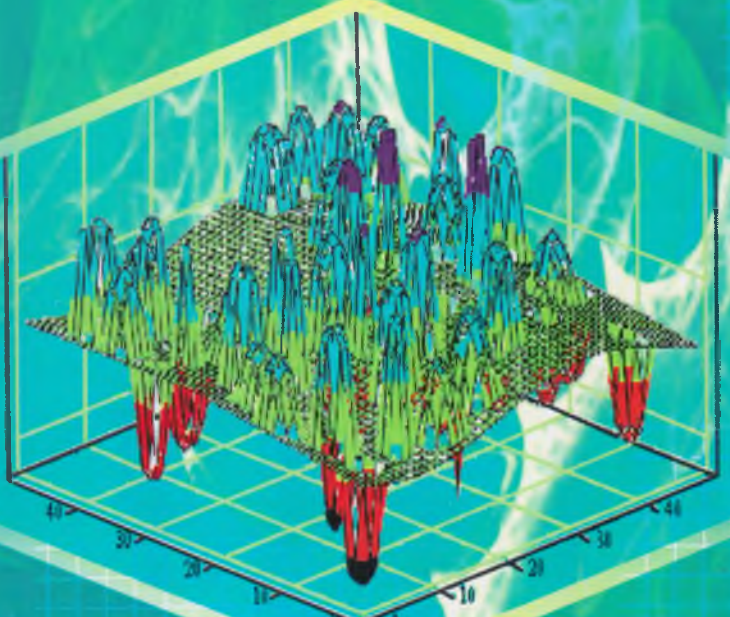
А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. А. Федорович

3D МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ И ПРОЦЕССОВ ШЛИФОВАНИЯ



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«Харьковский политехнический институт»

А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок, В.А. Федорович

3D МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ И ПРОЦЕССОВ ШЛИФОВАНИЯ

Учебное пособие

Утверждено
редакционно-издательским
советом университета,
протокол № 2 от 02.06.04 г.

Харьков НТУ «ХПИ» 2006

ББК 34.59
Г75
УДК 621.92

Рецензенты: *Ю.Н. Внуков*, докт. техн. наук, проректор, Запорожский технический университет
В.А. Залога, докт. техн. наук, заведующий кафедрой, Сумской государственный университет

У навчальному посібнику викладаються основи 3D моделювання алмазно-абразивних інструментів і процесів шліфування. Розглядаються сучасні тенденції об’єктно-орієнтованого статистичного моделювання стосовно алмазно-абразивних інструментів, напружено-деформованого стану зони шліфування, а також питання практичного застосування результатів 3D моделювання.

Грабченко А.И. и др.
Г75 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования: Учеб. пособие / А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок, В.А. Федорович. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – 364 с. - На русск. яз.

ISBN 966-593-457-0

В учебном пособии излагаются основы 3D моделирования алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования. Рассматриваются современные тенденции объектно-ориентированного статистического моделирования применительно к алмазно-абразивным инструментам, напряженно-деформированному состоянию зоны шлифования, а также вопросы практического применения результатов 3D моделирования.

Предназначено для студентов, магистров и аспирантов, преподавателей технических вузов, а также может быть полезным для специалистов-технологов.

Ил. 149. Табл. 27. Библиогр. 46 назв.

ББК 34.59

ISBN 966-593-457-0

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Alea iacta est – Жребий брошен.

Чем больше человек будет становиться человеком, тем меньше он согласится на что-либо иное, кроме бесконечного и неистребимого движения к новому.
Пьер Тейяр де Шарден

Современные тенденции создания наукоемкой продукции характеризуются резким расширением приложений математики, во многом связанным с созданием и развитием средств вычислительной техники. Суть математизации состоит в построении математических моделей явлений и процессов и разработке методов их исследования. В физике и механике, являющихся базой при разработке рабочих процессов алмазно-абразивной обработки материалов, построение математических моделей для описания различных явлений и изучение этих моделей с целью объяснения старых или предсказания новых эффектов являются общепринятыми. Это положение должно быть хорошо усвоено студентами.

В настоящее время в мировой практике при изучении процессов обработки материалов резанием наблюдается тенденция перехода от 2D к 3D моделированию, диктуемая необходимостью повышения адекватности и информационной достаточности моделей. Предпосылкой такого перехода является развитие методов статистического моделирования и конечных элементов, аппаратных возможностей вычислительной техники и программного обеспечения на базе визуальных объектно-ориентированных языков программирования.

Однако системы для реалистического моделирования абразивно-алмазных инструментов в стране и за рубежом отсутствуют, в высших учебных заведениях теоретические основы такого моделирования излагаются крайне недостаточно. Это связано с отсутствием научно-методологической базы для решения такой задачи. Создание систем 3D моделирования абразивно-алмазных инструментов позволяет существенно сократить объем экспериментальных исследований для определения рациональных конструктивных параметров, оптимальных условий их изготовления и использования.

Предлагаемая методология 3D моделирования основана на научных положениях теории резания материалов, формообразования поверхностей, проектирования режущих инструментов, теоретической и прикладной статистике, методе конечных элементов, изложенных в работах отечественных и зарубежных ученых. Разработан аппарат статистического объектно-ориентированного 3D моделирования применительно к предметной области абразивной обработки, использующий в качестве основы статистическое моделирование (метод Монте-Карло) и методы объектного моделирования, являющиеся основой современных методов программирования. При изучении процесса алмазного шлифования использована комлексная методология исследования единой 3D системы «обрабатываемый материал–зерно–связка», включающая 3D моделирование и экспериментальное изучение 3D параметров взаимодействующих поверхностей, изучение 3D напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны шлифования и методики исследования процесса приспосабливаемости при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов. Использованная методология позволяет оценивать 3D НДС всех элементов системы одновременно, что важно при определении области оптимальных сочетаний их физико-механических свойств и режимов взаимодействия. Трехмерный подход существенно повышает достоверность результатов по сравнению с решением плоских задач, но главное – доказывает обучающемуся необходимость и эффективность трёхмерного представления объектов и процессов.

Учебное пособие составлено таким образом, что каждая глава представляет собой самостоятельный шаг в последовательном переходе к трёхмерным представлениям объектов и процессов.

Глава 1. Введение в 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов. При рассмотрении путей повышения эффективности шлифования акцент сделан на классификации методов и способов формообразования рабочей поверхности для их моделирования. На этой основе излагаются методологии 3D моделирования алмазно-абразивных инструментов.

