

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»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2023

Работа выполнена на кафедре «Технология и оборудование автоматизированного производства» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» (КБГУ), г. Нальчик

Научный руководитель: **Яхутлов Мартин Мухамедович**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и оборудования автоматизированного производства федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова», г. Нальчик

Официальные оппоненты: **Носенко Владимир Андреевич**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств» Волжского политехнического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», г. Волжский

Козлов Александр Михайлович
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта», г. Москва

Защита состоится «12» декабря 2023 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.332.01 при ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», по адресу: 127994, г. Москва, ГСП-4, Вадковский пер., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»: https://stankin.ru/pages/id_115/page_1400.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения (организации), просим направлять в диссертационный совет 24.2.332.01 по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.332.01, к.т.н.

Е.С. Сотова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Алмазоносная 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 значительно 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.

Наиболее эффективным методом исследования системы «алмаз-матрица» инструмента, процессы в которой в значительной степени определяют прочность алмазодержания, 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-деформирован-

ного состояния в системе «алмаз-полимерная матрица» получены с использованием упрощенных моделей, а результаты отдельных исследований не согласуются с экспериментальными данными.

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.

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.

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.

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.

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.

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, III и VII международных научно-практических конференциях «Менеджмент качества. Транспортная и информационная безопасность. Информационные технологии» (г. Санкт-Петербург, 2017, 2018 и 2022 гг.); 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.); XXIV международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектива-21» (г. Нальчик, 2021 г.); II республиканской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективные инновационные проекты молодых ученых КБР» (г. Нальчик, 2012 г.); IV всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективные инновационные проекты молодых ученых» (г. Нальчик, 2014 г.).

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

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, изложены методология и методы исследования. Приведены положения, выносимые на защиту, сведения о степени достоверности полученных результатов, об апробации и публикациях результатов работы.

Первая глава содержит информацию об алмазных шлифовальных кругах на полимерной матрице: конструкциях, алмазном оснащении, наполнителях, полимерных связующих и технологиях изготовления. Приводятся сведения о тепловом режиме алмазного шлифования, смачивании и адгезии полимеров к алмазу и к другим материалам. Рассматриваются работы, посвященные исследованиям влияния на работоспособность инструмента температур и напряженно-деформированного состояния алмазоносной части инструмента, а также покрытий на алмазы.

На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи настоящего исследования.

Вторая глава посвящена моделированию температур и напряженно-деформированного состояния в системах «алмаз-полимерная матрица» и «алмаз-покрытие-полимерная матрица» при воздействии силовых и тепловых возмущений от процесса резания.

Разработана трехмерная конечно-элементная модель с использованием программного комплекса SolidWorks. В качестве расчетной схемы принято единичное алмазное зерно эллипсоидной формы, помещенное в матрицу (рис. 1). Для моделирования покрытия на зерно в расчетной схеме выделен переходный слой между алмазом и матрицей.

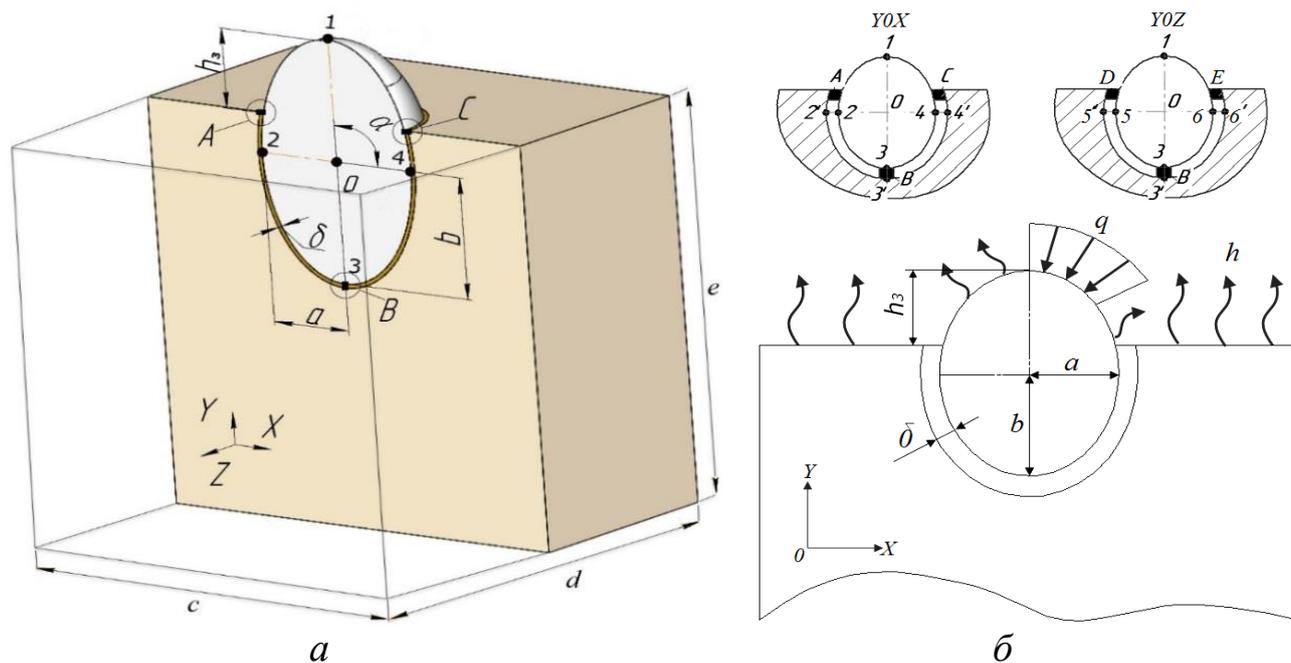


Рис. 1. Расчетная схема

Расчетная схема задается следующими параметрами: a, b – полуоси алмаза; c, d, e – размеры матрицы; h_3 – величина выступания алмаза из матрицы, δ – толщина покрытия, α – угол между вертикальной осью зерна и горизонтальной (свободной) плоскостью матрицы. Отметим, что схема позволяет варьированием указанных параметров моделировать различные формы и размеры зерна, углы его наклона и разное погружение в матрицу.

