А.О. Олехнович. // Учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 45 с.
28. Инструмент из металлизированных сверхтвердых материалов / Е.М. Чистяков, А.А. Шепелев и [и др.]. - Киев: Наук. думка, 1982. – 204 с.
29. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. – М: Машиностроение, 2014. – 608 с.
30. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под. ред. Н.В. Новикова. – М.: Машиностроение, 2005. – 555 с.
31. Исследование межфазной границы алмаз-матрица методами электронной спектроскопии / Д.П. Валюхов, В.Я. Зленко, А.Э. Зорькин [и др.]. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2004. – №11. – С. 87–89.
32. Исследование температурных напряжений в инструментальном алмазосодержащем композите/ М.М. Яхутлов, У.Д. Батыров, М.Р. Карданова и [др.]. // Вестник Брянского государственного технического университета. Брянск. – 2014. – №3. – С. 99–103.
33. Исследование теплового режима в композиционном алмазосодержащем материале на полимерном связующем / М.М. Яхутлов, У.Д. Батыров, М.Р.

- Карданова и [др.]. // Качество. Инновации. Образование. – 2016. – №8–10. – С.112–119.
34. Калініченко, В.І. Моделювання термопружинного стану різального інструменту / В.І. Калініченко. // Сверхтвердые материалы. – 2005. – №1. С. – 78-80.
35. Кебко, В.П. Исследование условий прочного закрепления алмазных зерен в металлической матрице, содержащей активные компоненты / В.П. Кебко, Э.Д. Кизиков, И.П. Кушталова. // Сверхтвердые материалы. –1994. – №5. – 6. – С. 32–36.
36. Кноп, А. Фенольные смолы и материалы на их основе / А. Кноп, В. Шейб. // Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 320 с.
37. Кныш, С.В. Выбор формы зерна при моделировании процессов шлифования / С.В. Кныш, В.А. Склепчук. // Резание и инструмент. – 1988. – Вып. 39. – С. 95–98.
38. Композиционные материалы. Справочник / Под ред. Д.И. Карпинос. – Киев: Наук. думка, 1985. – 592 с.
39. Корн, Г. Справочник по математике: Пер. с англ. / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1977. – 836 с.
40. Корнилов, Ю.П. Испытания алмазных порошков на прочность / Ю.П. Корнилов, В.И. Ноздрачев. // Алмазы и сверхтвердые материалы. – 1983. – №1. – С. 10–12.
41. Костиков, В.И. Сверхвысокотемпературные композиционные материалы / В.И. Костиков, А.Н. Варенков. – М.: Интермет Инжиниринг, 2003. – 558 с.
42. Курдюков, В.И. Научные основы проектирования абразивного инструмента/ В.И. Курдюков. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2005. – 159 с.
43. Куш, В.И. Математическая модель теплопереноса в системе зерно-покрытие-полимерная связка / В.И. Куш, А.Е. Шило, В.Т. Чалый. // Сверхтвердые материалы. – 2003. – №5. – С. 49–59.

44. Лавриненко, В.И. Инструменты из сверхтвердых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки/ В.И. Лавриненко, В.Ю. Солод. – Каменское: ДГТУ, 2016. – 529 с.
45. Лавриненко, В.И. Модели формы зерен СТМ / В.И. Лавриненко, А.А. Шепелев, Г.А. Петасюк. // Сверхтвердые материалы. –1994. – №5–6. – С. 18–21.
46. Липатов, Ю.С. Физическая характеристика наполненных полимеров/ Ю.С. Липатов – М.: Химия, 1977. – 304 с.
47. Лоладзе, Т.Н. Износ алмазов и алмазных кругов / Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучава. – М.: Машиностроение, 1967. – 112 с.
48. Лошак, М.Г. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния вольфрамовых твердых сплавов после спекания / М.Г. Лошак, С.Б. Полотняк, Л.И. Александров. // Сверхтвердые материалы. – 2005. – №4. – С. 30–40.
49. Майстренко, А.Л. Формирование структуры композиционных алмазосодержащих материалов в технологических процессах/ А.Л. Майстренко. – К.: Наук. думка, 2014. – 344 с.
50. Малышев, В.И. Контактные температуры при алмазной правке шлифовальных кругов / В.И. Малышев, Ю.М. Янюшкин. // Сверхтвердые материалы. – 1986. – №5. – С. 48–54.
51. Маслов, Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. – М., Машиностроение, 1974. – 320 с.
52. Механизм износа алмаза в правящем алмазном инструменте. Х.Г. Тхагапсоев, Б.С. Хапачев, Ю.П. Хапачев [и др.]. // Алмазы сверхтвердые материалы. – 1982. – №3. – С. 3–6.
53. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 342 с.
54. Моделирование напряженно-деформированного состояния алмазного инструмента при действии сил резания/ М.М. Яхутлов, У.Д. Батыров, А.Х.

Тлибеков и [др.]. // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. - Т. V, – 2015. – №5. – С. 66–70.

55. Моделирование температурных напряжений в алмазных шлифовальных кругах / З.Н. Деунежев, М.Р. Карданова, А.Р. Бечелова [и др.]. // Качество. Инновации. Образование. – 2022. – № 4. – С. 38–43.

56. Моделювання рівня температури в породоруйнівних елементах бурових коронок / В.А. Дутка, В.М. Колодніцький, С.Д. Заболотний [и др.] // Сверхтвердые материалы. – 2004. – №2. – С. 66–73.

57. Найдич, Ю.В. Прочность алмазметаллического контакта и пайка алмазов/ Ю.В. Найдич, В.П. Уманский, И.А. Лавриненко. – Киев: Наук. думка, 1988. – 136 с.

58. Нанесение металлических покрытий на порошки СТМ с помощью магнетронного распылителя / Е.М. Чистяков, Б.И. Полупан, Г.Я. Пипкевич, А.Г. Зеберин. // Сверхтвердые материалы. – 1985. – №1. – С. 38–39

59. Наполнители для полимерных композиционных материалов. / Под ред. Г.С. Каца, Д.В. Микевски., пер. с англ. – М.: Химия, 1981. – 736 с.

60. Направленное формирование межфазной границы алмаз-матрица с использованием нанопокровов / М.М. Яхутлов, Б.С. Карамурзов, З.Ж. Беров и [др.]. // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2011. - Т. 1, – №4. – С. 23–25.

61. Напряженно-деформированное состояние системы зерно-матрица алмазного инструмента при силовых возмущениях / М.М. Яхутлов, Б.С. Карамурзов, У.Д., Батыров и [др.]. // Сверхтвёрдые материалы. – 2009. – №6. – С. 81–88.

62. Напряженное состояние в зоне взаимодействия зерна со связкой круга / В.И. Лавриненко, В.Н. Кулаковский, Н.В. Ломашевская [и др.]. // Сверхтвердые материалы. – 1995. – №4 – С. 46–49.

63. Никитин, А.В. Совершенствование физико-химических характеристик абразивных композитов на бакелитовой связке кремний-органическими аппретами и матричными модификаторами / А.В. Никитин, А.А. Разумов. // В

- сб.: Научно-исследовательская деятельность в классическом университете: теория, методология, практика. – Иваново: ИвГУ. – 2001. – С. 186–187.
64. Никулин, Н.И. Исследование сил, возникающих при микрорезании хрупких материалов / Н.И. Никулин. // Синтетические алмазы. – 1978. – №5. – С. 52–57.
65. Нильсен, Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций/ Л. Нильсен. – М.: Химия, 1978. – 312 с.
66. Носов, Н.В. Повышение эффективности и качества абразивных инструментов путем направленного регулирования их функциональных показателей: Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08, 05.03.01 / Носов, Николай Васильевич; Самарский гос. техн. ун-т. – Самара, 1997. – 46 с.
67. О термоупругих напряжениях, возникающих в кристаллах алмаза при правке абразивных кругов / Х.Г. Тхагапсоев, М.М. Ошхунов, Б.С. Хапачев, В.А. Наурзоков. // Сверхтвердые материалы. – 1984. – №4. – С. 58–61.
68. Олейников, А.Б. Влияние напряженно-деформированного состояния контакта зерно-связка на работоспособность кругов с режущим слоем из АЛШЛ / А.Б. Олейников, И.К. Сенченков, И.Г. Рубцова. // Сверхтвердые материалы. – 1987. – №5. – С. 45–49.
69. Олейников, А.Б. Работоспособность алмазных эластичных кругов при шлифовании газотермических покрытий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Олейников Андрей Борисович; Ин-т сверхтвердых материалов. – Киев, 1990. – 21 с.
70. Определение контактной температуры при правке абразивных кругов алмазным инструментом/ Х.Г. Тхагапсоев, М.Х. Шхануков, Б.С. Хапачев, М.Х. Абрегов. // Сверхтвердые материалы. – 1983. – №4. – С. 44–48.
71. Орлова, Т.Н. Повышение эффективности обработки отрезными бакелитовыми кругами путем совершенствования их физико-механических характеристик: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Орлова Татьяна Николаевна; Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов, 2006. – 147 с.

72. Оробинский, В.М. Абразивные методы обработки их оптимизация/ В.М. Оробинский. – М.: Машиностроение, 2000. – 314 с.
73. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / Ковальчук, Ю.М., Букин, В.А., Глаговский, Б.А. [и др.]. // Под общей ред. Ю.М. Ковальчука – М.: Машиностроение, 1984. – 288 с.
74. Основы теплофизики и реофизики полимерных материалов / В.П. Привалко, В.В. Новиков, Ю.Г. Яновский; Отв. ред. О.В. Романкевич. – Киев: Наук. думка, 1991. – 232 с.
75. Особенности математического моделирования алмазных инструментов/ М.М. Яхутлов, Б.С. Карамурзов, У.Д., Батыров, М.Р. Карданова. // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2012. – Т.П, – №4. – С. 32–35.
76. Панова, Л.Г. Наполнители для полимерных композиционных материалов: учеб. пособие / Л.Г. Панова. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. – 68 с
77. Петасюк, О.У. О поведении алмазного зерна в связке под действием нагрузки/ О.У. Петасюк. // В сб. Исследование и применение сверхтвердых и тугоплавких материалов. – Киев: ИСМ АН УССР. – 1981. – С. 106–110.
78. Победря, Б.Е. Механика композиционных материалов / Б.Е. Победря. – М.: Издательство МГУ, 1984. – 336 с.
79. Полимерные композиционные материалы в триботехнике/ Ю.К. Машков, З.Н. Овчар, М.Ю. Байбарацкая, О.А. Мамаев. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. – 262 с.
80. Получение, свойства и применение порошков алмаза и кубического нитрида бора / В.Б. Шипило, Е.В. Звонарев, А.М. Кузей [и др.]. // Под ред. П.А. Витязя. – Мн.: Бел. Навука, 2003. – 335 с.
81. Поляков, В.П. Алмазы и сверхтвердые материалы/ В.П. Поляков, А.В. Ножкина, Н.В. Чириков. – М.: Металлургия, 1990. – 327 с.



82. Попов, С.А., Малевский, Н.П., Терещенко, Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов/ С.А. Попов, Н.П. Малевский, Л.М. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с.
83. Применение метода конечных элементов к расчёту конструкций / Р.А. Хечумов, Х. Кешлер, В.И. Прокопьев; Под общ. ред. Р.А. Хечумова. – М.: Издательство АСВ, 1994. – 353 с.
84. Работоспособность правящих карандашей, изготовленных из алмазов с покрытием / В.В. Авакян, Ю.И. Андропов, С.А. Клевцур [и др.]. // В сб. Вопросы теории и практики алмазной обработки. Труды ВНИИалмаза. – 1977. – №5. – С. 92–98.
85. Расчет нестационарного температурного поля алмазного круга при резании с охлаждением / В.А. Александров, А.Н. Жуковский, В.П. Карагодов, В.А. Мечник. // ИФЖ. – 1989. – Т.56. – №4. – С. 690–691.
86. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: Справочник / В.И. Мяченков, В.П. Мальцев, В.П. Майборода [и др.]. // Под общ. ред. В.И. Мяченкова. – М.: Машиностроение, 1989. – 520 с.
87. Резников, А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов/ А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
88. Сагарда, А.А. Контактная температура и силовые зависимости при резании алмазным зерном/ А.А. Сагарда, О.В. Химач. // Синтетические алмазы. – 1972. – №2. – С. 5–9.
89. Сапунов, В.В. Совершенствование технологии изготовления абразивного инструмента на бакелитовой связке с применением микроволнового излучения: Автореф. дис. ... Канд. техн. наук: 05.02.07 / Сапунов Валерий Викторович; - Ульяновск, 2015. – 18 с.
90. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6-ти т. / Под общей ред. Н.В. Новикова. – Т.3: Композиционные инструментальные материалы / Отв. ред. А.Е. Шило. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2005. – 280 с.