Глава 2. Параметризация структуры алмазосодержащего слоя. Как исходные рассматриваются вопросы параметризации структуры и элементов абразивного слоя кругов из сверхтвердых материалов: модификация параметров законов распределения для решения задач статистического моделирования; методология генерирования последовательностей значений элементов абразивного слоя с заданными статистическими свойствами.

Глава 3. Система 3D моделирования алмазно-абразивного инструмента. Изложена разработанная концепция 3D моделирования алмазно-абразивных инструментов на базе объектно-статистической методологии – статистическое моделирование с реализацией в объектно-ориентированной среде программирования. Методология исследования процесса изготовления алмазно-абразивных инструментов базируется на 3D моделировании напряженно-деформированного состояния зоны спекания.

Глава 4. 3D методология процесса алмазного шлифования. Рассмотрена методология комплексного исследования шлифования как функционирования единой 3D системы «обрабатываемый материал–зерно–связка», включающей 3D моделирование и экспериментальное изучение 3D параметров взаимодействующих поверхностей, и изучение 3D напряженно-деформированного состояния зоны шлифования.

Глава 5. Моделирование напряженно-деформированного состояния зоны шлифования. Предложенный подход позволяет на теоретическом уровне исследовать микроразрушение элементов системы «СТМ–зерно–связка» в процессе алмазного шлифования при различных сочетаниях характеристик инструментов, режимов шлифования и др.

Глава 6. Топографическая приспосабливаемость рабочих поверхностей в зоне шлифования. Приводится теоретико-экспериментальный анализ топографической приспосабливаемости 3D параметров топографии рабочей поверхности круга и обрабатываемой поверхности сверхтвердого материала при алмазном шлифовании.

Глава 7. Практическое применение результатов 3D моделирования алмазно-абразивного инструмента и процесса шлифования. Представлен комплекс примеров практического использования методологии 3D моделирования алмазно-абразивного инструмента и процесса шлифования. Приведены результаты модельных и теоретических исследований статистических механизмов формирования рабочей поверхности алмазно-абразивных инструментов. Изложена 3D методология определения оптимальных характеристик алмазных кругов на этапах изготовления и эксплуатации.

В пособии приводятся примеры использования таких пакетов программ, как объектно-ориентированная среда управления базами данных и создания приложений Visual FoxPro; математические пакеты MathCad и Maple; пакет для статистической обработки данных Statistica; пакеты для моделирования методом конечных элементов Cosmos и Third Wave AdvandEdge.

Разделы 1–3, 7.1 написаны А. И. Грабченко и В. Л. Доброскоком; 4–6, 7.2–7.5 − А. И. Грабченко и В. А. Федоровичем.

Авторы выражают глубокую благодарность всем помощникам, консультантам и рецензентам, обеспечившим выпуск настоящего пособия.

Авторы понимают, что при написании пособия могли быть использованы иные критерии отбора и методика подачи материала, поэтому будут благодарны за все замечания и предложения.

Адрес для переписки: 61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ «Харьковский политехнический институт», кафедра «Резание материалов и режущие инструменты» (E-mail: grabchenko@kpi.kharkov.ua).

ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ В 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Nulla aetas ad discendum sera –
Нет возраста, позднего для обучения.

Чтобы проникнуть в сущность заурядных
явлений, требуется весьма незаурядный ум.
Уайтхед

В настоящем разделе рассмотрены пути повышения эффективности процесса шлифования, проведен анализ методов моделирования алмазно-абразивных инструментов, роль поперечного и продольного профиля кругов в оптимизации процесса, приведена классификация методов и способов формообразования рабочей поверхности алмазно-абразивных инструментов. Рассмотрены вопросы методологии 3D моделирования алмазно-абразивных инструментов.

1.1. Повышение эффективности алмазно-абразивной обработки

В последние 10–15 лет машиностроение в индустриально развитых странах добилось существенного прогресса. Гибкое рыночно ориентированное производство потребовало разработки новых, наукоемких технологий. Создание новых конструкционных и инструментальных материалов позволило резко поднять уровень функциональных, эстетических и экологических свойств изделий.

Основные направления развития обработки резанием связаны с ее интенсификацией за счет новейших и синтеза существующих методов обработки. Основная тенденция смещения технологических показателей в размерной обработке в направлении более высоких степени точности и качества изменяет соотношение отдельных видов обработки в сторону прецизионных рабочих процессов высоких технологий. Высокими можно считать технологии, обладающие совокупностью следующих основных признаков: наукоемкость; системность; физическое и математическое моделирование с целью структурно-параметрической оптимизации; высокоэффективный рабочий процесс размерной обработки; компьютерная технологическая среда и автоматизация всех этапов разработки и реализации; устойчивость и надежность; экологическая чистота. Существенным признаком высоких технологий является автоматизация, базирующаяся на компьютерном управлении всеми процессами проектирования, изготовления и сборки, на физическом, геометрическом и математическом моделировании, всестороннем анализе моделей процесса или его составляющих. Системный подход предполагает использование не отдельных математических моделей, а системы взаимосвязанных моделей с непременной параметрической и структурной оптимизацией.

Алмазно-абразивная обработка на современном этапе характеризуется поиском путей повышения производительности и экономичности процесса, качества и точности обрабатываемых изделий.

В большом количестве проведенных по шлифованию исследований освещаются отдельные вопросы работоспособности кругов. Одним из факторов, в значительной мере определяющим эффективность процесса шлифования, является состояние его рабочей поверхности. Направления совершенствования алмазно-абразивного инструмента связаны с улучшением его составляющих и функциональных элементов: зерна, связки, строения рабочего слоя и конструктивного исполнения рабочей поверхности круга (рис. 1.1).

Зерно. Результаты многочисленных исследований и опыт практического применения позволяют утверждать, что алмаз как абразивный материал наиболее полно отвечает условиям эффективного резания при шлифовании. К перспективным методам повышения работоспособности алмазных зерен относится нанесение специальных покрытий, агрегатирование зерен, овализация и др.

Связка. Требования к свойствам связок для алмазных кругов противоречивы. С одной стороны, для обеспечения стабильного процесса шлифования они должны иметь высокую износостойкость и прочность удержания алмазных зерен. С другой – обеспечивать высокий уровень режущей способности кругов, работая в режиме самозатачивания. Дополнительно для достижения высокого качества обработки они должны обладать антифрикционными свойствами, высокой теплопроводностью, демпфирующей и полирующей способностями. Органические и керамические связки обеспечивают возможность эксплуатации алмазных кругов при высоком и стабильном уровне их режущей способности. Однако, износостойкость и прочность удержания алмазных зерен у них низкая. Наибольшей износостойкостью обладают круги на прочных металлических связках, но они склонны к потере режущей способности в результате засаливания и сглаживания режущего рельефа. Перспективным направлением является разработка адгезионно-активных связок, обладающих повышенной прочностью удержания алмазных зерен.