Конструкция может находиться под действием силовых и тепловых возмущений от процесса резания, приложенных к свободному контуру зерна, непосредственно контактирующему с обрабатываемым материалом: статической распределенной силы (с равнодействующей P , приложенной под углом β к вертикальной оси зерна), и удельного теплового потока q . Конвективная теплоотдача в окружающую среду на свободной от теплового потока части поверхности зерна и горизонтальной поверхности матрицы происходит с коэффициентом теплоотдачи h .

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.

Таким образом, разработанная модель позволяет варьировать физическими свойствами элементов, геометрией системы и параметрами силовых и тепловых возмущений на неё.

Необходимо отметить значительное различие физических свойств алмаза и бакелита, принятого в качестве исходного материала для моделирования матрицы. Например, модули упругости различаются в 225 раз, коэффициенты теплопроводности – в 814 раз, коэффициенты теплового расширения – в 67 раз.

На первом этапе исследований проведено моделирование стационарных температур в системе «алмаз-полимерная матрица». Предварительно была проведена оценка влияния на результаты расчетов известной существенной зависимости теплопроводности алмаза от температуры. Анализ показал, что максимальные погрешности расчетов температуры в покрытии и матрице по линейной модели составляют не более 5 %. Исходя из этого, дальнейшие расчеты проводились при значении коэффициента теплопроводности алмаза при нормальной температуре (20 °C).

Как видно на рис. 2, где представлены результаты расчетов температурного поля в системе, зерно прогревается практически равномерно из-за значительного различия теплопроводности алмаза и бакелита.

На рис. 3 представлены полученные закономерности изменения температуры в сечении по горизонтальной оси зерна при различных значениях коэффициента теплопроводности матрицы ($Вт/(м \cdot град)$).

На рис. 4 приведены результаты расчетов температур для диапазона коэффициентов теплопроводности ($Вт/(м \cdot град)$) покрытия $0,1 \leq \lambda_{покр} \leq 399$. Верхняя граница диапазона соответствует покрытию из меди.

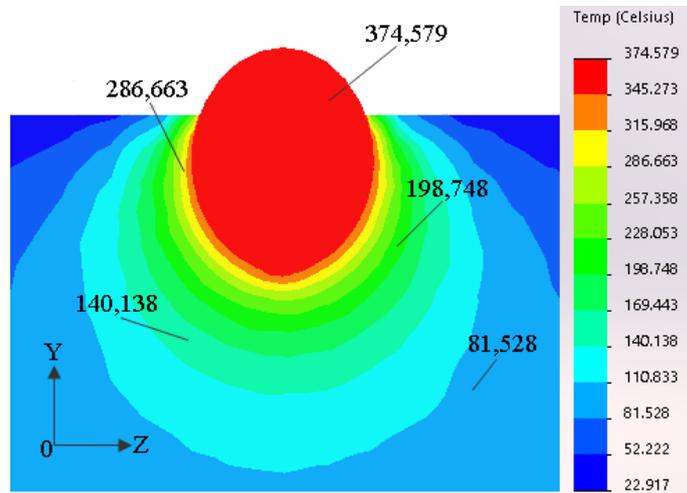


Рис. 2. Температурное поле в системе

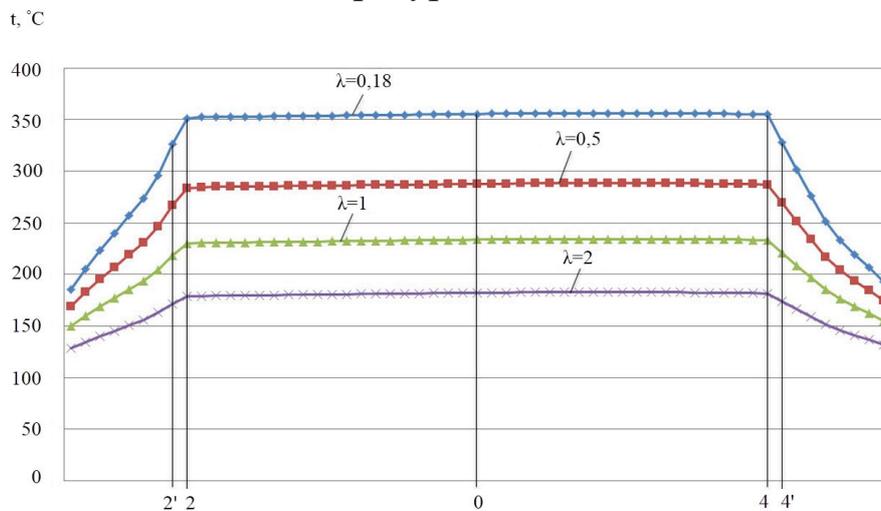


Рис. 3. Изменение температуры в сечении по горизонтальной оси зерна в плоскости YOX при различных значениях коэффициента теплопроводности матрицы

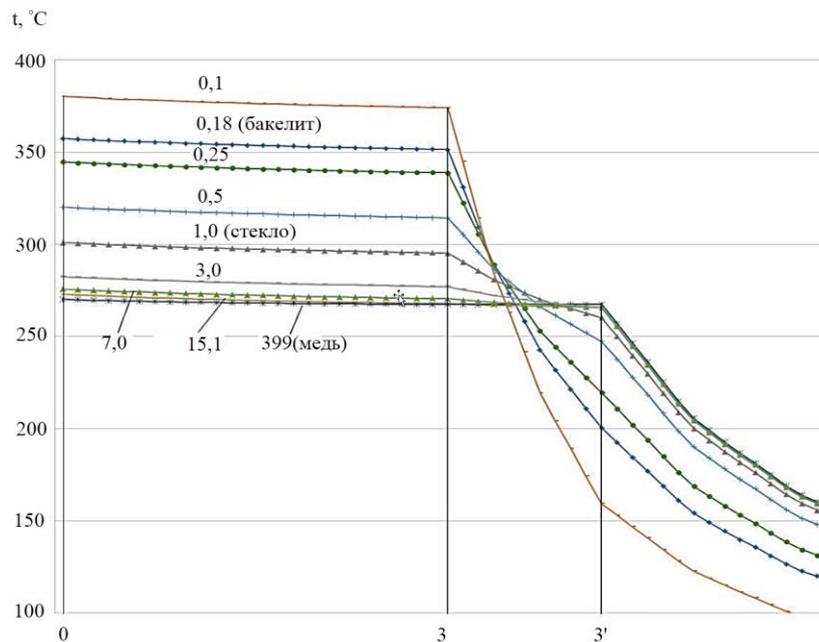


Рис. 4. Изменение температуры в сечении вдоль вертикальной оси зерна в плоскости YOX при различной теплопроводности материала покрытия