91. Семенова, Е.С. Исследование и разработка алмазосодержащих материалов абразивного назначения на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ): Дис... канд. техн. наук / Семенова Евгения Спартаковна; – Комсомольск-на-Амуре, 2009. – 118 с.
92. Сердюк, В.М. Исследование прочности удержания алмазных зерен в органической связке / В.М. Сердюк, В.А. Коновалов, В.Т. Чалый. // Синтетические алмазы. – 1971. – Вып. 4. – С. 33–35.
93. Синтетические сверхтвердые материалы: В 3-х т. Т.2 Композиционные инструментальные сверхтвердые материалы / Ред. кол.: Н.В. Новиков (отв. ред.) [и др.]. – Киев: Наук. Думка, 1986. – 264 с.
94. Старков, В.К. Обработка резанием: Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве/ В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 1989. – 295 с.
95. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.
96. Тепловой режим и напряженно-деформированное состояние системы зерно–матрица алмазного инструмента / М.М. Яхутлов, Б.С. Карамурзов, У.Д., Батыров и [др.]. // Сверхтвёрдые материалы. – 2011. – №5. – С. 88–100.
97. Тимошенко, С.П. Теория упругости/ С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука, 1979. – 560 с.
98. Физические величины. Справочник / Под ред. Н.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
99. Физические свойства алмазов. Справочник / Под ред. Н.В., Новикова. – Киев: Наук. думка, 1987. – 190 с.
100. Формирование структуры алмазосодержащих композиционных материалов под давлением / П.С. Кислый, И.П. Кушталова, Л.Ф. Стасюк, Э.Д. Кизиков. // Сверхтвердые материалы. – 1984. – №1. – С. 14–18.
101. Химач, О.В. Контактная температура при микрорезании твердого сплава ВК8. / О.В. Химач, Г.И. Ковыженко, П.В. Колмогоров. // Сверхтвердые материалы. – 1981. – №2. – С. 59–61.

102. Химия поверхности алмаза/ В.Г. Алешин, А.А. Смехнов, Г.П. Богатырёва, Б.Б. Крук. – Киев: Наук. Думка, 1990. – 200 с.
103. Чалый, В.Т. Некоторые тепловые аспекты износа алмазного инструмента на полимерной связке и связанные с этим технологические материалы и инструменты в металлообработке/ В.Т. Чалый. // В кн.: Полимерабразивные технологические материалы и инструменты в металлообработке. – Киев: Наук. Думка. – 1981. – С. 22–29.
104. Чалый, В.Т. Рациональные режимы прессования алмазоносного слоя инструмента на органической связке/ В.Т. Чалый. // В кн.: Полимерабразивные технологические материалы и инструменты в металлообработке. – Киев: Наук. Думка. – 1981. – С. 57–62.
105. Чистяков, Е.М. Определение толщины никелевого покрытия зёрен алмаза / Е.М. Чистяков, С.А. Кухаренко. // Сверхтвёрдые материалы. – 1983. – №3. – С. 48–50.
106. Чистяков, Е.М. Влияние металлизации на напряженно-деформированное состояние алмазоносного слоя инструмента/ Е.М. Чистяков, В.Р. Коробко, К.И. Мазур. // Сверхтвёрдые материалы. – 1989. – №4. – С. 30–34.
107. Шило, А. Е., Бондарев, Е. К. Композиционные алмазосодержащие материалы инструментального назначения на стеклообразном связующем / А. Е. Шило, Е. К. Бондарев. // Сверхтв. Материалы. – 2000. – № 5. – С. 20–35.
108. Яхутлов, М.М. Исследование напряженно-деформированного состояния системы зерно связка алмазных инструментов/ М.М. Яхутлов. // Станки и инструмент. – 2001. – №11. – С 23–26.
109. Яхутлов, М.М. Исследование теплового режима в системе зерно-матрица алмазного инструмента/ М.М. Яхутлов. // Вестник машиностроения. – 2001. – №8. – С. 48–52.
110. Яхутлов, М.М. О критической заделке алмазного зерна в матрицу инструмента / М.М. Яхутлов, М.М. Ошхунов. // В сб. Вестник КБГУ. Серия Технические науки. Вып. 5. – Нальчик: КБГУ. – 2000. – С. 57-59.

111. Яхутлов, М.М. Определение толщины покрытий на алмазах/ М.М. Яхутлов, Р.М. Нартыжев. // В сб. Вестник КБГУ. Серия Технические науки. Вып. 2. – Нальчик: КБГУ. – 1997. – С. 75–78.
112. Яхутлов, М.М. Повышение работоспособности алмазных инструментов направленным изменением физических характеристик их режущей части: Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / Яхутлов Мартин Мухамедович; – Москва, 2001. – 38 с.
113. Яхутлова, М.Р. Моделирование температурного поля и напряженно-деформированного состояния алмазосодержащих инструментальных композитов на полимерной матрице: Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 02.00.06 / Яхутлова Марианна Разиуановна; [Место защиты: Кабард.-Балкар. гос. ун-т им. Х.М. Бербекова]. – Нальчик, 2011. – 127 с.
114. Borowiecka-Jamrozek, J. The effect of the properties of the metal matrix on the retention of a diamond particle/ J. Borowiecka-Jamrozek, J. Lachowski // *Metalurgija*. – 2017. – 56. – P.83–86.
115. Daniel, P. New bond boosts efficiency in dry tool and cutter grinding/ P. Daniel // *Industrial Diamond Review*. – 29. – №349. – 1999. – P.12–35.
116. Deunezhev, Z.N. Increasing the work of the diamond grinding circuits for the account of directed changes in the heat conductivity of a polymer matrix/ Z.N. Deunezhev // XIV International Scientific and Practical Conference "New Polymer Composite Materials". – 2018. – P. 84–88.
117. Deunezhev, Z.N. Investigation of Temperatures and Stresses in a Polymeric Instrumental Composite Containing a Diamond with Coating/ Z.N. Deunezhev, A.A. Gutov, M.R. Kardanova, M.M. Yakhutlov, A.Kh. Tlibekov // 2017 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies, IT and MQ and IS. – 2017. – P.698–700.
118. Deunezhev, Z.N. Modeling of Non-Stationary Thermal Processes in Composite Diamond-Containing Materials/ Z.N. Deunezhev, M.R. Kardanova, M.M. Yakhutlov, R. Sh. Zhemukhov, A.A. Zhilyaev // Proceedings 2018 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information

Security, Information Technologies" (IT&QM&IS). September, 24-28. – St. Petersburg, Russia. – 2018. – P. 420–422.

119. Huang, Z. Thermal residual stress analysis of coated diamond grits/ Z. Huang, B. Xiang, Y. He, B. Huang // *Int. J. Miner. Metall. Mater.* – 2009. – 16. – P.215–219.

120. Liu, X.F. The microanalysis of the bonding condition between coated diamond and matrix/ X.F. Liu, Y.Z. Li // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* – 2003. – 21. – P.119–123.

121. McEachron, R. Multilayer metal coated diamond abrasives for sintered metal bonded abrasive tools/ R. McEachron // *Industrial Diamond Review.* – 3/1994. – P.113–126

122. Müller-Hummel, P. Temperature measurement on diamond-coated tools during machining/ P. Müller-Hummel, M. Lahres // *Ind. Diamond Rev.* – 1995. – 55. – № 2. – P.78–83.

123. Nightingale, C. Flexural and interlaminar shear strength properties of carbon fibre-epoxy composites cured thermally and with microwave radiation/ C. Nightingale, R.J. Day // *Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing.* – 2002. – Vol. – 33. – P.1021–1030.

124. Pedersen, H. Grindind wheel for cuttig blades/ H. Pedersen, H.D. Dodd // *Industrial Diamond Review.* – 6/2001, – P.270–286.

125. *Polymer Data Handbook* / Edited By J.E. Mark. Oxford University Press. – 1999. – P.493–495.

126. Reichert, F. Influence of the carbonization temperature on the mechanical properties of thermoplastic polymer derived C/C-SiC composites/ F. Reichert, A.M. Pérez-Mas, D. Barreda, C. Blanco, R. Santamaria, C. Kuttner, A. Fery, N. Langhof, W. Krenkel // *J. Eur. Ceram. Soc.* – 2017. – 37. – P.523–529.

127. Reis, L.G. Finite Element Analysis of the Thermal Residual Stresses of Diamond Cutting Tools in the Sintering Process/ L.G. Reis, P.M. Amaral, B. Li, C.A. Anjinho, L.G. Rosa // *Mater. Sci. Forum.* – 2008, – P. 587–588, – P.695–699.

128. Wu, Y. Effects of element V on the properties and microstructure of the new copper-matrix bond for diamond tools/ Y. Wu, Z. Zhu // J. Yunnan Univ. Natl. (Nat. Sci. Ed.). – 2016. – 4. – P.322–324.
129. Xu, J. 3-D Finite element modelling of diamond pull-out failure in impregnated diamond bits/ J. Xu, A.H. Xu, C. Sheikh // Diam. Relat. Mater. – 2017. – 71. – P.1–12.
130. Xu, J. Interfacial failure modelling of diamond bits made of particulate composites/ J. Xu, A.H. Sheikh, C. Xu // Compos. Struct. – 2016. – 155. – P.145–159.
131. Yakhutlov, M.M. Investigation of the Thermal Mode in the Composite Diamond-bearing Material in a Polymer Matrix/ M.M. Yakhutlov, U.D. Batyrov, M.R. Kardanov, A.A. Gutov, Z.N. Deunezhev // 2016 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Technologies, IT and MQ and IS. – 2016. – P.250–252.
132. Yang Dong, Y. Model for predicting residual stresses in metal cutting/ Y. Yang Dong, Ali A. Se5ired // Proc. Jap. Int. Tribol. Conf. Nagoya, Oct.29-Nov. I. 1990. – Tokyo. – 1990. – Vol. I. – P.439–444.
133. Zhao, YC. The categories methods and application of surface coating deposition of superhard abrasives/ YC Zhao, MZ Wang, YH Wang, JK Yu, Q Zou, ZW He // Diamond & Abrasives Engineering. – 2004. – 145. – P.68–76.

**Приложение А. Акты о внедрении результатов работы**



АО «Терский завод алмазного инструмента»  
ИНН 0705000017 КПП 070501001  
361202, Россия, КБР, г. Терек, ул. Татуева, 1

Тел./факс.: (86632) 42-5-66, 41-1-76  
www.terekalmaz.ru; e-mail: mail@terekalmaz.ru

исх. № 14-62/302  
от «30» «06» 2023 года

### АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Деунежева З.Н.

Настоящим актом подтверждается внедрение в практическую деятельность АО «Терский завод алмазного инструмента» отдельных результатов диссертационной работы «Повышение работоспособности алмазных шлифовальных кругов на полимерной матрице за счет снижения тепловой нагрузки на связующее», выполненной старшим преподавателем Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова Деунежевым Залимом Николаевичем.

При разработке новых высокоэффективных алмазных шлифовальных кругов на органических связках, предназначенных для заточки и доводки твердосплавного инструмента и шлифования деталей из труднообрабатываемых материалов, и технологической подготовке их производства используются практические рекомендации, вытекающие из результатов численного моделирования:

– распределение температур в инструментальных композитах на полимерных связующих и его зависимость от теплопроводности матрицы – для выбора оптимальных составов наполнителей;

– зависимости температур и температурных напряжений в инструментальных композитах на основе алмазов с покрытиями – для выбора материалов покрытия и его толщины в целях повышения режущей способности, удельного расхода алмазов и других показателей эффективности инструмента.