Строение алмазосодержащего слоя. Традиционная характеристика – концентрация алмазов – оказывает существенное влияние на эффективность процесса шлифования и выбирается на предварительном этапе оптимизации процесса применительно к конкретным условиям обработки. Перспективными путями повышения эффективности процесса являются введение в алмазоносный слой твердых смазок для снижения коэффициента трения и заданная ориентация алмазных зерен, повышающая их работоспособность.

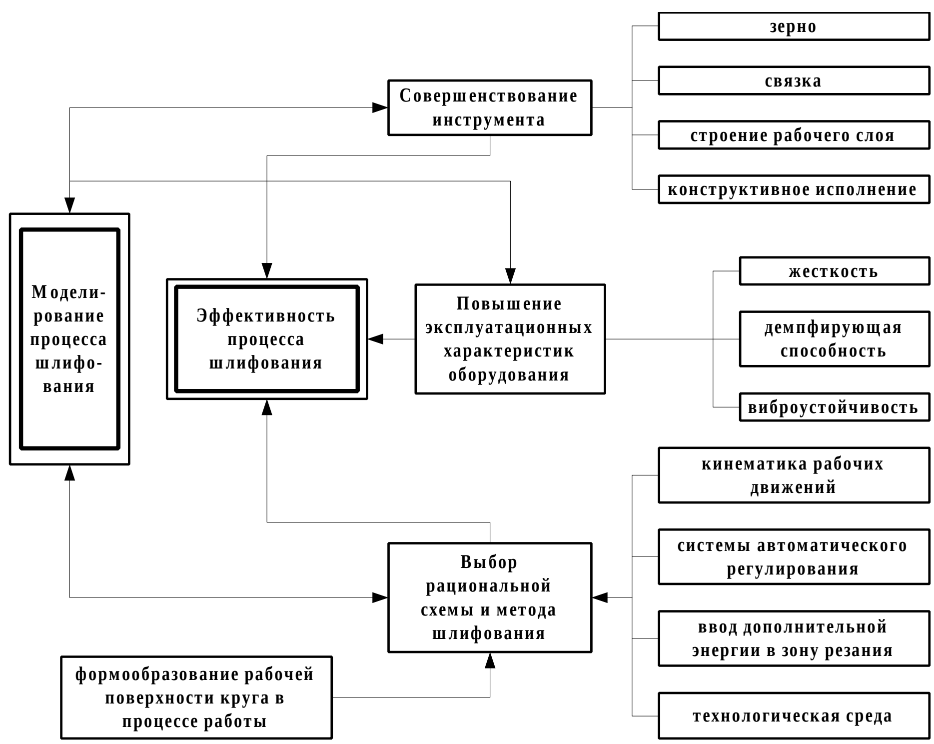


Рисунок 1.1 – Пути повышения эффективности процесса шлифования

Конструктивное исполнение рабочей поверхности. Рабочая поверхность круга может выполняться сплошной, прерывистой и многослойной с различной зернистостью и концентрацией алмазов. Особый интерес представляют шлифовальные круги с прерывистой рабочей поверхностью, позволяющие существенно повысить эффективность и уровень выходных показателей процесса.

Важным резервом повышения эффективности процесса шлифования является улучшение эксплуатационных характеристик оборудования, определяемых требуемой жесткостью, демпфирующей способностью и виброустойчивостью.

Рациональный выбор схемы и метода шлифования во многом определяет его эффективность. К перспективным направлениям можно отнести высокоскоростное, силовое, низкотемпературное прецизионное, глубинное, профильное шлифование и др. Однако выбор рациональной схемы шлифования не всегда позволяет обеспечить эффективность процесса. Это связано с изменением состояния рельефа рабочей поверхности круга и условий обработки, что особенно характерно для операций изготовления лезвийного инструмента.

Для учета изменяющихся условий обработки применяются системы автоматического регулирования процесса шлифования. Наиболее часто в качестве регулируемой величины принимается сила или мощность резания, уровень вибраций элементов станка. Применение таких систем позволяет повысить уровень качества обработанных изделий, но не исключает необходимости восстановления формы и режущей поверхности кругов.

Введение дополнительной энергии в зону резания в ряде случаев позволяет повысить эффективность процесса шлифования за счет поддержания высокой режущей способности круга. Однако при этом не удается избежать изменения заданной формы его рабочей поверхности.

Эффективность процесса шлифования можно существенно повысить путем непрерывного формообразования рабочей поверхности кругов, осуществляемого вне зоны резания. Технологический процесс алмазного шлифования кругами на прочных металлических связках с управлением рельефом рабочей поверхности можно рассматривать как новое перспективное направление повышения эффективности обработки инструментальных материалов. Для его дальнейшего совершенствования необходимо выявить параметры рельефа рабочей поверхности, в наибольшей степени ответственные за эффективность процесса шлифования, и выбрать метод их формообразования.

1.2. Моделирование алмазно-абразивных инструментов

Моделирование алмазно-абразивных инструментов является определяющим этапом при разработке теоретических основ процесса шлифования. Теоретические работы в этой области, как правило, направлены на создание модельных представлений о шлифовальном круге как объекте и получение на их основе аналитических зависимостей, связывающих исходные параметры с характеристиками расположения элементов зерен на его рабочей поверхности.

Сложность получения реалистической модели рабочей поверхности абразивного инструмента связана со стохастической природой исходного объекта. Среди всех режущих инструментов абразивные являются единственными, у которых регламентируются не геометрические параметры режущих элементов, а зерновой состав исходной навески зерен. Это затрудняет исследование рельефа инструмента, требует применения методов математической статистики при моделировании и описании результатов экспериментальных исследований.

Можно выделить *четыре основных элемента, на базе которых строятся статические модели рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента*:

– *форма и закон распределения размеров зерен;*

– *закон распределения центров зерен в абразивном пространстве;*

– *форма и размеры алмазосодержащего слоя;*

– *поверхность связки, определенным образом расположенная в абразивном пространстве*.

При теоретических расчетах и моделировании сложная геометрическая форма реальных алмазных и абразивных зерен часто заменяется упрощенным эквивалентом на базе трехосного эллипсоида: шаром или эллипсоидом вращения с постоянным соотношением осей. Проведенные специальные исследования по анализу метрической формы плоского сечения зерен из сверхтвердых материалов показали, что сечением, наиболее близким к реальной форме зерна, является эллипс. Эти данные хорошо согласуются с работами по определению коэффициента заполнения пространственной формы зерен в виде эллипсоида вращения. Модель в виде трехосного эллипсоида более точно соответствует эквивалентной форме зерен.