Отмечено, что при $\lambda_{\text{покр}} \lesssim 4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$, 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 $\lambda_{\text{покр}} \gtrsim 4$, температура в зерне не зависит от $\lambda_{\text{покр}}$ и отсутствует падение температуры в покрытии. Таким образом, значение $\lambda_{\text{покр}} \approx 4$ является пороговым, при превышении которого температура в системе, в том числе на границе раздела покрытия и матрицы практически не меняется.

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. 5 показаны результаты исследования влияния толщины никелевого покрытия на температуру в системе. Малые толщины (до $\approx 0,02$ мм) практически не влияют на температуры в исследуемой системе. При увеличении толщины покрытия температура в зерне и, соответственно, температура на границе покрытия и матрицы снижается. По-видимому, это объясняется интенсификацией конвективной теплоотдачи охлаждаемой поверхности покрытия за счет увеличения ее площади.

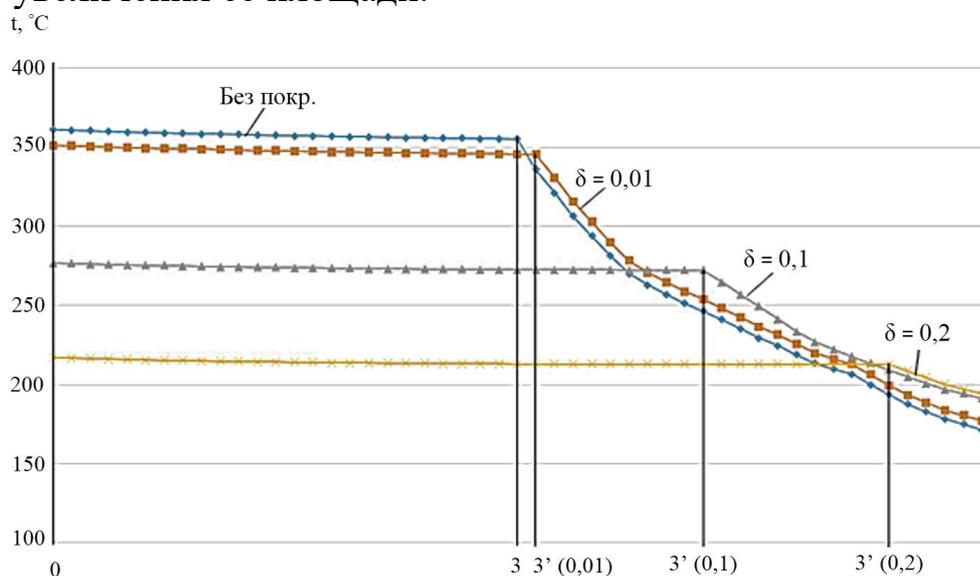


Рис. 5. Изменение температуры в сечении вдоль вертикальной оси зерна в плоскости $Y0X$ при различной толщине никелевого покрытия

Таким образом, использование покрытия может существенно снижать температуру на границе раздела покрытия и матрицы, что весьма важно для снижения возможности термической деструкции полимера.

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.

Исследования полей температурных напряжений в системе «алмаз-полимерная матрица» показали, что максимальная интенсивность напряжений имеет место на границе зерна и матрицы (рис. 6). При этом отмечено, что градиент температурных напряжений от границы в стороны алмаза значительно выше, чем в сторону матрицы. Картина эквивалентных деформаций в системе «алмаз-матрица» (рис. 7) показывает, как влияет отмеченный выше градиент свойств рассматриваемого композиционного материала на его напряженно-деформированное состояние.

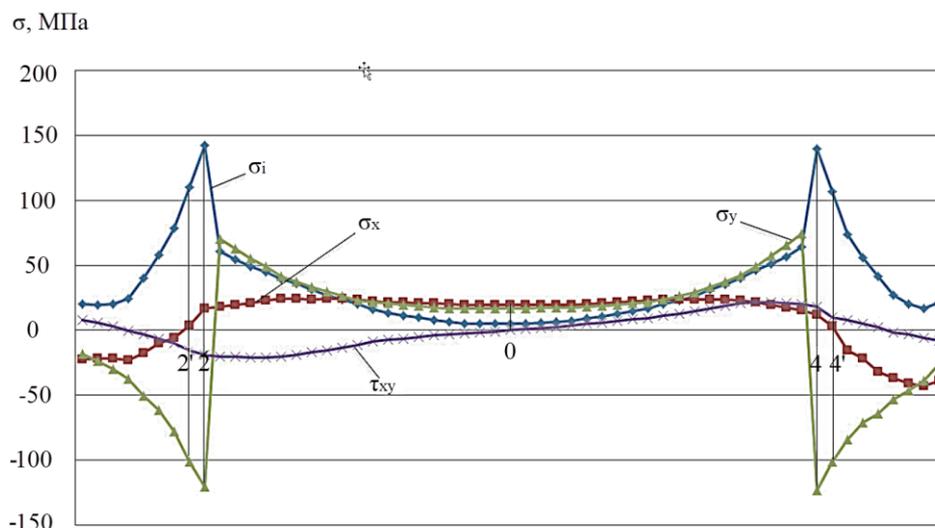


Рис. 6. Распределение температурных напряжений в сечении по горизонтальной оси зерна в плоскости $Y0X$