Генеральный директор



А.Б. ТЛЕУЖЕВ



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
(Минобрнауки России)  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Кабардино-Балкарский государственный университет  
им. Х.М. Бербекова» (КБГУ)**

Ул. Чернышевского, 173, Нальчик, КБР, 360004. Тел./факс (8-8662) 42-52-54  
E-mail: [yka@kbsu.ru](mailto:yka@kbsu.ru) ОКПО 02069510, ОГРН 1020700739234, ИНН 0711037537, КПП 072501001

31.05.2023 № 01.01-20/2321 Г

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**УТВЕРЖДАЮ**

И.о. первого проректора –  
проректора по учебной работе КБГУ

В.И. Лесев

2023 г.

**АКТ**

**о внедрении в учебный процесс института информатики,  
электроники и робототехники результатов диссертационной работы  
старшего преподавателя КБГУ Деунежева Залима Николаевича**

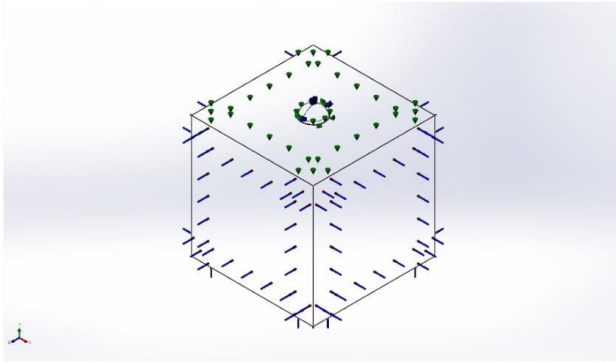
Настоящим актом подтверждается, что материалы кандидатской диссертации «Повышение работоспособности алмазных шлифовальных кругов на полимерной матрице за счет снижения тепловой нагрузки на связующее», выполненной старшим преподавателем кафедры технологии и оборудования автоматизированного производства КБГУ Деунежевым Залимом Николаевичем, используются в учебном процессе в лекционных, лабораторных и практических занятиях по программе «Технологии цифрового производства» направления подготовки 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств в следующих учебных дисциплинах:

1. «Инструменты из сверхтвёрдых материалов» - основные результаты численного моделирования и экспериментальных исследований композиционных алмазосодержащих материалов на полимерной матрице;
2. «Тепловые процессы в технологических системах» - результаты исследований температур, температурных напряжений и деформаций в алмазосодержащей части шлифовальных кругов на полимерных связующих;
3. «Математическое моделирование в машиностроении» - конечно-элементная модель для расчета температур и напряженно-деформированного состояния в системе «алмаз-покрытие-матрица», методики её разработки и анализа результатов численного моделирования.

И.о. директора института информатики,  
электроники и робототехники, д.т.н., проф.

 Р.Ш. Тешев

**Приложение Б. Протоколы численных экспериментов в программном комплексе SolidWorks и примеры обработки результатов расчётов**



## Описание

**РАСЧЕТЫ ТЕМПЕРАТУР В СИСТЕМЕ «АЛМАЗ-МАТРИЦА»  
ПО ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ**

## Симуляция Sborka SHLIF KRUG

Date: 10 марта 2022 г.  
Создатель: Solidworks

Имя исследования: Термическая 1

Тип анализа: Термическая (Устойчивое состояние)

## Содержание

Описание.....	1
Свойства исследования.....	2
Единицы.....	2
Свойства материала.....	3
Термические нагрузки.....	4
Информация о взаимодействии.....	4
Информация о сетке.....	5
Результаты исследования.....	6

## Свойства исследования

Имя исследования	Термическая 1
Тип анализа	Термическая(Устойчивое состояние)
Тип сетки	Сетка на твердом теле
Тип решающей программы	FFEPlus
Тип решения	Устойчивое состояние
Сопротивление контакта было определено?	Нет
Папка результатов	Документ SOLIDWORKS (E:\ЗАЛИМ\Диссертация\ДЕУНЕЖЕВ\ДЕУНЕЖЕВ - ТЕМПЕРАТУРА\3D model 90 grad\UGOL 90 - TEMPERATURA)



Проанализировано с помощью SOLIDWORKS  
Simulation

Симуляция Sborka SHLIF KRUG

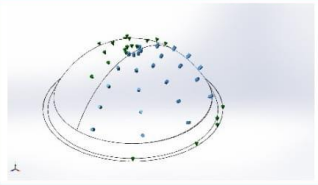
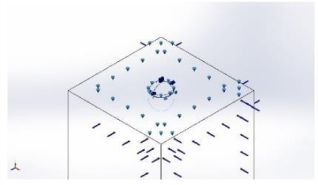
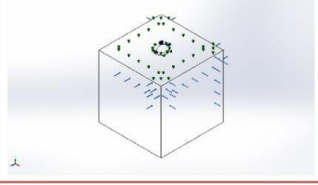
## Единицы

Система единиц измерения:	СИ (MKS)
Длина/Перемещение	mm
Температура	Kelvin
Угловая скорость	Рад/сек
Давление/Напряжение	N/m <sup>2</sup>

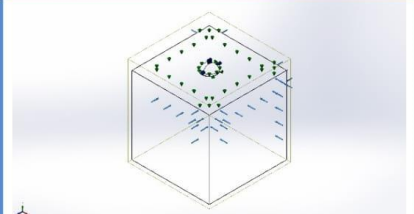
## Свойства материала

Ссылка на модель	Свойства	Компоненты
	<p>Имя: matrica organ            Тип модели: Линейный Упругий            Изотропный            Критерий прочности по умолчанию: Неизвестно            Теплопроводность: 0,18 W/(m.K)            Удельная теплоемкость: 1 600 J/(kg.K)            Массовая плотность: 1 300 kg/m<sup>3</sup></p>	<p>Твердое тело 1(Полость1) (Matrica-1),            Твердое тело 1(Вырез-Вытянуть1)(Sborka ALMAZ PERSLOY-1/Perehodnoy sloy-1)</p>
Данные кривой:N/A		
	<p>Имя: almaz            Тип модели: Линейный Упругий            Изотропный            Критерий прочности по умолчанию: Неизвестно            Теплопроводность: 146,5 W/(m.K)            Удельная теплоемкость: 502 J/(kg.K)            Массовая плотность: 3 520 kg/m<sup>3</sup></p>	<p>Твердое тело 1(Разделяющая линия6) (Sborka ALMAZ PERSLOY-1/ALMAZ-1)</p>
Данные кривой:N/A		

## Термические нагрузки

Имя нагрузки	Загрузить изображение	Загрузить данные
Тепловой поток-1		<p>Объекты: 1 грани</p> <p>Тепловой поток Значение: <math>1.7e+07 \text{ W/m}^2</math></p>
Конвекция-1		<p>Объекты: 4 грани</p> <p>Коэффициент конвективной теплоотдачи: <math>0,119503 \text{ Cal/(s.cm}^2 \cdot \text{°C)}</math></p> <p>Вариация времени: Выкл</p> <p>Вариация температуры: Выкл</p> <p>Массовая температура окружающей среды: 20 Celsius</p> <p>Вариация времени: Выкл</p>
Температура -1		<p>Объекты: 5 грани</p> <p>Температура: 0 Celsius</p>

## Информация о взаимодействии

Взаимодействие	Изображение взаимодействия	Свойства взаимодействия
Глобальный контакт		<p>Тип: Связанные</p> <p>Компоненты: 1 компоненты</p> <p>Параметры: Непрерывная сетка</p>

### Информация о сетке

Тип сетки	Сетка на твердом теле
Используемое разбиение:	Стандартная сетка
Автоматическое уплотнение сетки:	Выкл
Включить автоциклы сетки:	Выкл
Точки Якобиана для сетки высокого качества	4 Точки
Размер элемента	0,1001 mm
Допуск	0,00500499 mm
Качество сетки	Высокая
Заново создать независимую сетку из неудавшихся деталей	Выкл

### Информация о сетке - Детализация

Всего узлов	84749
Всего элементов	59876
Максимальное соотношение сторон	14,952
% элементов с соотношением сторон < 3	98,1
Процент элементов с соотношением сторон > 10	0,01
Процент искаженных элементов	0
Время для завершения сетки (hh:mm:ss):	00:00:03
Имя компьютера:	KOMPUTER

### Информация по управлению сеткой:

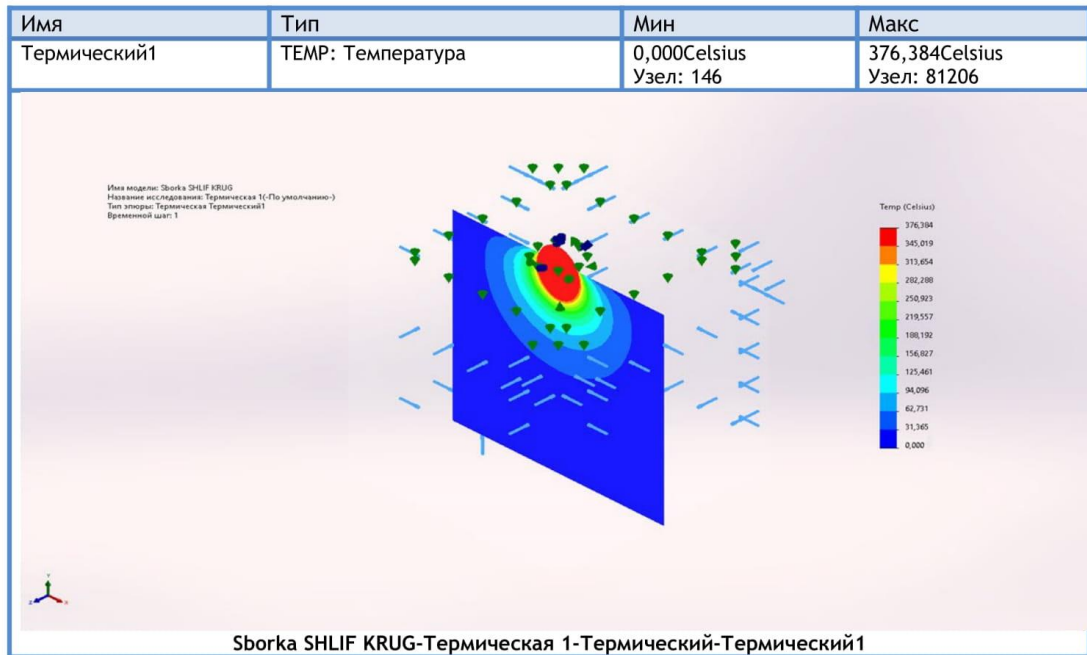
Имя управления сеткой	Изображение управления сеткой	Сведения об управлении сеткой
-----------------------	-------------------------------	-------------------------------