Следует рассмотреть три основные модели рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента, оказавшие наибольшее влияние на развитие теории шлифования материалов: Е.Н. Маслова, А.Н. Резникова и А.К. Байкалова.

Евгений Никифорович Маслов [21]. Модель зерна – шар постоянного размера, средний диаметр зерен принимается равным размеру ячейки верхнего контрольного сита в свету для основной зерновой фракции (первый размер в обозначении зернистости). Число зерен в единице объема режущего слоя круга (абразивного слоя) определяется из соотношений общего объема и объема модельных зерен с учетом концентрации алмазов в инструменте. Центры зерен равномерно распределены по всему абразивному слою, т. е. расположены в вершинах пространственной прямоугольной кубической решетки, что позволяет легко перейти к среднему расстоянию между зернами. Достаточно большой уровень допущений при построении модели позволил автору разработать стройную систему кинематики процесса шлифования, заложить основы его динамики и теплофизики.

Арон Наумович Резников [1]. Модель зерна – эллипсоид вращения с фиксированным значением отношения меньших осей к большей. Закон распределения размеров зерен задается для большей оси эллипсоида и соответствует нормальному. Число зерен в единице объема абразивного слоя определяется аналогично с Е.Н. Масловым. Построение модели рабочей поверхности производится относительно поверхности связки. Распределение центров зерен относительно поверхности связки принимается равновероятным. Расположение большей оси эллипсоида может равновероятно соответствовать трем координатным осям. Для учета неизбежных потерь зерен в процессе шлифования и правки круга вводится дополнительный параметр, позволяющий учитывать свойство связки удерживать зерна – коэффициент относительной критической заделки $\varepsilon_{кр}$. Его использование повышает уровень реалистичности моделирования и переводит его в разряд условно-динамического, т. к. учитывает результат участия зерен в резании (диспергировании) обрабатываемого материала. При построении рабочей поверхности круга автор определяет максимальную высоту выступания зерен из связки: $\Delta_{max} \cong (\mu + 3\sigma)(1 - \varepsilon_{кр})$, где μ, σ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение нормального закона распределения размеров зерен; $\varepsilon_{кр}$ – коэффициент относительной критической заделки зерен в связке. Закон распределения вершин зерен относительно наиболее выступающих принимается соответствующим закону распределения размеров зерен с параметрами, зависящими от максимальной высоты выступания зерен из связки: $\mu_в \cong (0{,}45 ... 0{,}30)\, \Delta_{max}$; $\sigma_в \cong \Delta_{max} / 6$. Принципиально важным вкладом А.Н. Резникова в развитие представлений о механизме формирования рабочей поверхности алмазно-абразивных инструментов является учет закона распределения размеров зерен в абразивном слое (исходной навеске зерен) и использование вероятностного подхода при построении модели.

Анатолий Кузьмич Байкалов [4]. Модель зерна – режущий шар, имеющий сплошную сердцевину и шаровой пояс, состоящий из режущих точек с неравномерной плотностью по глубине, заменяемый эквивалентным шаром постоянного размера. Определение среднего размера зерен производится по методике ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины [35] для расчета частиц неправильной формы. Принципиально важным вкладом А.К. Байкалова в методологию моделирования поверхности алмазно-абразивных инструментов является формулирование основных объектно-ориентированных научных положений: *понятие абразивного пространства* и условия его подобия с реальным объектом; формирование рабочей поверхности путем разделения *абразивного пространства* поверхностью связки; глубокий сравнительный анализ существующих моделей и методов их создания.

В качестве основных исследуемых признаков или геометрических свойств рабочей поверхности алмазно-абразивных инструментов, определяемых экспериментально, часто рассматриваются: расстояние между зернами; среднее расстояние между смежными по высоте вершинами зерен; высота вершин зерен относительно уровня связки или наиболее выступающих зерен.

При анализе экспериментальных данных или переходе к другим параметрам (расчетным) исследователями используются разнообразные законы распределения вершин зерен: нормальный, нормальный со смещенной теоретической кривой; Пуассона; линейный; Бета-распределение; Рел-лея; равномерный; параболический; по закону показательной функции и др.

Анализируя рассмотренные подходы, можно сделать следующие выводы:

– в результате многолетних исследований по моделированию рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента накоплен большой методический опыт и объем экспериментальных данных;

– многими исследователями *используются методы теории вероятности и прикладной статистики, как наиболее полно соответствующие физической сущности процессов изготовления и эксплуатации алмазно-абразивного инструмента, имеющего стохастическую природу*;

– *различие моделей и степень схематизации круга как реального объекта определяются целями исследования и вычислительными возможностями (аппаратными и системными) на момент проведения работ*;

– в настоящее время имеются методические предпосылки и назрела практическая необходимость в создании системы компьютерного 3D моделирования алмазно-абразивных инструментов.

1.3. Параметры рабочей поверхности алмазно-абразивных инструментов

В настоящее время взаимосвязь рельефа рабочей поверхности кругов с эффективностью процесса шлифования получила достаточно широкое признание.

Рельеф рабочей поверхности кругов целесообразно рассматривать в сечениях, ориентированных относительно скорости вращения круга (поперечный и продольный профиль рельефа рабочей поверхности). В качестве базы принимается условная наружная поверхность круга. Для кругов, работающих торцом, – плоскость, перпендикулярная оси вращения, и касательная к наиболее выступающим зернам; периферией – цилиндрическая поверхность, диаметр которой соответствует максимальному диаметру круга.

Поперечный профиль характеризуется зависимостью расстояний от наиболее выступающих зерен до условной наружной поверхности (в дальнейшем для краткости – наружной поверхности круга) по ширине круга $y = f(x)$ и параметрами режущего рельефа. Продольный профиль характеризуется параметрами волнистости (шаг $t_в$ и высота $h_в$), измеряемыми по наиболее выступающим зернам, и режущим рельефом. Основным параметром, характеризующим режущий рельеф и определяющим уровень режущей способности кругов, является высота выступания зерен над уровнем связки $h_з$. В качестве дополнительных целесообразно принять количество зерен на единице длины профиля и относительную критическую глубину их заделки в связке круга.

Одним из основных требований, обеспечивающих эффективность, является высокая режущая способность алмазных кругов. Она может обеспечиваться управлением режущим рельефом путем дозированного воздействия на связку круга в процессе шлифования. Это создает предпосылки для работы круга в режиме, эквивалентном режиму самозатачивания при отсутствии непосредственного контакта связки с обрабатываемым материалом. Отсутствие непосредственного контактирования позволяет снизить силы резания и температуру шлифования.