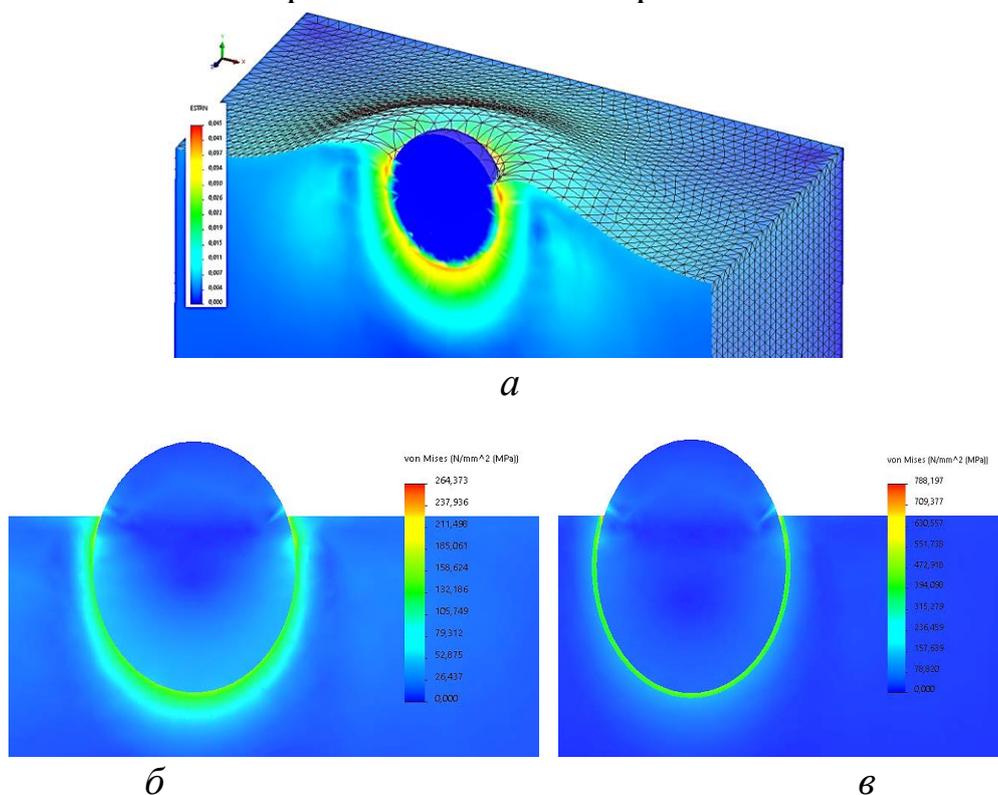


Рис. 7. Картины эквивалентных деформаций (*а*) и интенсивности напряжений в плоскости $Y0X$ при отсутствии покрытия (*б*) и покрытия из титана (*в*)

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 (рис. 8).

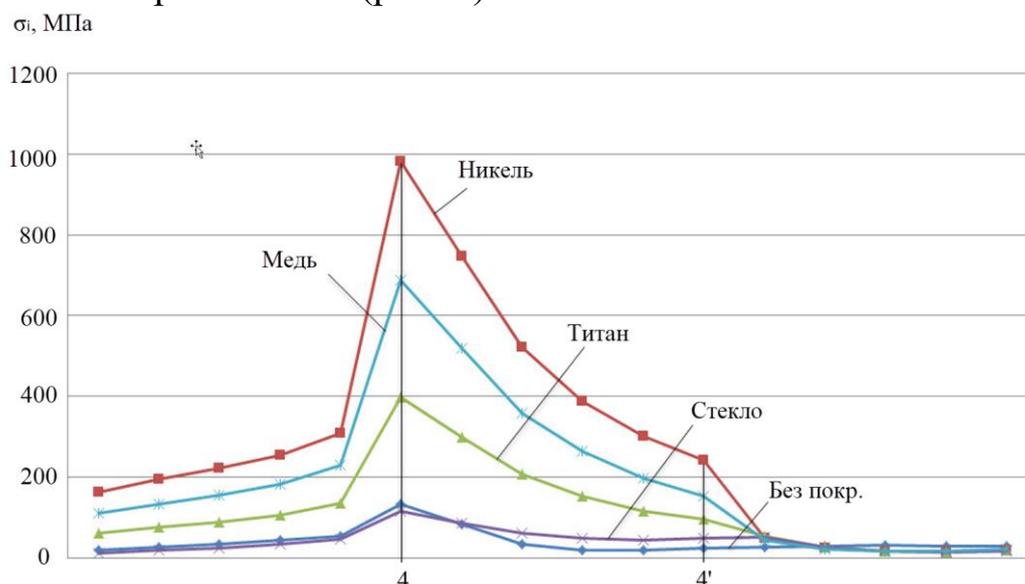


Рис. 8. Изменение интенсивности температурных напряжений в сечении по горизонтальной оси зерна в плоскости $Y0X$ при различных материалах покрытия, толщиной 0,1 мм

Численные эксперименты для случая использования никелевого покрытия показали, что с увеличением его толщины напряжения в системе уменьшаются (рис. 9). Так, увеличение толщины покрытия от базового значения в экспериментах, равного 0,01 мм до 0,2 мм приводит к снижению максимальных напряжений (на границе зерна и покрытия) примерно в 1,6 раза. Напряжения на границе покрытия и матрицы уменьшаются примерно в 8 раз.