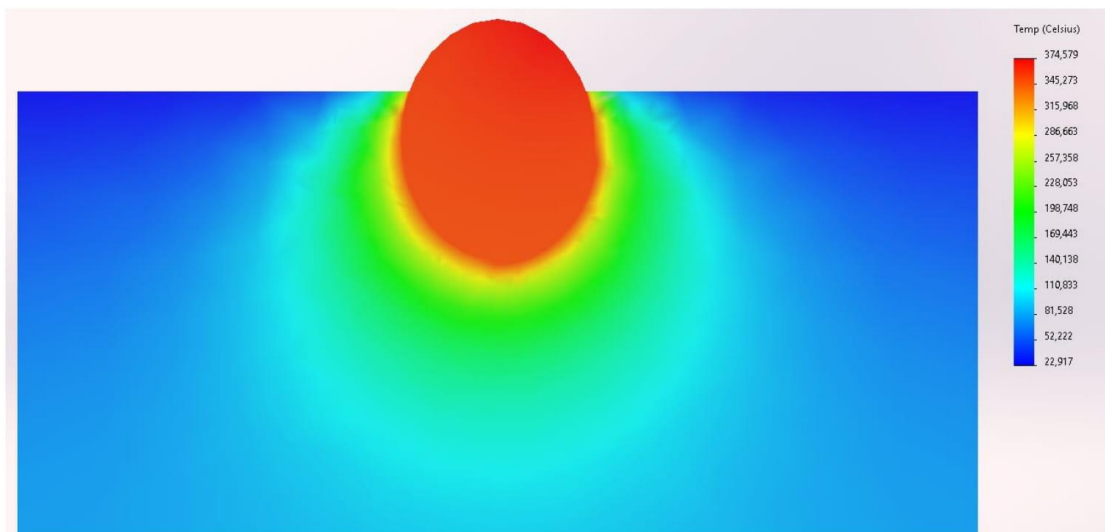


Проанализировано с помощью SOLIDWORKS  
Simulation

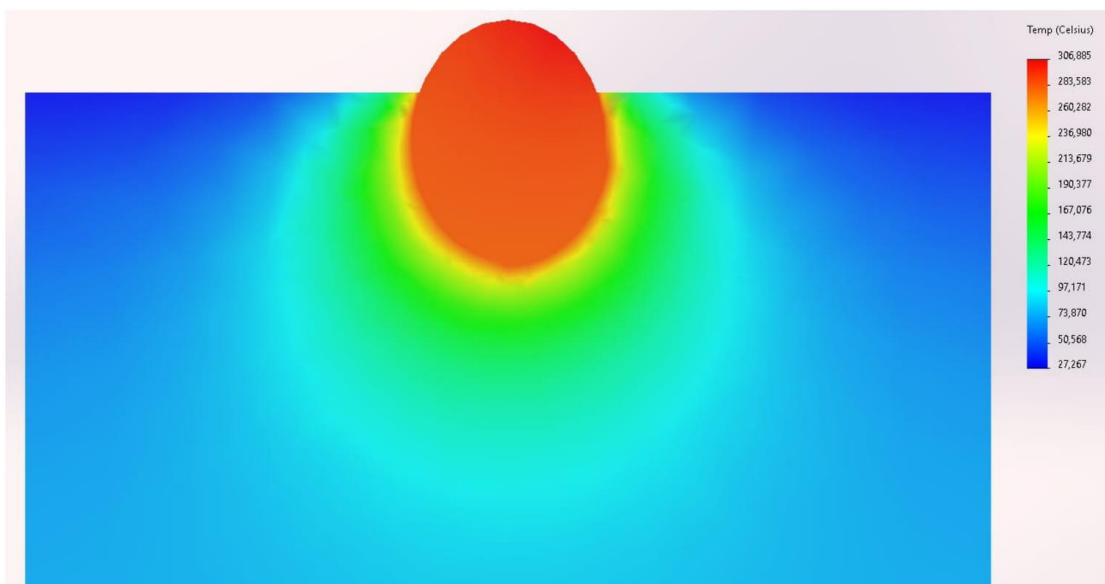
Симуляция Sboroka SHLIF KRUG

## Результаты исследования



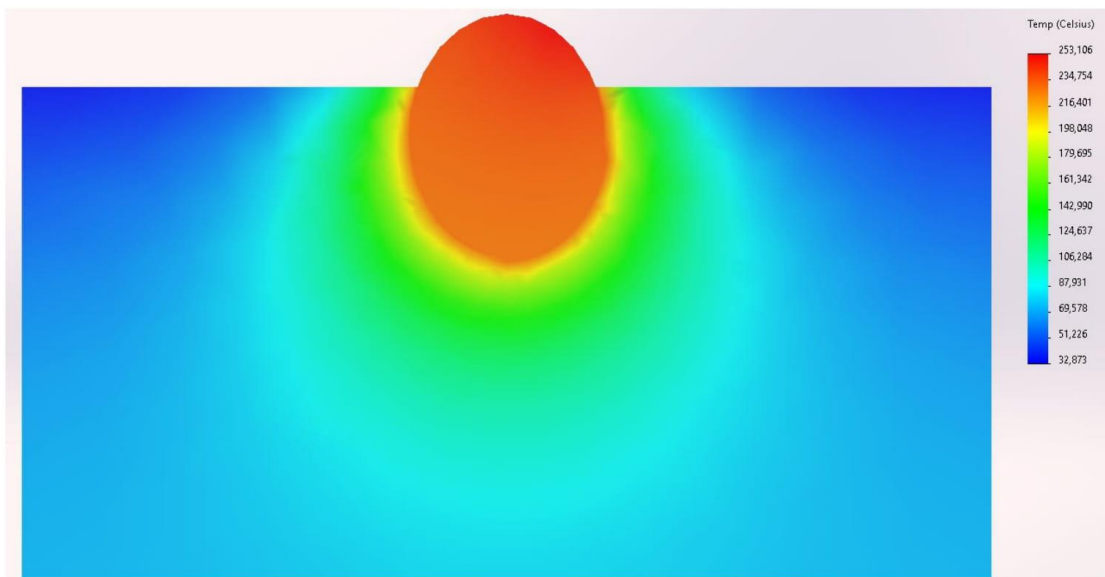


Поле температур в системе (плоскость YOX) при значении коэффициента теплопроводности матрицы 0,18 Вт/(м·град) (бакелит)

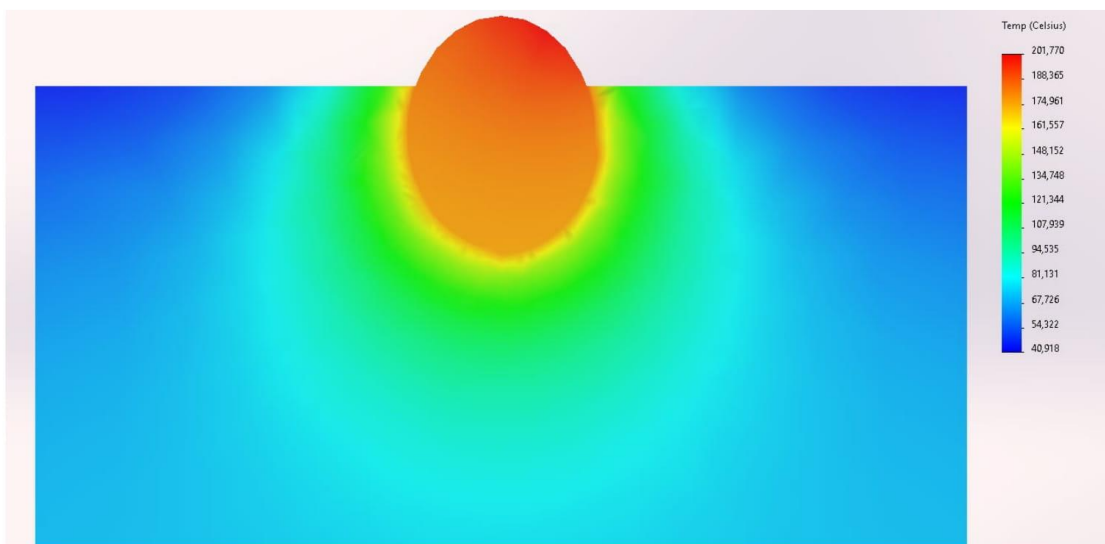


Поле температур в системе (плоскость YOX) при значении коэффициента теплопроводности матрицы 0,5 Вт/(м·град)

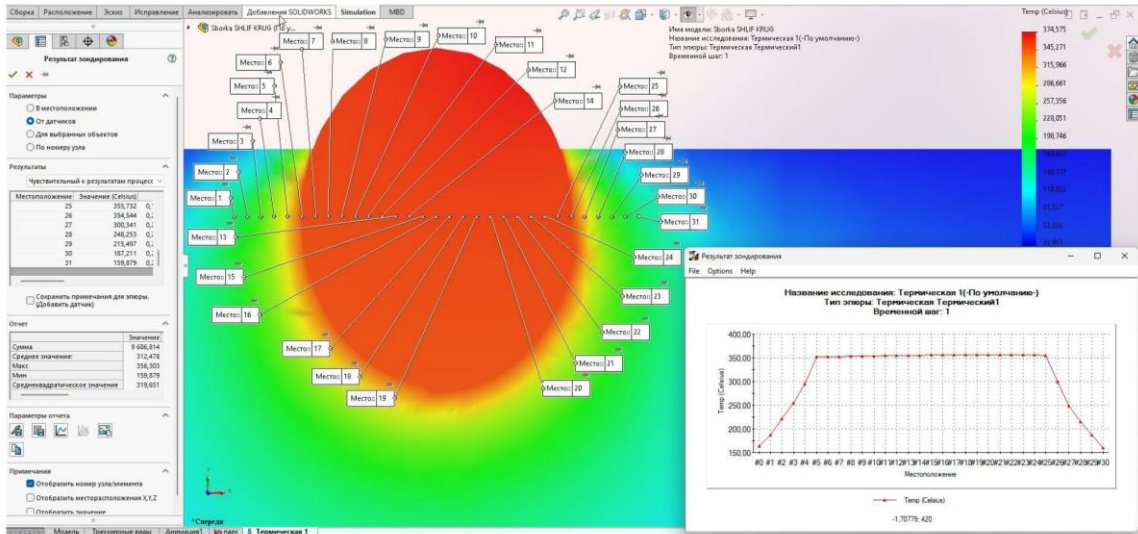




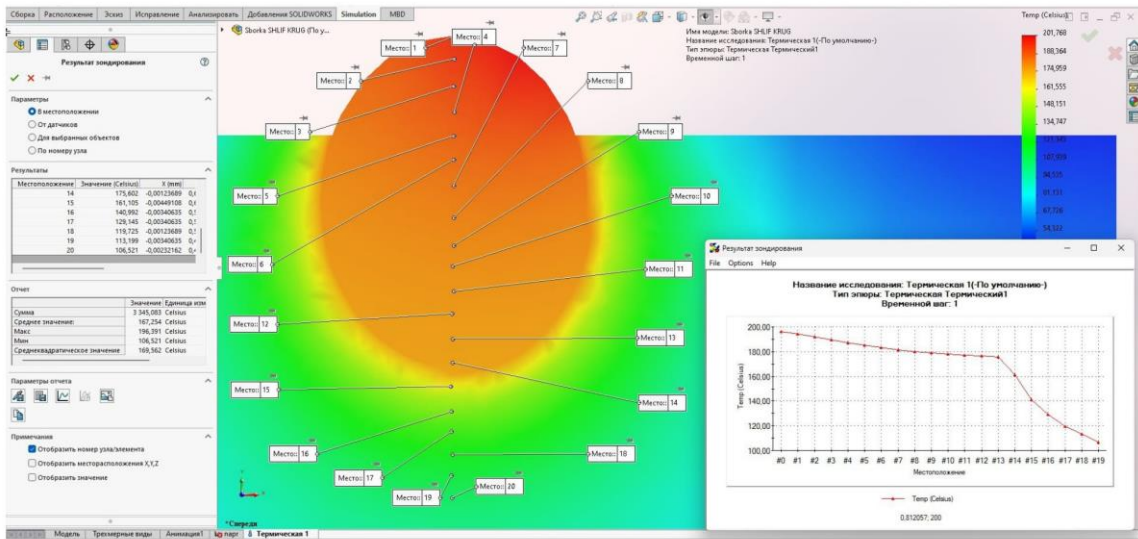
Поле температур в системе (плоскость YOX) при значении коэффициента теплопроводности матрицы 1 Вт/(м·град)



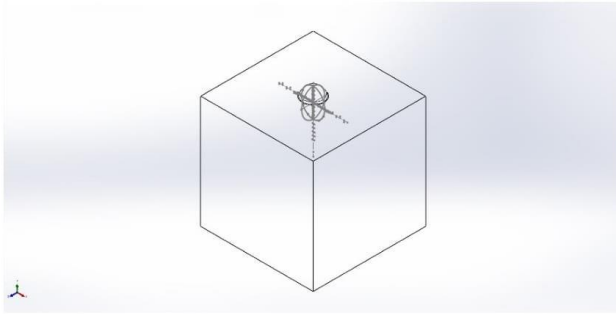
Поле температур в системе (плоскость YOX) при значении коэффициента теплопроводности матрицы 2 Вт/(м·град)



Анализ результатов расчета температур в сечении по горизонтальной оси зерна при значении коэффициента теплопроводности матрицы 0,18 Вт/(м·град) (бакелит)