Однако в ряде случаев самозатачивание круга является недостаточным для проведения технологической обработки, т. к. не сохраняется геометрическая форма его рабочей поверхности. Изменение поперечного профиля происходит из-за неравномерного износа круга, что обусловлено его формой и особенностями схемы шлифования. Особенно нестабилен поперечный профиль при врезном шлифовании и обработке полузакрытых поверхностей (заточка многолезвийного и однолезвийного инструмента с положительными передними углами), что затрудняет применение на этих операциях алмазных кругов.

Стабильность процесса шлифования определяется постоянством выходных показателей обработки изделий в период всего времени работы.

Эффективность процесса шлифования также зависит от сохранения кругом требуемого продольного профиля рельефа рабочей поверхности. Самопроизвольное возникновение волн на рабочей поверхности круга приводит к резкому ухудшению выходных показателей процесса шлифования. С появлением волнистости повышаются вибрации системы СПИД, происходит ускоренный износ круга и ухудшается качество обработки изделий, особенно режущих кромок инструмента. При дальнейшем шлифовании высота волнистости увеличивается, достигая значений, определяемых амплитудно-частотной характеристикой системы СПИД.

Формирование на рабочей поверхности продольного профиля заданной характеристики позволяет повысить стабильность процесса шлифования. Шлифовальные круги с прерывистой рабочей поверхностью имеют более высокую режущую способность. Прерывистость процесса резания позволяет в ряде случаев исключить резонансный режим колебаний системы СПИД.

1.4. Классификация методов формообразования рабочей поверхности алмазно-абразивных инструментов

Целью технологических процессов размерного формообразования алмазно-абразивных инструментов является получение рельефа рабочей поверхности заданной формы, размеров и физических свойств.

До появления абразивного инструмента из сверхтвердых материалов для формообразования применялись в основном механические методы (правка шарошками, алмазными карандашами и т. д.), которые, непрерывно совершенствуясь, сохраняли неизменными исходные принципы формирования рабочей поверхности. Эти процессы в некоторых случаях оказались малопригодными для решения задач, возникающих перед абразивной обработкой, особенно в связи с появлением износостойких алмазных кругов на металлических связках и повышением требований к рельефу их рабочей поверхности.

В настоящее время к традиционным приемам формирования рабочей поверхности добавились новые. Уже сейчас их десятки, основанных на самых различных механических, физических, химических, электрохимических методах и их сочетаниях. Применение новых способов формообразования позволяет более просто и экономично решать важные задачи, стоящие перед технологией алмазно-абразивной обработки. Однако универсального и надежного способа не существует. Развитие технологии формообразования привело к появлению узких терминов («вскрытие», «правка», «очистка», «засаливание» и др.). Отсутствие общего научно-обоснованного подхода к многочисленным частным задачам, которые решались в процессе разработки способов, затрудняет проведение обоснованных оценок их возможностей, а также решение назревшей комплексной проблемы – создания требуемого рельефа алмазных кругов в процессе шлифования. Целесообразность использования определенного способа в полной мере можно определить только в рамках общей классификации при сравнительном их анализе. Поскольку некоторые задачи формообразования рельефа алмазных кругов (восстановление требуемой геометрической формы и режущих свойств) уже решаются различными способами, следует обратить внимание на поиск их общих характеристик. Это необходимо для того, чтобы сравнить различные методы и способы формообразования по технологическим, энергетическим, экономическим и др. показателям.

Несмотря на разнообразие методов и способов, существование общих понятий и характеристик определяется конечной целью – получением требуемой формы и размеров алмазно-абразивного инструмента с достаточной степенью развитости режущего рельефа, обеспечивающих высокую эффективность процессов обработки.

Рабочая поверхность круга как объект формообразования и одновременно формообразующий описывается тремя типами характеристик: геометрическими (поперечный и продольный профиль рельефа по уровню наиболее выступающих зерен или связки); совокупностью поверхностных параметров, определяющих степень развитости режущего рельефа; группой параметров, определяющих признак технологической наследственности конкретного метода (структурные изменения связки круга, субмикрорельеф).

Целесообразно классифицировать методы и способы размерного формообразования рельефа алмазно-абразивных инструментов, взяв в качестве базового – алмазные круги на токопроводных связках. Классификационные признаки (рис. 1.2) разбиты на 20 групп, каждая из которых содержит от двух до девяти признаков.