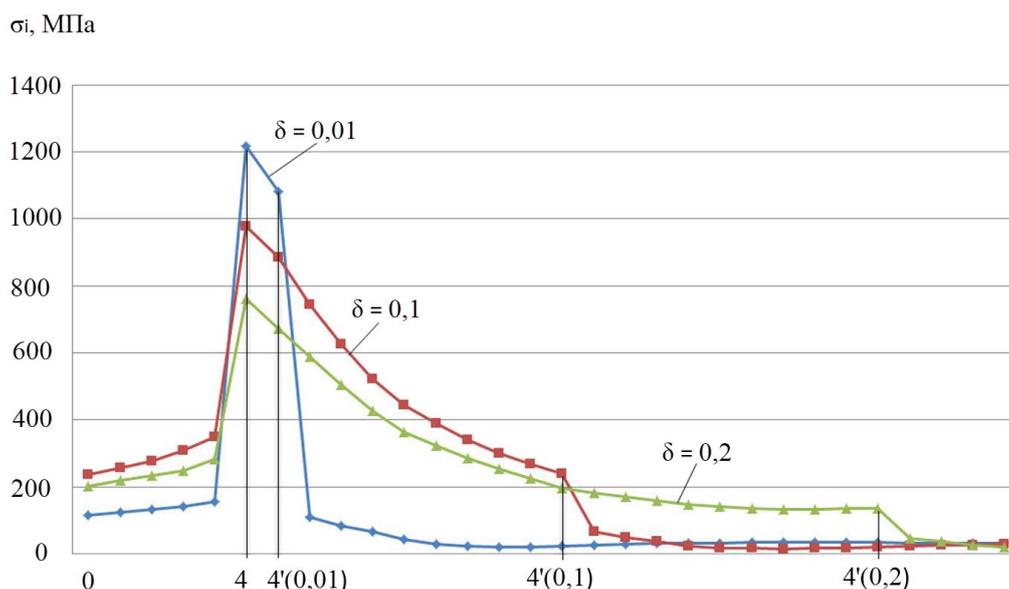


Рис. 9. Распределение температурных напряжений по горизонтальной оси в плоскости $Y0X$ при различных толщинах никелевого покрытия (мм)

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 поля температур в системе при покрытиях из этих металлов практически не отличаются, полученные закономерности объясняются значениями модуля Юнга и коэффициентами теплового расширения этих материалов.

Также получены зависимости температурных напряжений от коэффициентов теплопроводности и теплового расширения материала матрицы при использовании различных покрытий. Для всех покрытий имеет место снижение интенсивности напряжений при увеличении теплопроводности матрицы, что связывается, прежде всего, с соответствующим характером изменения температурного поля в системе.

Моделирование напряжений в системе «алмаз-полимерная матрица» при одновременном действии силовых и температурных возмущений показало, что температурные напряжения значительно превышают напряжения от силовых воздействий.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям алмазносной части шлифовальных кругов на бакелитовом связующем.

Исследования поверхности зерен проводились на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA3LMH с EDX микрозондом для химического анализа. На рис. 10 а, б показаны снимки синтетического монокристаллического алмазного шлифпорошка AC4 200/160. Хорошо видно, что в порошке, наряду с отдельными зернами, присутствуют агрегаты и сростки, при этом поверхности компонентов порошка имеют значительное количество пор, трещин и сколов.

На рис. 10 в, г приведены снимки алмазов той же марки с покрытием никелем с массовой долей 56 %, осуществленным электрохимическим методом. При большом увеличении хорошо видна развитая микрогеометрия поверхностей в виде многочисленных полусфер, выступающих над поверхностью покрытия и покрывающих практически всю поверхность зерна. Такая морфология поверхности покрытия создается регулированием условий осаждения и должна способствовать увеличению прочности удержания зёрен в матрице.

Взаимодействие между компонентами композиционных алмазосодержащих материалов на бакелитовом связующем исследовалось с использованием рентгеновского дифрактометра D2 Phaser.

Исследовались образцы в виде фрагментов алмазносного слоя кругов: серийного – 1A1 200×10×5×76 AC4 200/160 B1-O1 100; без алмазов, изготовленного по технологии серийного круга; опытного – на основе алмазов с покрытием – 1A1 200×10×5×76 AC4 200/160 Ni56 B1-O1 100. Соответствующие рентгенограммы образцов представлены на рис. 11, 12 и 13.

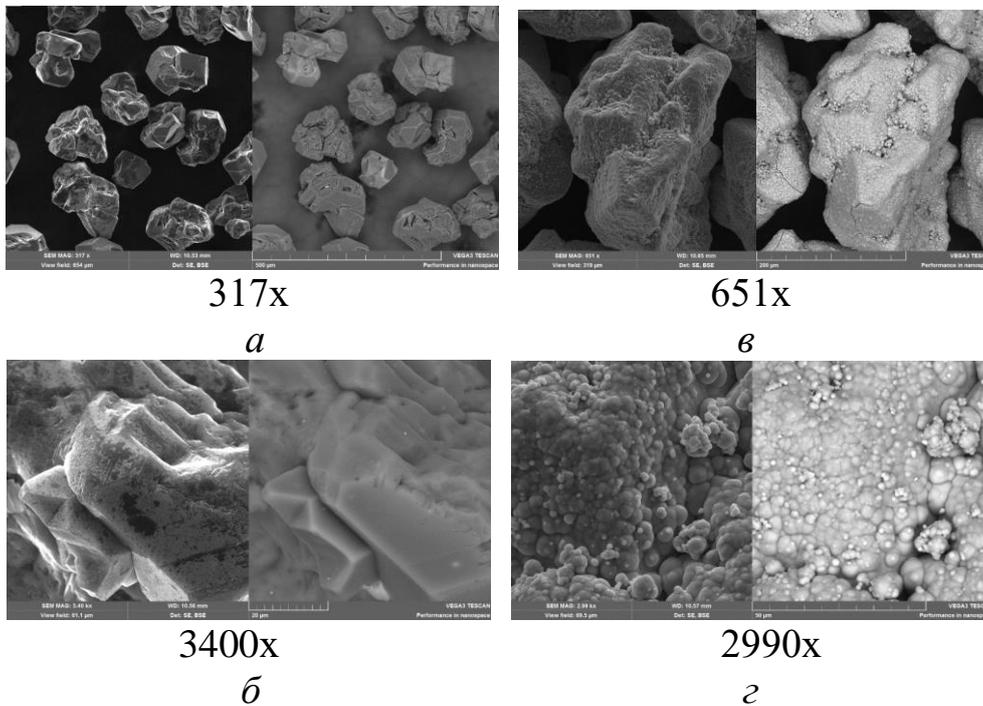


Рис. 10. Электронно-микроскопическое изображение алмазов марки АС4 200/160: без покрытия, а – общий вид порошка; б – поверхность зерна; с покрытием никелем, в – отдельное зерно; г – поверхность зерна

Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

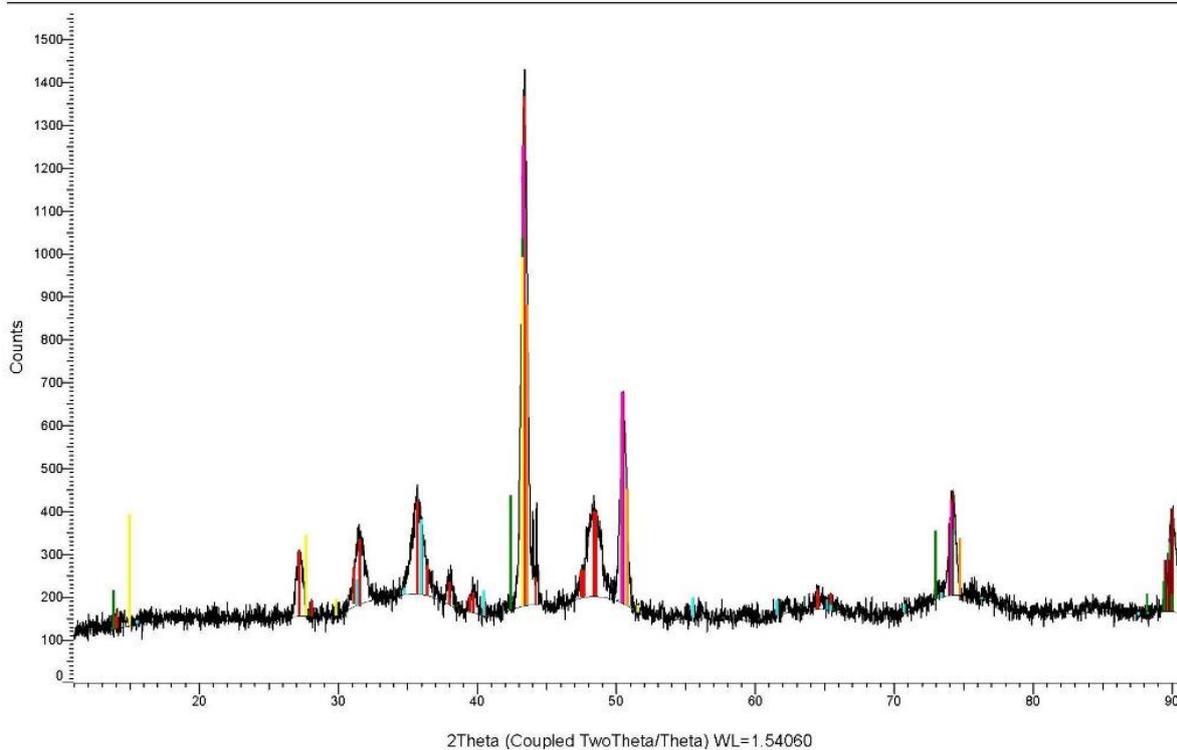


Рис. 11. Рентгенограмма образца из серийного круга

Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

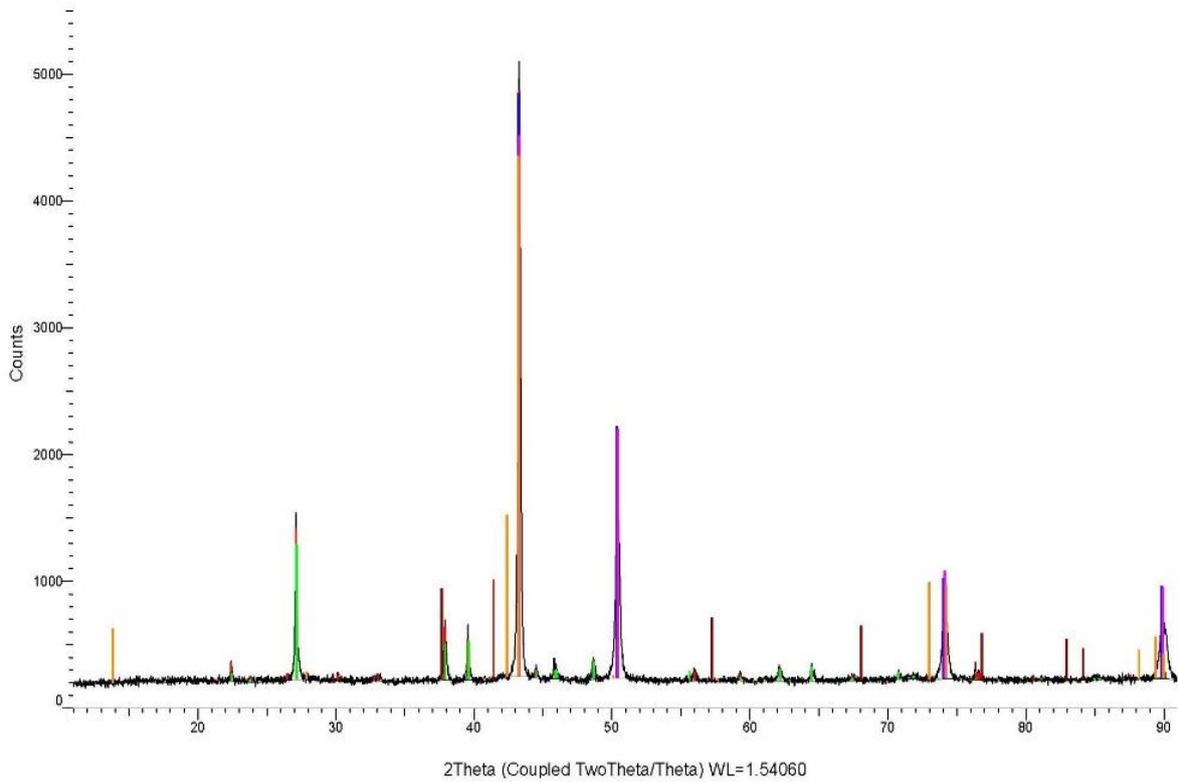


Рис. 12. Рентгенограмма образца из круга без алмазов

Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

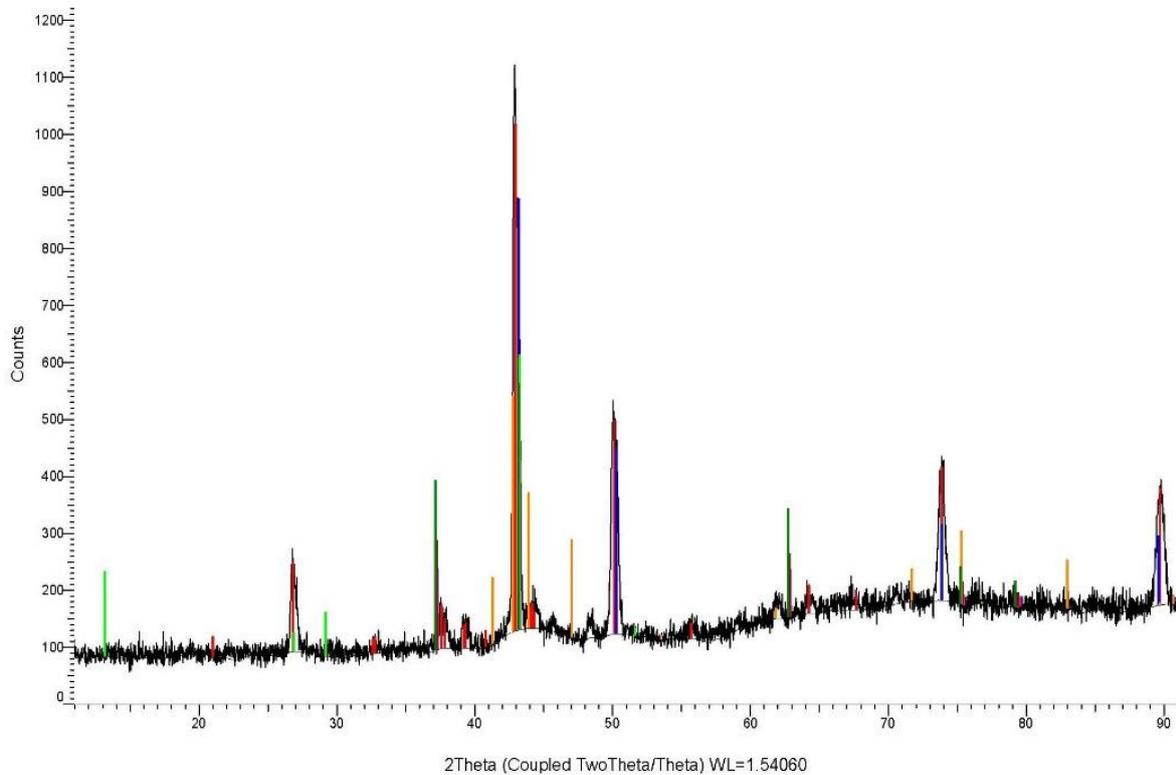


Рис. 13. Рентгенограмма образца из круга с алмазами с никелевым покрытием

Анализ этих результатов не выявил взаимодействия бакелита с углеродом фазы алмаза в процессе изготовления серийного круга и с никелевым покрытием алмаза в процессе изготовления опытных кругов. Анализ, проведённый по соответствующим диаграммам состояния, позволяет исключить возможность химического взаимодействия никеля с другими компонентами связки – висмутом и медью.

Таким образом, исследования показали, что в процессе изготовления инструмента компоненты композиционного алмазосодержащего материала на бакелитовом связующем на основе алмазов без покрытия и с покрытием никелем сохраняют свои особенности, не претерпевая никаких химических изменений.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям влияния никелевых покрытий на алмазы на работоспособность алмазных шлифовальных кругов. Исследовалась работоспособность кругов 1А1 200×10×5×76 АС4 200/160 В1-О1 100 серийного производства и аналогичных экспериментальных кругов с никелевым покрытием алмазных зерен 1А1 200×10×5×76 АС4 200/160 Ni56 В1-О1 100.