Анализ результатов расчета температур в сечении по вертикальной оси зерна при значении коэффициента теплопроводности матрицы 2 Вт/(м·град)



### Описание

**РАСЧЕТЫ ТЕМПЕРАТУР ПРИ РАЗНЫХ ТОЛЩИНАХ  
НИКЕЛЕВОГО ПОКРЫТИЯ**

## Симуляция Sborка SHLIF KRUG

**Date:** 15 марта 2022 г.

**Создатель:** Solidworks

**Имя исследования:** Термическая 1

**Тип анализа:** Термическая(Устойчивое состояние)

### Содержание

Описание.....	1
Свойства исследования.....	2
Единицы.....	2
Свойства материала.....	3
Термические нагрузки.....	4
Информация о взаимодействии.....	4
Информация о сетке.....	5
Результаты исследования.....	6



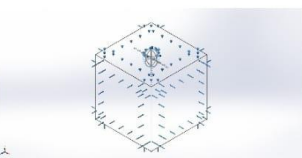
### Свойства исследования

Имя исследования	Термическая 1
Тип анализа	Термическая(Устойчивое состояние)
Тип сетки	Сетка на твердом теле
Тип решаемой программы	FFEPlus
Тип решения	Устойчивое состояние
Сопротивление контакта было определено?	Нет
Папка результатов	Документ SOLIDWORKS (E:\ЗАЛИМ\Диссертация\Старые варианты\ДЕУНЕЖЕВ - ТЕМПЕРАТУРА\ДЕУНЕЖЕВ - ТЕМПЕРАТУРА НИКЕЛЬ 0.01\3D model 90 grad\UGOL 90 - TEMPERATURA)

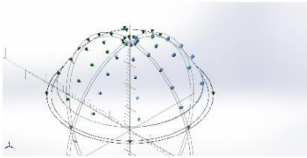
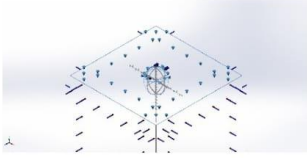
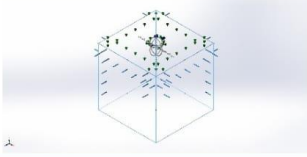
### Единицы

Система единиц измерения:	СИ (MKS)
Длина/Перемещение	mm
Температура	Kelvin
Угловая скорость	Рад/сек
Давление/Напряжение	N/m <sup>2</sup>

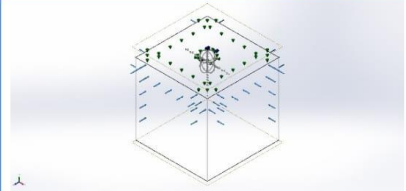
## Свойства материала

Ссылка на модель	Свойства	Компоненты
	<p>Имя: <b>matrica organ</b>            Тип модели: <b>Линейный Упругий</b>  <b>Изотропный</b>            Критерий прочности по умолчанию: <b>Неизвестно</b>            Теплопроводность: <b>0,18 W/(m.K)</b>            Удельная теплоемкость: <b>1 600 J/(kg.K)</b>            Массовая плотность: <b>1 300 kg/m<sup>3</sup></b></p>	<p>Твердое тело 1(Полость1) (Matrica-1)</p>
Данные кривой:N/A		
	<p>Имя: <b>almaz</b>            Тип модели: <b>Линейный Упругий</b>  <b>Изотропный</b>            Критерий прочности по умолчанию: <b>Неизвестно</b>            Теплопроводность: <b>146,5 W/(m.K)</b>            Удельная теплоемкость: <b>502 J/(kg.K)</b>            Массовая плотность: <b>3 520 kg/m<sup>3</sup></b></p>	<p>Твердое тело 1(Разделяющая линия6) (Sborka ALMAZ PERSLOY-1/ALMAZ-1)</p>
Данные кривой:N/A		
	<p>Имя: <b>Никель1</b>            Тип модели: <b>Линейный Упругий</b>  <b>Изотропный</b>            Критерий прочности по умолчанию: <b>Максимальное напряжение von Mises</b>            Теплопроводность: <b>65 W/(m.K)</b>            Удельная теплоемкость: <b>500 J/(kg.K)</b>            Массовая плотность: <b>8 900 kg/m<sup>3</sup></b></p>	<p>Твердое тело 1(Вырез-Вытянуть1)(Sborka ALMAZ PERSLOY-1/Perehodnoy sloy-1)</p>
Данные кривой:N/A		

## Термические нагрузки

Имя нагрузки	Загрузить изображение	Загрузить данные
Тепловой поток-1		<p>Объекты: 1 грани  Тепловой поток Значение: 1.7e+07 W/m^2</p>
Конвекция-1		<p>Объекты: 4 грани  Коэффициент конвективной теплоотдачи: 0,119503 Cal/(s.cm^2. °C)  Вариация времени: Выкл  Вариация температуры: Выкл  Массовая температура окружающей среды: 20 Celsius  Вариация времени: Выкл</p>
Температура -1		<p>Объекты: 5 грани  Температура: 0 Celsius</p>

## Информация о взаимодействии

Взаимодействие	Изображение взаимодействия	Свойства взаимодействия
Глобальный контакт		<p>Тип: Связанные  Компоненты: 1 компоненты  Параметры: Непрерывная сетка</p>

### Информация о сетке

Тип сетки	Сетка на твердом теле
Используемое разбиение:	Стандартная сетка
Автоматическое уплотнение сетки:	Выкл
Включить автоциклы сетки:	Выкл
Точки Якобиана для сетки высокого качества	4 Точки
Размер элемента	0,1001 mm
Допуск	0,00500499 mm
Качество сетки	Высокая
Заново создать независимую сетку из неудавшихся деталей	Выкл

### Информация о сетке - Детализация

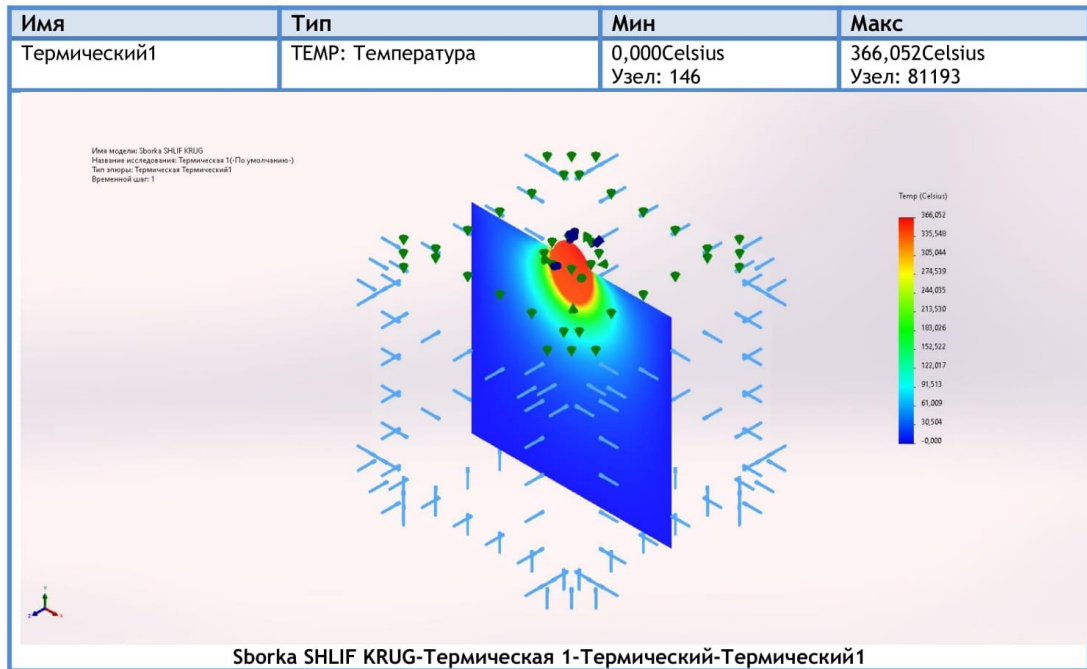
Всего узлов	84736
Всего элементов	59873
Максимальное соотношение сторон	14,952
% элементов с соотношением сторон < 3	98,1
Процент элементов с соотношением сторон > 10	0,01
Процент искаженных элементов	0
Время для завершения сетки (hh:mm:ss):	00:00:02
Имя компьютера:	KOMPUTER

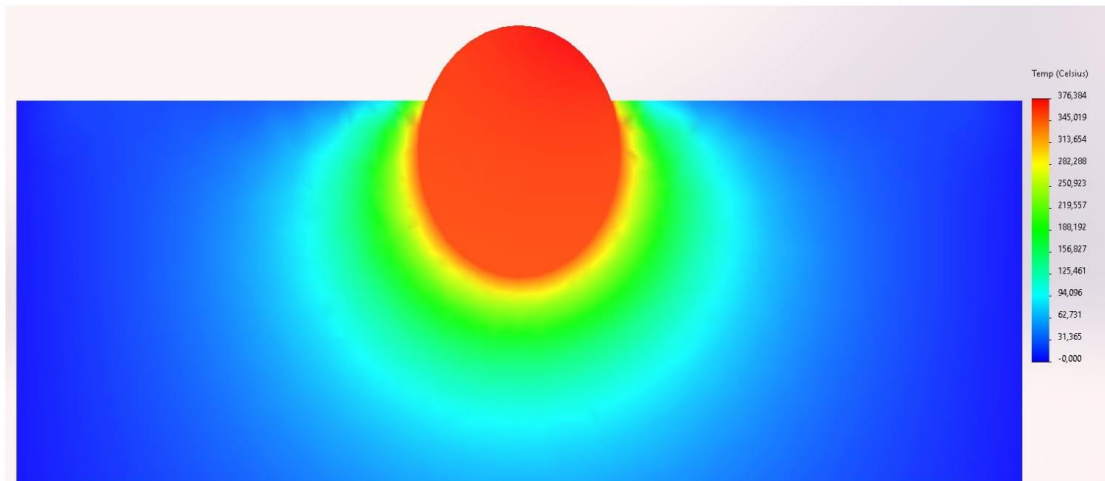
### Информация по управлению сеткой:

Имя управления сеткой	Изображение управления сеткой	Сведения об управлении сеткой
Управление-1		<p>Объекты: 1 Твердое тело (s)</p> <p>Единицы измерения: mm</p> <p>Размер: 0,0500499</p> <p>Пропорция: 0,0500499</p>