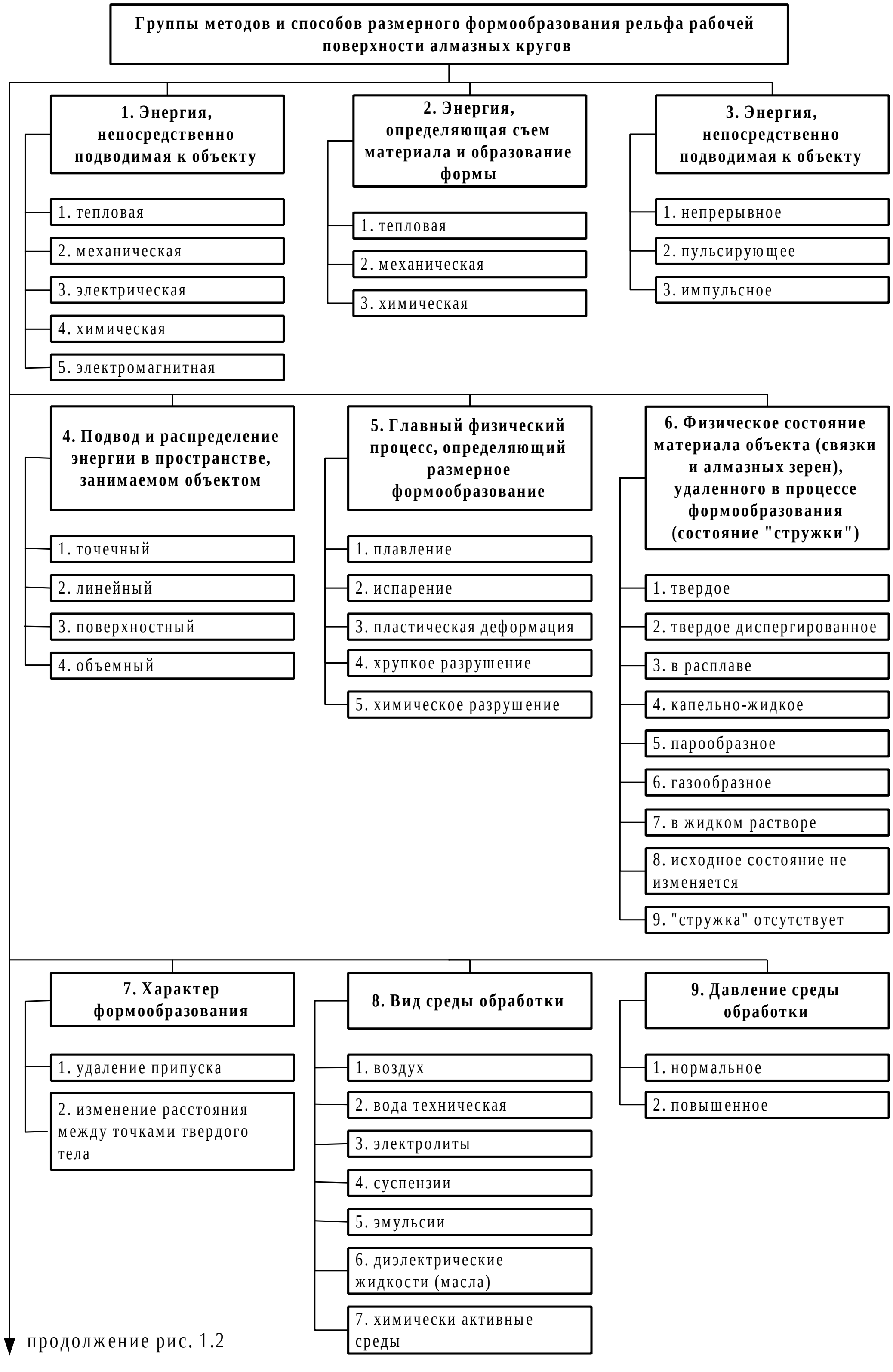


Рисунок 1.2 – Классификация методов и способов направленного формообразования

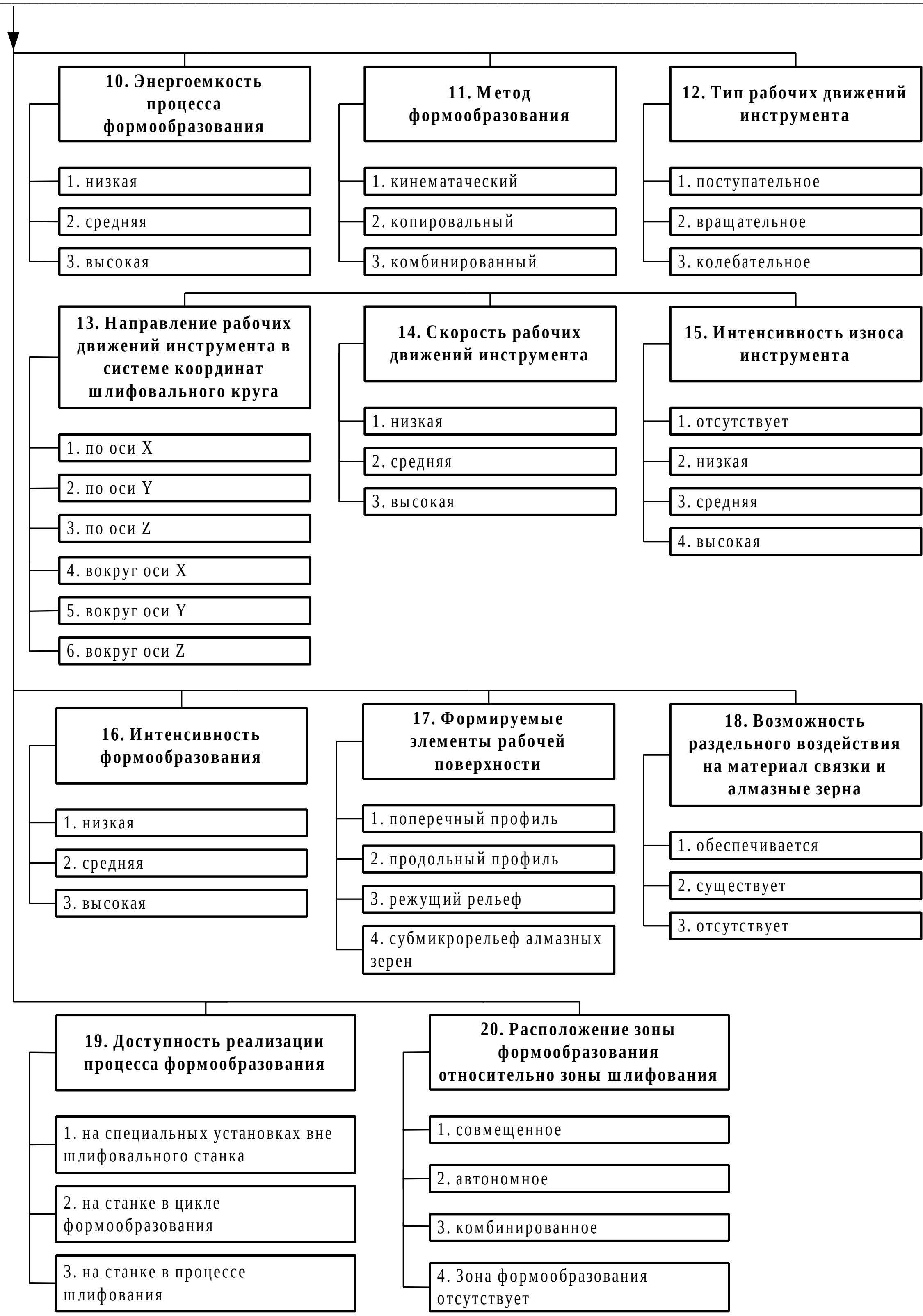


Рисунок 1.2 – Классификация методов и способов направленного формообразования (продолжение)

Группа 1 характеризует вид энергии, непосредственно подводимой к обрабатываемому объекту. Например, тепловую энергию при формировании рабочей поверхности круга методом пластического деформирования с подогревом, механическую энергию при использовании метода абразивного шлифования или пластического деформирования, электрическую энергию, химическую энергию при травлении круга в кислотах и электромагнитную энергию, например, при нагреве рабочей поверхности круга токами высокой частоты одновременно с ее формированием методом пластического деформирования.

Группа 2 характеризует энергию, определяющую физический механизм формообразования. Для электроэрозионного метода это будет тепловая, для метода обкатки абразивным кругом – механическая, для электрохимического – химическая энергия.

Группа 3 определяет характер поступления энергии к объекту: непрерывное, в течение всего процесса; пульсирующее и порциями или импульсами. Применительно к электрическим методам признаки данной группы соответствуют характеристикам электрического тока, подаваемого в зону формообразования.