Испытания проводились в соответствии с методикой, установленной межгосударственным стандартом – ГОСТ 16181-82 Круги алмазные шлифовальные. Работоспособность кругов оценивалась по удельному расходу алмазов, определяемому в соответствии с установленной стандартом методикой как отношение массы израсходованного алмаза к объёму снятого обрабатываемого материала. В процессе экспериментов контролировался и другой показатель работоспособности кругов – шероховатость обработанной поверхности, и оценивалось её соответствие требованиям указанного стандарта.

Исследования проводились на плоскошлифовальном станке модели ЗГ71 при шлифовании заготовок из твердосплавной пластины ВК8. Режимы и условия шлифования соответствовали требованиям стандарта.

По разработанной конечно-элементной модели были проведены расчеты по определению эффективности толщины никелевого покрытия зёрен экспериментальных кругов. Численные эксперименты показали, что при расчетной толщине покрытия на зернах порядка 0,012 мм, должно быть обеспечено расчетное снижение температуры примерно на 18 %. Расчеты показали, что имеется существенный резерв снижения указанной температуры увеличением толщины покрытия.

Испытания показали, что среднее значение удельного расхода алмазов серийных кругов составляет $15,51 \text{ мг/см}^3$, а кругов, оснащенных алмазами с никелевым покрытием, – $8,58 \text{ мг/см}^3$. Таким образом, удельный расход алмазов экспериментальных кругов в 1,81 раза ниже, чем серийных. При этом, в процессе экспериментов не выявлено отклонений шероховатости обработанной поверхности от требования стандарта – параметр R_a не превышал 1,25 мкм.