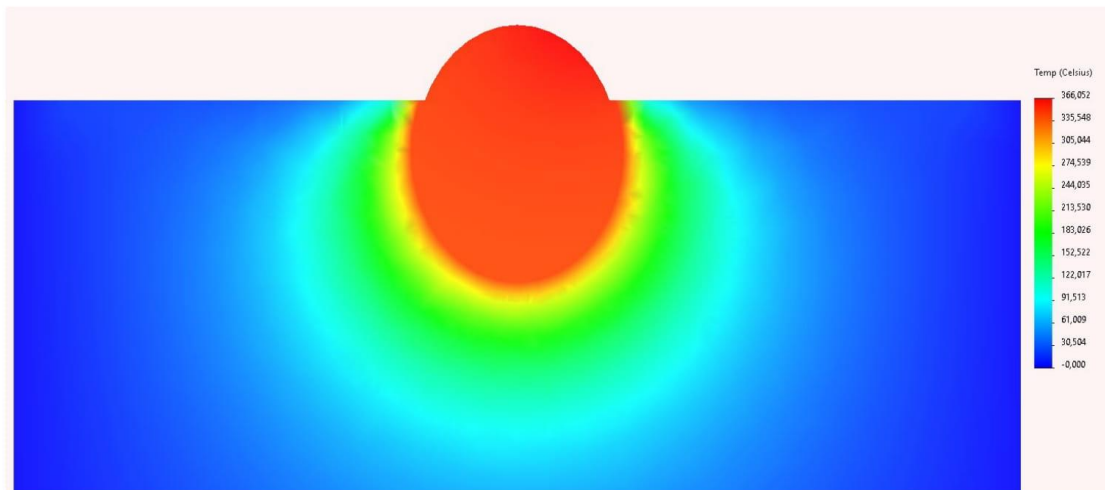


## Результаты исследования

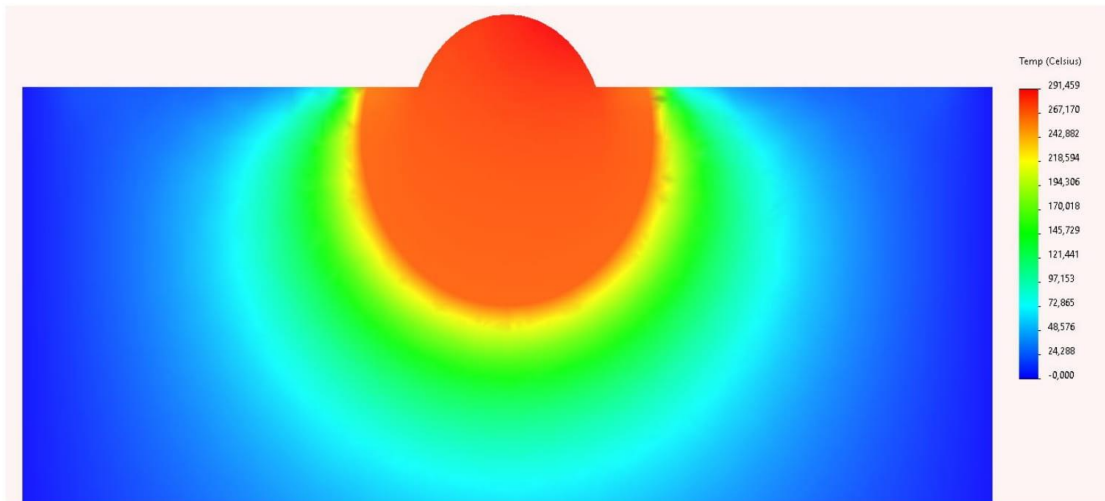




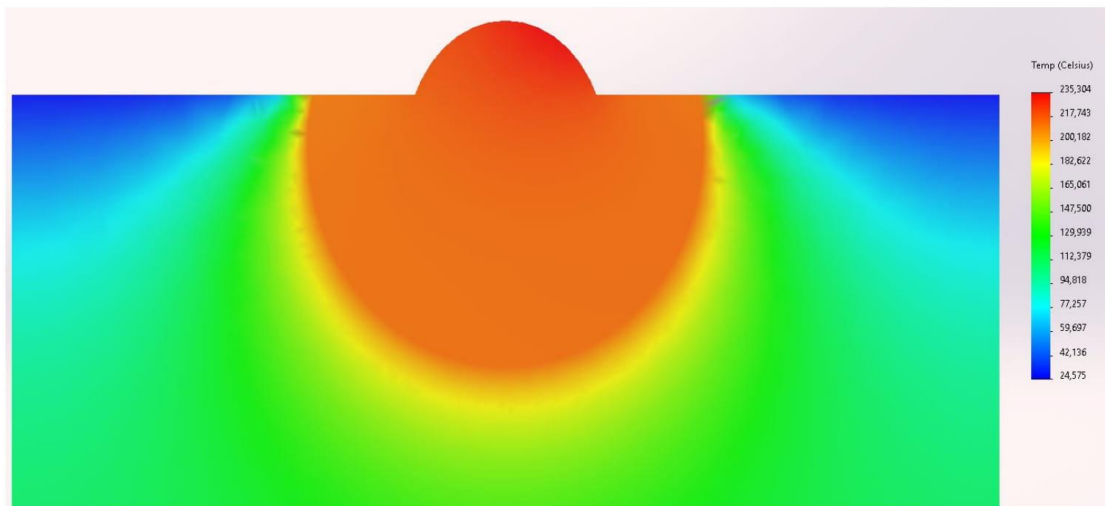
Поле температур в системе (плоскость YOX) при отсутствии покрытия



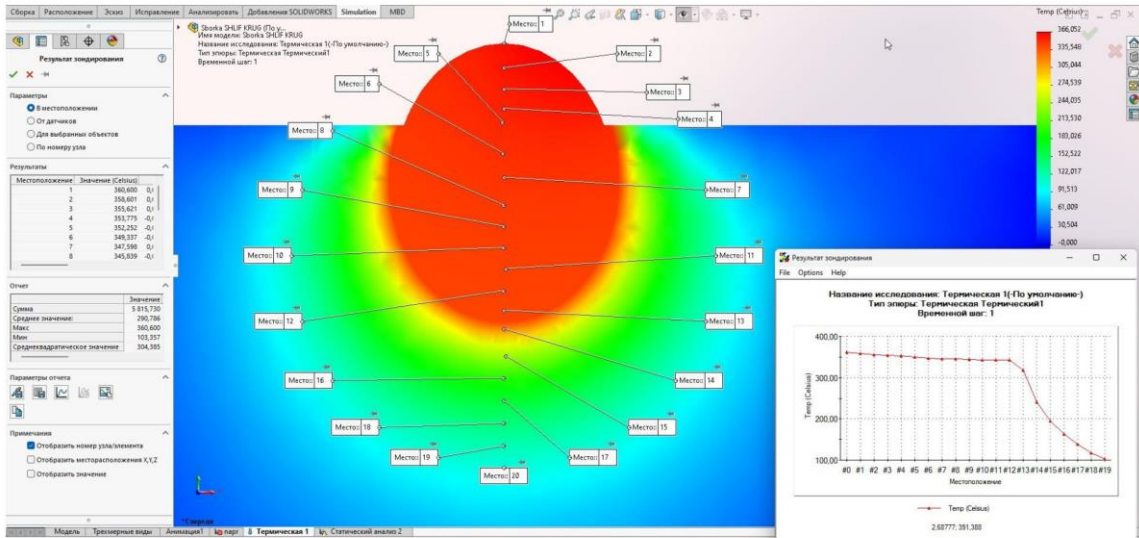
Поле температур в системе (плоскость YOX) при толщине никелевого покрытия 0,01 мм



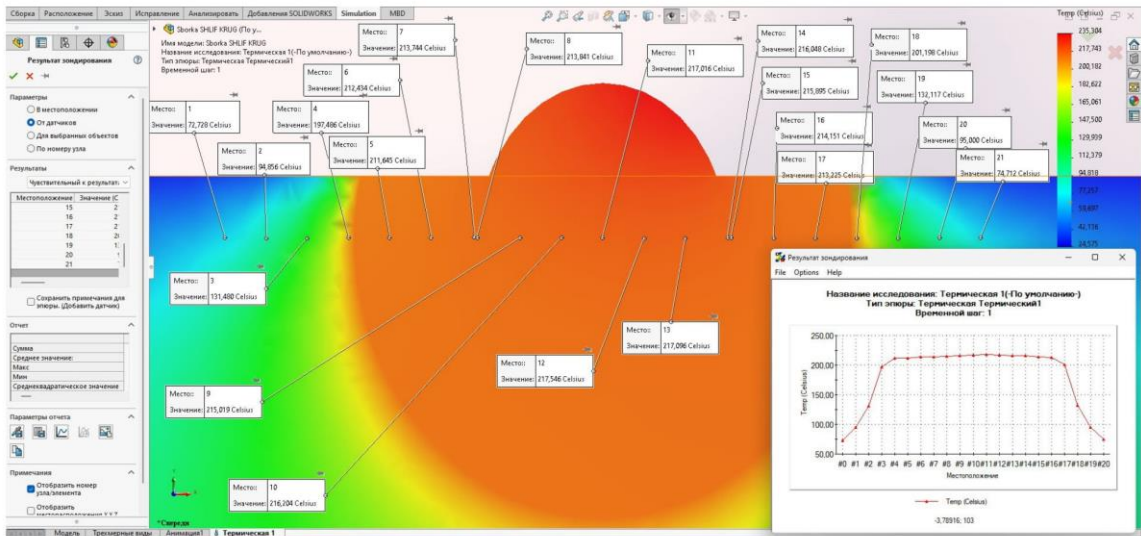
Поле температур в системе (плоскость YOX) при толщине никелевого покрытия 0,1 мм



Поле температур в системе (плоскость YOX) при толщине никелевого покрытия 0,2 мм



Анализ результатов расчета температур в сечении по вертикальной оси зерна при толщине (мм) никелевого покрытия 0,01 мм

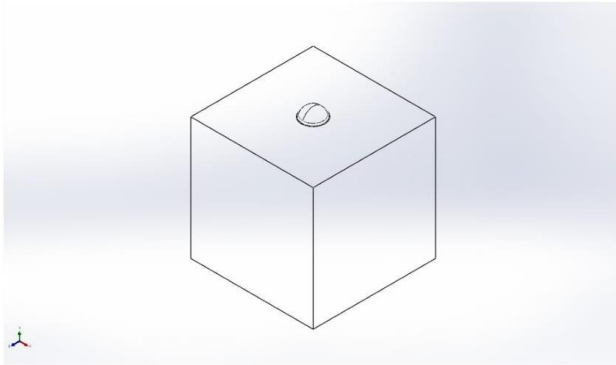


Анализ результатов расчета температур в сечении по горизонтальной оси зерна при толщине (мм) никелевого покрытия 0,2 мм



Проанализировано с помощью SOLIDWORKS Simulation

Симуляция Sbornka SHLIF KRUG



## Описание

РАСЧЕТЫ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ РАЗНЫХ ПОКРЫТИЯХ

## Симуляция Sborka SHLIF KRUG

Date: 21 апреля 2022 г.

Создатель: Solidworks

Имя исследования: Статический анализ 1

Тип анализа: Статический

## Содержание

Описание.....	1
Свойства исследования.....	2
Единицы.....	2
Свойства материала.....	3
Нагрузки и крепления.....	4
Информация о взаимодействии.....	4
Информация о сетке.....	5
Результирующие силы.....	7
Результаты исследования.....	8


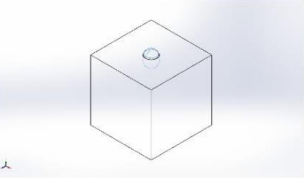
### Свойства исследования

Имя исследования	Статический анализ 1
Тип анализа	Статический
Тип сетки	Сетка на твердом теле
Тепловой эффект:	Вкл
Термический параметр	Из термического исследования
Входное термическое исследование:	Термическая 1
Временной шаг	1
Температура при нулевом напряжении	0 Celsius
Включить эффекты давления жидкости из SOLIDWORKS Flow Simulation	Выкл
Тип решающей программы	FFEPlus
Влияние нагрузок на собственные частоты:	Выкл
Мягкая пружина:	Выкл
Инерционная разгрузка:	Выкл
Несовместимые параметры связи	Авто
Большие перемещения	Выкл
Вычислить силы свободных тел	Вкл
Трение	Выкл
Использовать адаптивный метод:	Выкл
Папка результатов	Документ SOLIDWORKS (E:\ЗАЛИМ\Диссертация\Старые варианты\ДЕУНЕЖЕВ\ДЕУНЕЖЕВ - ТЕМПЕРАТУРА\3D model 90 grad\UGOL 90 - TEMPERATURA)

### Единицы

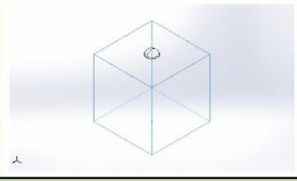
Система единиц измерения:	СИ (MKS)
Длина/Перемещение	mm
Температура	Kelvin
Угловая скорость	Рад/сек
Давление/Напряжение	N/m <sup>2</sup>