Группа 4 определяет характер подвода и распределения энергии.

Группа 5 объединяет основные физические процессы, определяющие размерное формообразование.

Группа 6 определяет состояние части материала объекта, удаленного в процессе создания рабочей поверхности. Знание конечного состояния отходов позволяет составить энергетический баланс процесса.

Группа 7 характеризует основной принцип формообразования. Признак – изменение расстояния между точками твердого тела, – соответствует методу пластической деформации; а признак – удаление припуска – прочим методам.

Группы 8 и 9 отражают среду обработки и ее давление (технологические признаки).

Группа 10 характеризует энергоемкость процесса. Признаки: 1 – низкая энергоемкость; 2 – средняя; 3 – высокая – соответствуют трем энергетическим уровням. Первый энергетический уровень включает методы, при которых нарушаются силы связи только между относительно небольшой частью молекул и атомов. Поэтому при первом энергетическом уровне (верхней границей является энергия плавления материала объекта – связки круга) для преодоления сил связи требуются малые энергии. Типичными представителями этой группы будут методы пластического деформирования и обработки резанием. Второй энергетический уровень включает виды обработки с диапазоном энергий от величины плавления до величины испарения. Третий энергетический уровень превышает энергию испарения обрабатываемого материала. Сюда относятся электрические методы.

Группа 11 определяет метод формирования рабочей поверхности: кинематический, копирования и комбинированный.

Группы 12 ... 14 расширяют понятие движений формообразования и характеризуют их тип (поступательное, вращательное, колебательное), направление в системе координат шлифовального круга (по и вокруг осей *X*, *Y*, *Z*), скорость (низкая, средняя, высокая). Уровень скоростей рабочих движений инструмента (группа 14) целесообразно согласовать со скоростями при шлифовании: низкая – 10^{-9}...10^{-3} м $с^{-1}$ соответствует уровню линейных скоростей износа круга; средняя – 10^{-3}...10^{1} м $с^{-1}$ – применяемым скоростям подач; высокая – 10^{1}...10^{2} м $с^{-1}$ – скоростям вращения шлифовального круга.

Группа 15 характеризует относительную объемную интенсивность износа инструмента: износ отсутствует; низкая – износ менее 1 %; средняя – 2...20 %; высокая – более 20 %.

Группа 16 объединяет методы по уровню производительности процесса низкая – менее 1 $мм^{3}$ $с^{-1}$; средняя – 1...5 $мм^{3}$ $с^{-1}$ высокая – более 5 $мм^{3}$ $с^{-1}$.

Группа 17 определяет элементы рельефа рабочей поверхности, формирование которых обеспечивает конкретный способ: поперечный и продольный профиль, режущий рельеф, субмикрорельеф алмазных зерен.

Группы 16, 18 ... 20 характеризуют эффективность конкретного способа применительно к задачам управления рельефом рабочей поверхности алмазных кругов и конкретизируют требования, сформулированные в работе [33].

Группа 18 отражает степень избирательности воздействия на материал связки и алмазные зерна (обеспечивается, существует, отсутствует).

Группа 19 позволяет оценить доступность реализации непрерывного формообразования рельефа рабочей поверхности кругов при использовании конкретного способа (на специальных установках вне шлифовального станка, на станке в специальном цикле «формообразование», непосредственно на станке в процессе шлифования).

Группа 20 определяет наличие и расположение зоны формообразования относительно зоны шлифования (совмещенное – зоны совмещены, автономное – зоны не совпадают, комбинированное). В случае, когда зона формообразования отсутствует, его выполняют на специальных установках вне шлифовального станка (группа 19, признак 1).

Классификационные признаки (см. рис. 1.2) *не заменяют, а дополняют существующие системы классификации методов размерного формообразования. Их использование целесообразно для анализа применимости существующих способов формообразования рельефа рабочей поверхности алмазно-абразивных инструментов*.

1.5. Методология 3D моделирования алмазно-абразивных инструментов

Методологию 3D моделирования алмазно-абразивных инструментов следует рассматривать в связи с возможностями статистического моделирования и концептуального объектно-ориентированного программирования.

Статистическое моделирование. Исследовать вероятностную модель можно двумя способами: математическим – опираясь на арсенал средств и методов, накопленных в теории вероятностей и математической статистике, и путем непосредственного воспроизведения с помощью ЭВМ ее функционирования.

Последний способ называют статистическим моделированием. Некоторые авторы этот термин понимают шире, включая в него дополнительно сведение решения традиционных задач вычислительной математики к решению путем моделирования на ЭВМ подходящих вероятностных моделей.

Статистическое моделирование является мощным инструментом работы с вероятностными моделями на всех этапах исследования. Так, в теории массового обслуживания это основной метод решения сложных систем. В классической статистике – один из способов изучения устойчивости оценок к отклонениям от базовых предположений, используемый как самостоятельно, так и как дополнительный прием к асимптотическим аналитическим методам. При планировании исследований статистическое моделирование в случае относительно сложной модели изучаемого явления может помочь найти объемы основной и контрольной выборок. Оно широко используется также при изучении пределов допустимых отклонений предположений, используемых при построении модели, от реальности. Возможности в изучении вероятностных моделей, открываемые методом статистического моделирования, настолько велики, что сегодня уже приходится обосновывать необходимость традиционного аналитического подхода к построению моделей и изучению их свойств.

Концептуальная 3D модель алмазно-абразивного инструмента*. Понятие формообразования рабочей поверхности шлифовальных кругов значительно шире понятия правки и предполагает обеспечение постоянства статистических характеристик рельефа, строго отвечающих требованиям оптимизации по тем или иным выходным показателям. Оптимизация процесса шлифования предполагает непрерывное автономное управление режущей поверхностью круга, благодаря чему обеспечивается оптимальная высота выступания зерен над связкой, когда предотвращается топографическая и структурная приспосабливаемость рабочей поверхности, создаются необходимые и достаточные условия для самозатачиваемости зерен, размещения продуктов шлифования в межзеренном пространстве и исключения контакта связки с обрабатываемым материалом.*

Система 3D объектно-ориентированного моделирования должна позволять создавать экземпляры моделей алмазно-абразивных инструментов с заданными свойствами и проводить их исследование, а методология моделирования должна позволять решать следующие задачи:

– генерировать навески зерен заданной формы и законов распределения их размеров с учетом коэффициента заполнения объема модели реальными зернами;

– производить различные варианты имитационного контроля созданных навесок: ситовым методом или методом проекций в соответствии с ГОСТ или одновременно обеими методами по всему диапазону зернистостей шлифпорошков и микропорошков;