Считаем, что высокая работоспособность шлифовальных кругов, оснащенных алмазами с покрытием, связана со снижением тепловой нагрузки на связующее и с лучшим механическим зацеплением зерен с покрытием вследствие более развитой микрогеометрии их поверхностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

Основные результаты и выводы по работе:

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 име-

ют 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 РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В российских журналах из перечня ВАК

1. Яхутлов М.М., Лигидов М.Х., Батыров У.Д., Карданова М.Р., **Деунезев З.Н.** Исследование тепловой нагрузки на алмазные шлифовальные круги // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2013. – Т. III, № 6. – С. 50–53.
2. Яхутлов М.М., Батыров У.Д., Карданова М.Р., **Деунезев З.Н.**, Гутов А.А. Исследование температурных напряжений в инструментальном алмазосодержащем композите // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. – № 3. – С. 99–103.
3. Яхутлов М.М., Батыров У.Д., Тлибеков А.Х., Карданова М.Р., Гутов А.А., **Деунезев З.Н.** Моделирование напряженно-деформированного состояния алмазного инструмента при действии сил резания // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2015. – Т. V, № 5. – С. 66–70.
4. Яхутлов М.М., Батыров У.Д., Карданова М.Р., **Деунезев З.Н.**, Гутов А.А. Исследование нестационарного теплового процесса в алмазосодержащем композите // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2015. – № 4. – С. 108–113.
5. Яхутлов М.М., Батыров У.Д., Карданова М.Р., Гутов А.А., **Деунезев З.Н.** Моделирование динамических нагрузок на алмазно-абразивный инструмент // Качество. Инновации. Образование. – 2016. – № 8–10. – С. 107–112.
6. Яхутлов М.М., Батыров У.Д., Карданова М.Р., **Деунезев З.Н.**, Гутов А.А. Исследование теплового режима в композиционном алмазосодержащем материале на полимерном связующем // Качество. Инновации. Образование. – 2016. – № 8–10. – С. 112–119.
7. **Деунезев З.Н.**, Карданова М.Р., Кушхов Х.Б., Тхабисимова М.М., Яхутлов М.М. Численное моделирование температурного поля в алмазных шлифовальных кругах // Качество. Инновации. Образование. – 2020. – № 5 (169). – С. 60–66.
8. **Деунезев З.Н.** Снижение тепловой нагрузки на полимерную матрицу алмазных шлифовальных кругов // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2022. – Т. XII, № 1. – С. 43–48.
9. **Деунезев З.Н.**, Карданова М.Р., Бечелова А.Р., Кушхов Х.Б., Тхабисимова М.М., Яхутлов М.М. Моделирование температурных напряжений в алмазных шлифовальных кругах // Качество. Инновации. Образование. – 2022. – № 4. – С. 38–43.

10. Yakhutlov M.M., Batyrov U.D., Tlibekov A.Kh., Kardanova M.R., Gutov A.A., **Deunezhev Z.N.** Simulation of Dynamic Loads on Diamond Abrasive Tool. 2016 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Technologies, IT and MQ and IS. – 2016. – P. 253–255.

11. Yakhutlov M.M., Batyrov U.D., Kardanova M.R., Gutov A.A., **Deunezhev Z.N.** Investigation of the Thermal Mode in the Composite Diamond-bearing Material in a Polymer Matrix. 2016 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Technologies, IT and MQ and IS. – 2016. – P. 250–252.

12. **Deunezhev Z.N.**, Gutov A.A., Kardanova M.R., Yakhutlov M.M., Tlibekov A.Kh. Investigation of Temperatures and Stresses in a Polymeric Instrumental Composite Containing a Diamond with Coating. 2017 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies, IT and MQ and IS. – 2017. – P. 713–715.

13. **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. XIV International Scientific and Practical Conference "New Polymer Composite Materials". – 2018. – P. 84–88.

14. **Deunezhev Z.N.**, Kardanova M.R., Yakhutlov M.M., Zhemukhov R.Sh., Zhilyaev A.A. Modeling of Non-Stationary Thermal Processes in Composite Diamond-Containing Materials. Proceedings 2018 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS). September, 24–28. – 2018: St. Petersburg, Russia. – P. 420–422.

Статьи в сборниках трудов конференций

15. **Деунежев З.Н.**, Байказиев А.М. О роли матрицы в обеспечении работоспособности алмазно-абразивного инструмента // Перспективные инновационные проекты молодых ученых КБР: материалы II республиканской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2012. – С. 159–162.

16. **Деунежев З.Н.**, Гутов А.А. Эффективность наполнителей для алмазных шлифовальных кругов // Перспективные инновационные проекты молодых ученых КБР: материалы II республиканской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2012. – С. 330–335.

17. Яхутлов М.М., Карамурзов Б.С., Карданова М.Р., **Деунежев З.Н.** Схематизация источника тепла при моделировании температурного поля в алмазном шлифовальном круге // Наука, техника и технология XXI века (НТТ-

2013): материалы V международной научно-технической конференции. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2013. С. 3-8.

18. Яхутлов М.М., Лигидов М.Х., Карданова М.Р., **Деунежев З.Н.**, Гутов А.А. Снижение тепловой нагрузки на алмазные шлифовальные круги // Наука, техника и технология XXI века (НТТ-2013): материалы V международной научно-технической конференции. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2013. – С. 107–111.

19. Гутов А.А., **Деунежев З.Н.**, Бозиев О.Х. О силах и температурах при обработке алмазным отрезным кругом // Наука, техника и технология XXI века (НТТ-2013): материалы V международной научно-технической конференции. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2013. – С. 111–115.

20. **Деунежев З.Н.**, Гутов А.А. Исследование полей температур в алмазных шлифовальных кругах // Перспективные инновационные проекты молодых ученых: материалы IV всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2014. – С. 37–39.

21. **Деунежев З.Н.**, Карданова М.Р. Моделирование напряженного состояния в алмазных шлифовальных кругах в зависимости от ориентации зерна // Прорывное развитие экономики России: условия, инструменты, эффекты: сборник статей международной научно-практической конференции. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2018. – С. 143–146.

22. **Деунежев З.Н.** О влиянии наполнителей на работоспособность алмазных кругов на полимерной матрице // Прорывное развитие экономики России: условия, инструменты, эффекты: сборник статей международной научно-практической конференции. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2018. – С. 147–150.

23. **Деунежев З.Н.** Экспериментальные исследования работоспособности алмазных шлифовальных кругов на полимерной матрице // «Перспектива-2021»: материалы Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых». – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, – 2021. – Т. 4. – С. 80–83.