## Свойства материала

Ссылка на модель	Свойства	Компоненты
	<p>Имя: matrica organ (9) (9)            Тип модели: Линейный Упругий            Изотропный            Критерий прочности по умолчанию: Неизвестно            Предел текучести: 1 N/m<sup>2</sup>            Модуль упругости: 4e+09 N/m<sup>2</sup>            Коэффициент Пуассона: 0,3            Массовая плотность: 1 300 kg/m<sup>3</sup>            Коэффициент теплового расширения: 7e-05 /Kelvin</p>	<p>Твердое тело 1(Полость1) (Matrica-1),            Твердое тело 1(Вырез-Вытянуть1)(Sborka ALMAZ PERSLOY-1/Perehodnoy sloy-1)</p>
Данные кривой:N/A		
	<p>Имя: almaz            Тип модели: Линейный Упругий            Изотропный            Критерий прочности по умолчанию: Неизвестно            Предел текучести: 1 N/m<sup>2</sup>            Модуль упругости: 9e+11 N/m<sup>2</sup>            Коэффициент Пуассона: 0,072            Массовая плотность: 3 520 kg/m<sup>3</sup>            Коэффициент теплового расширения: 1,05e-06 /Kelvin</p>	<p>Твердое тело 1(Разделяющая линия6) (Sborka ALMAZ PERSLOY-1/ALMAZ-1)</p>
Данные кривой:N/A		



### Нагрузки и крепления

Имя крепления	Изображение крепления	Данные крепления		
Зафиксированный-1		<p>Объекты: 5 грани            Тип: Зафиксированная геометрия</p>		
<b>Результирующие силы</b>				
Компоненты	X	Y	Z	Результирующая
Сила реакции(N)	-1,52811e-05	1,31866e-05	1,69752e-05	2,63734e-05
Реактивный момент(N.m)	0	0	0	0

### Информация о взаимодействии

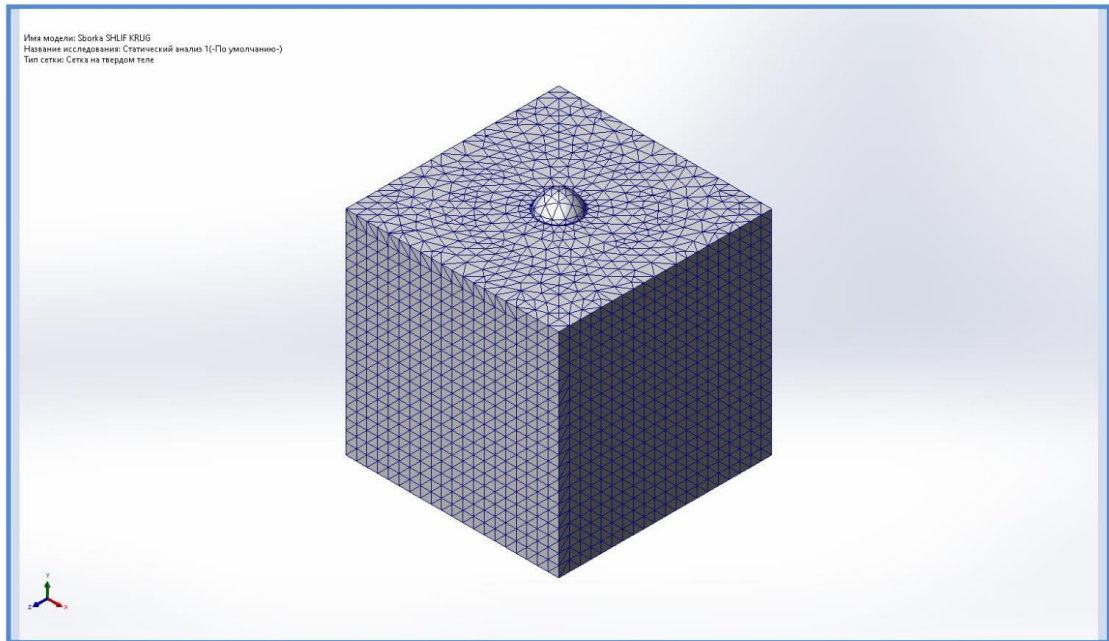
Взаимодействие	Изображение взаимодействия	Свойства взаимодействия
Глобальный контакт		<p>Тип: Связанные            Компоненты: 1 компоненты            Параметры: Непрерывная сетка</p>

### Информация о сетке

Тип сетки	Сетка на твердом теле
Используемое разбиение:	Стандартная сетка
Автоматическое уплотнение сетки:	Выкл
Включить автоциклы сетки:	Выкл
Точки Якобиана для сетки высокого качества	4 Точки
Размер элемента	0,1001 mm
Допуск	0,00500499 mm
Качество сетки	Высокая
Заново создать независимую сетку из неудавшихся деталей	Выкл

### Информация о сетке - Детализация

Всего узлов	84173
Всего элементов	59386
Максимальное соотношение сторон	18,36
% элементов с соотношением сторон < 3	98,3
Процент элементов с соотношением сторон > 10	0,152
Процент искаженных элементов	0
Время для завершения сетки (hh:mm:ss):	00:00:03
Имя компьютера:	KOMPUTER



#### Информация по управлению сеткой:

Имя управления сеткой	Изображение управления сеткой	Сведения об управлении сеткой
Управление-1		<p><b>Объекты:</b> 1 Твердое тело (s)  <b>Единицы измерения:</b> mm  <b>Размер:</b> 0,0527999  <b>Пропорция:</b> 0,0527999</p>

## Результирующие силы

### Силы реакции

Выбранный набор	Единицы	Сумма X	Сумма Y	Сумма Z	Результирующая
всей модели	N	-1,52811e-05	1,31866e-05	1,69752e-05	2,63734e-05

### Моменты реакции

Выбранный набор	Единицы	Сумма X	Сумма Y	Сумма Z	Результирующая
всей модели	N.m	0	0	0	0

### Силы свободных тел

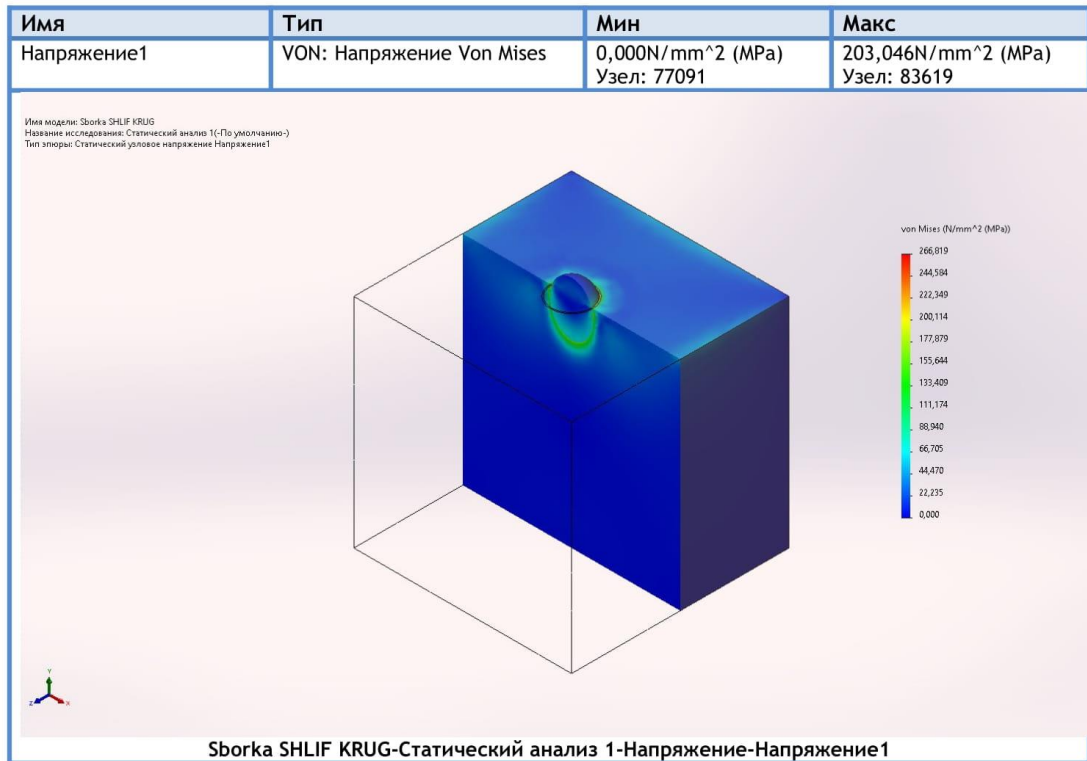
Выбранный набор	Единицы	Сумма X	Сумма Y	Сумма Z	Результирующая
всей модели	N	0,142774	0,202759	0,128669	0,279377

### Моменты свободных тел

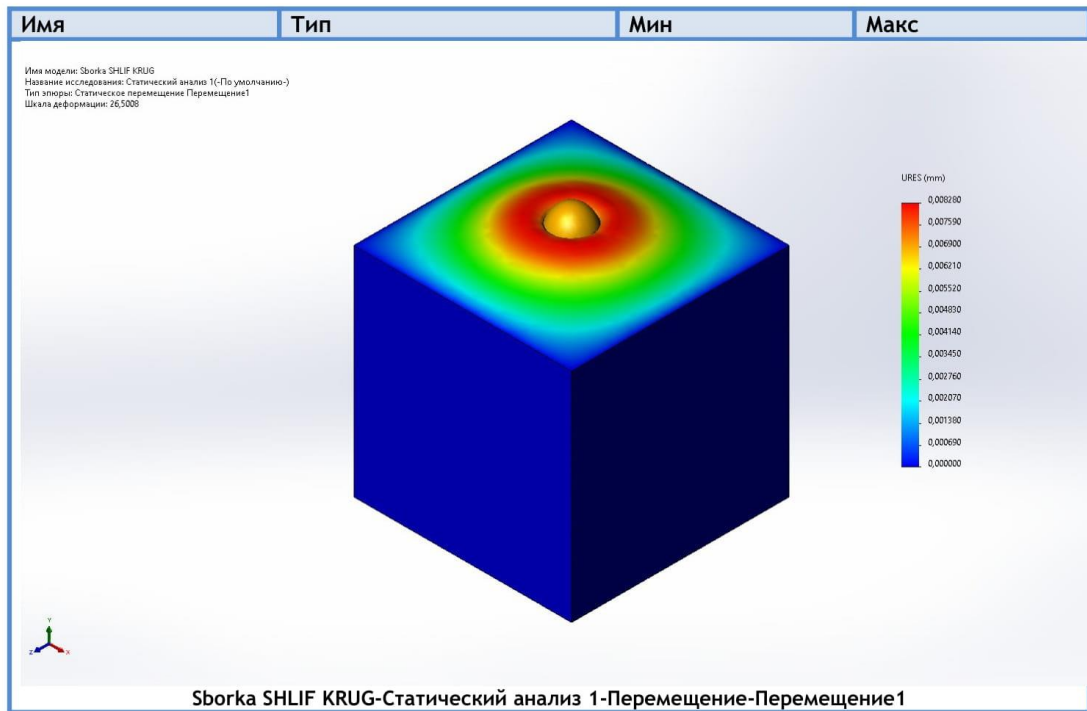
Выбранный набор	Единицы	Сумма X	Сумма Y	Сумма Z	Результирующая
всей модели	N.m	0	0	0	1e-33



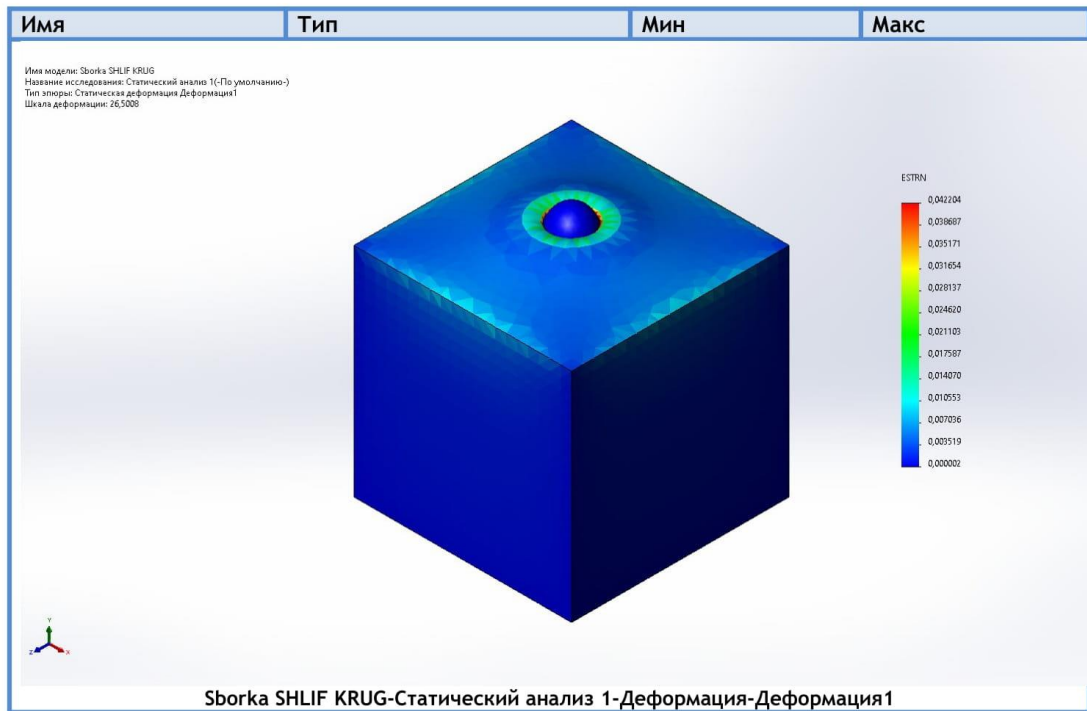
## Результаты исследования

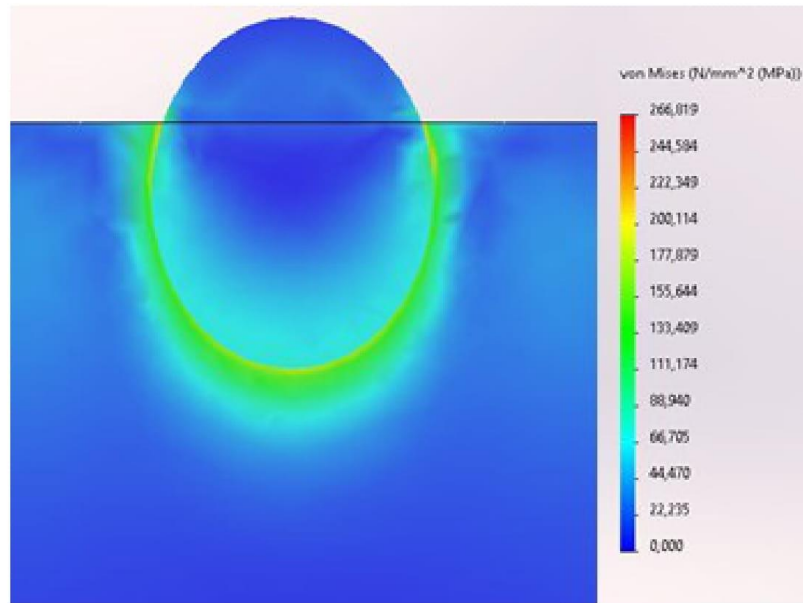


Имя	Тип	Мин	Макс
Перемещение1	URES: Результирующее перемещение	0,000000mm Узел: 117	0,008280mm Узел: 1563

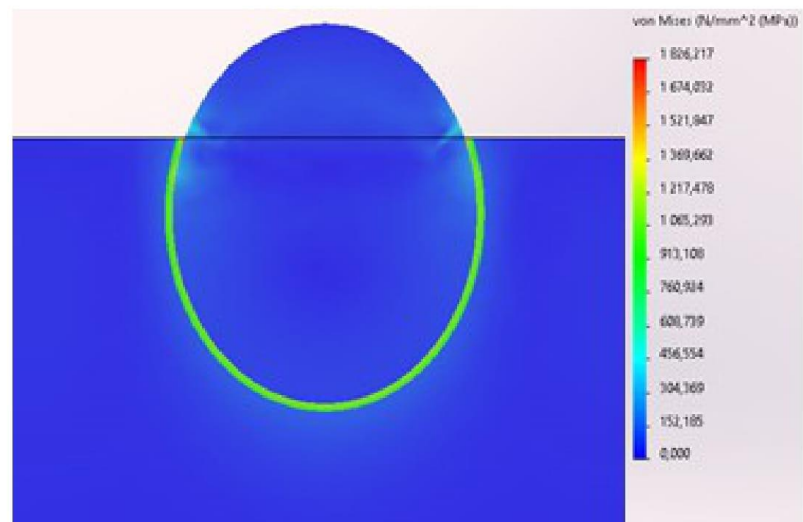


Имя	Тип	Мин	Макс
Деформация1	ESTRN: Эквивалентная деформация	0,000002 Элемент: 57055	0,042204 Элемент: 58484



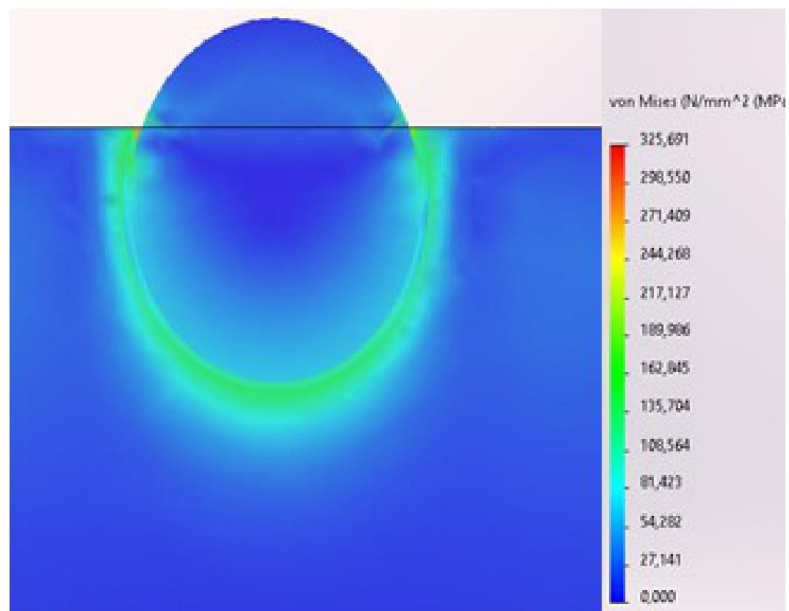


Интенсивность напряжений в плоскость YOx при отсутствии покрытия

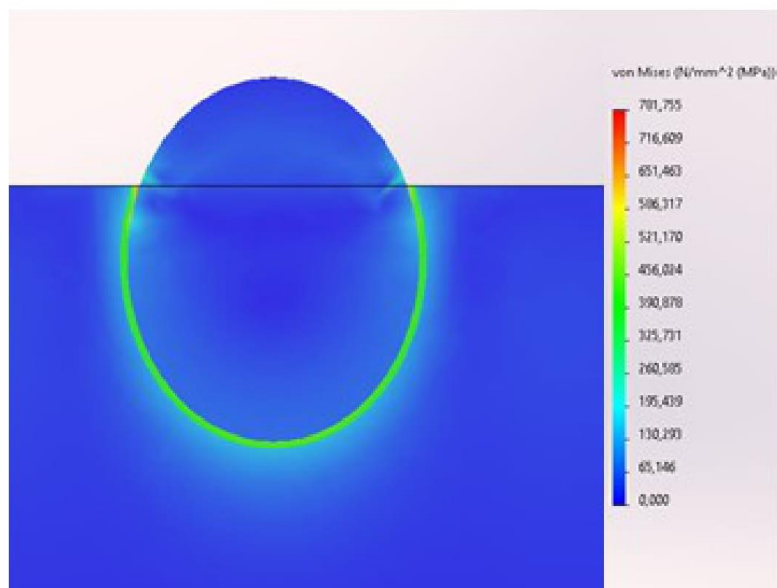


Интенсивность напряжений в плоскости YOx: покрытие - никель

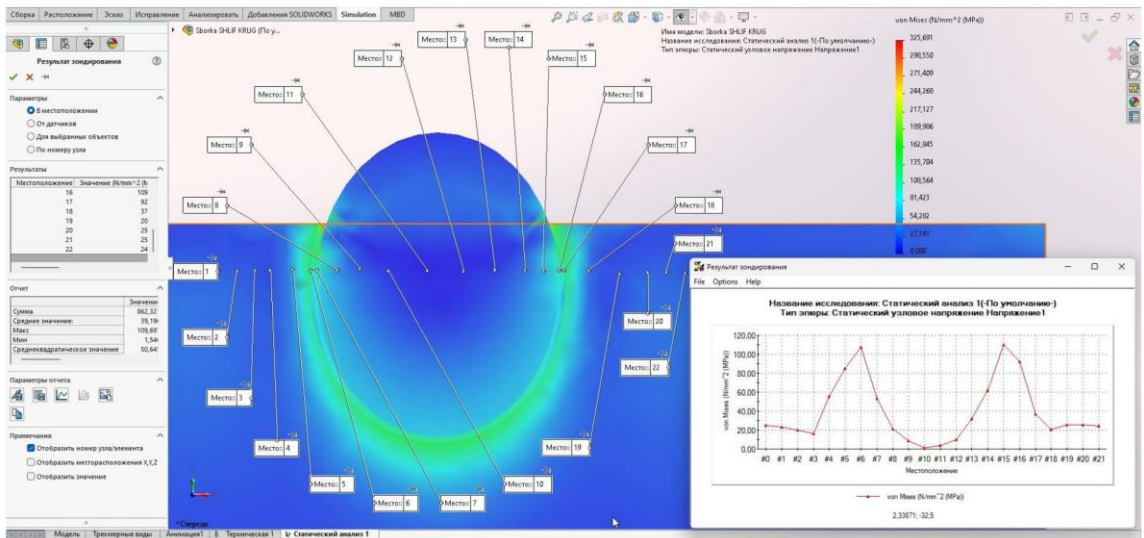




Интенсивность напряжений в плоскости YOx: покрытие - стекло



Интенсивность напряжений в плоскости YOx: покрытие - титан

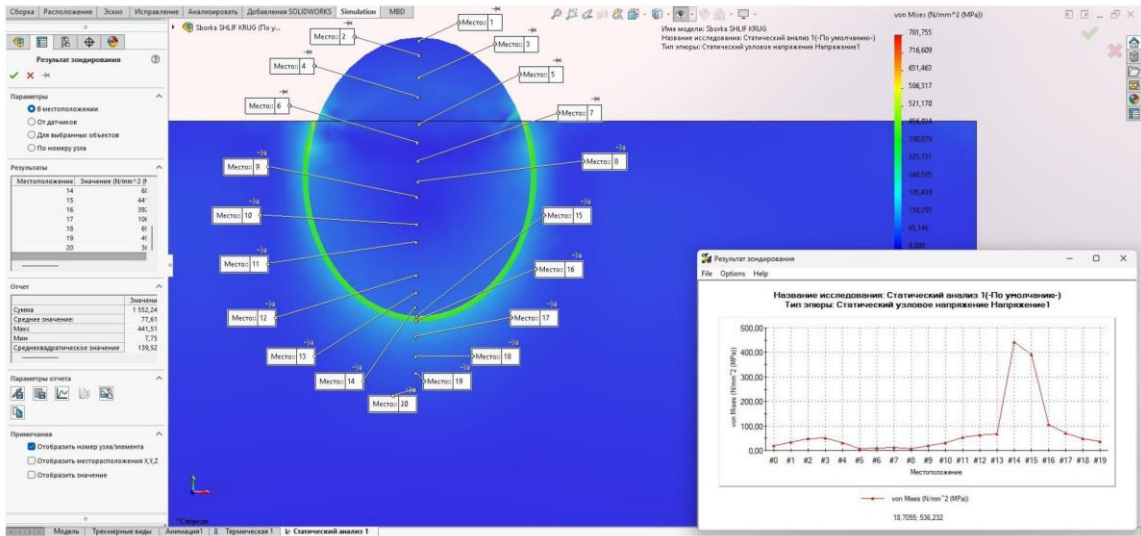


Изменение интенсивности напряжения в сечении по горизонтальной оси зерна (покрытие - стекло)



Проанализировано с помощью SOLIDWORKS Simulation

Симуляция Sborka SHLIF KRUG



Изменение интенсивности напряжения в сечении по вертикальной оси зерна (покрытие - титан)



Проанализировано с помощью SOLIDWORKS Simulation

Симуляция Sborka SHLIF KRUG