– создавать абразивное пространство (алмазосодержащий слой инструмента) заданной формы и размеров, с заданной концентрацией зерен;

– создавать поверхность связки заданной формы и ее расположения в границах алмазосодержащего слоя;

– формировать 3D рабочую поверхность инструмента на базе параметров алмазосодержащего слоя и связки с учетом коэффициента критической заделки зерен;

– создавать на основе 3D модели рабочей поверхности 2D модели ее поперечного и продольного сечений (профилей);

– задавать схемы износа вершин зерен и форму их изношенной поверхности;

– формировать микропрофиль с заданными статистическими характеристиками на поверхности зерен и (или) связки;

– исследовать статистическими методами признаки, характеризующие свойства алмазосодержащего слоя и рабочей поверхности инструмента в единой среде данных: создание гистограмм плотности и интегральной функции распределений; функциональный и регрессионный анализ; оценка подобия с теоретическими законами распределения;

– обеспечивать визуализацию и протоколирование исходных данных и результатов исследований на всех этапах моделирования.

При создании информационной среды моделирования кругов целесообразно использовать метод визуального объектно-ориентированного программирования Microsoft Visual FoxPro. Выбор среды программирования определяется необходимостью работы с большими массивами данных.

Первой и наиболее важной в объектно-ориентированном программировании является концепция объекта. Объект (шлифовальный круг) – это совокупность данных и функций. Объект содержит данные (как те, о ко-

торых знает только он сам, так и известные в окружающем мире) и функции – методы выполнения некоторых действий. Главная концепция построения объектов в объектно-ориентированной программе: объект инкапсулирует в себе всю необходимую информацию и функции, определяющие его поведение в окружающей среде (в процессе шлифования). Без обращения за информацией к другим объектам внешнего мира объект способен выполнять предусмотренные в его конструкции операции согласно заложенным правилам поведения.

Данные, которые инкапсулированы в объекте, называются его свойствами. Свойства (в терминологии Visual FoxPro) – переменные в памяти, которые присоединены к объекту и имеют область видимости объекта. Свойства могут иметь любой тип, применение которого к переменным в памяти допустимо. Конкретное свойство существует в программе до тех пор, пока существует содержащий его объект, т. е. до полного износа круга.

Помимо данных, объект включает и действия, которые он способен выполнять. Соответствующий программный код представляет собой процедуры (методы объекта), присоединенные к объекту.

Событие представляет собой нечто происходящее во внешнем мире, на что объект должен среагировать. Событие может возникнуть как результат действий пользователя, так и по инициативе программы. При создании класса в Visual FoxPro каждому событию, на которое должен реагировать объект класса, должен отвечать соответствующий программный код метода обработки этого события. Этот метод будет вызван автоматически операционной системой при возникновении соответствующего события во время работы программы.

Структурная схема объектно-статистической параметрической модели шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов представлена на рис. 1.3.

Базовым объектом модели является контейнерный объект – алмазосодержащий слой шлифовального круга, представляющий систему равновероятно распределенных зерен в связке инструмента. Параметрами модели являются: форма и размеры алмазосодержащего слоя; концентрация зерен; форма и размеры (закон плотности вероятности распределения геометрических параметров) зерен.

В зависимости от заданных значений параметров экземпляр класса «алмазосодержащий слой» формируется в следующей последовательности событий:

– определение объема абразивоносного слоя и области значений его пространственных координат;

– определение номинального объема навески зерен (с учетом концентрации и коэффициента заполнения модели формы реальными зернами);

– формирование базы данных геометрических параметров зерен (в соответствии с заданными законами распределения) в количестве, соответствующем заданному объему навески;

– формирование базы данных координат центров зерен (с присвоением значений каждому зерну) равномерно распределенных по объему абразивного слоя.

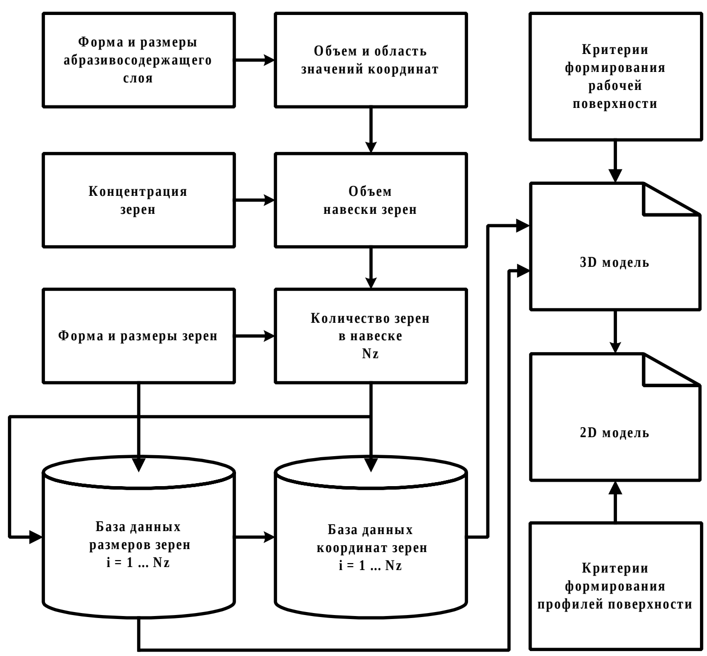


Рисунок 1.3 – Структурная схема 3D модели рабочей поверхности и абразивосодержащего слоя шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов

Переход от модели алмазосодержащего слоя к 3D модели рабочей поверхности шлифовального круга производится с учетом критериев ее формирования (относительная критическая заделка зерен в связке круга, и пр.). Более подробно эти вопросы будут рассмотрены в последующих разделах.

1.6. Вопросы для самостоятельной подготовки

1. Оцените достоинства и перспективы алмазно-абразивной обработки.
2. Дайте оценку предпосылкам повышения эффективности алмазно-абразивной обработки.
3. Какова роль состояния рельефа рабочей поверхности круга в эффективности процесса шлифования?
4. Сформулируйте цель и основные задачи, решаемые при моделировании алмазно-абразивного инструмента.
5. Обоснуйте необходимость перехода к 3D моделям при описании рабочих процессов обработки материалов резанием.
6. Назовите основные элементы, на базе которых строятся модели рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента.
7. В чем состоят особенности основных моделей рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента?
8. Как можно охарактеризовать служебные свойства зерен, связки и алмазосодержащего слоя при шлифовании алмазными кругами?
9. Дайте характеристику параметрам рабочей поверхности алмазно-абразивных инструментов.
10. Назовите принципы выбора схемы и метода шлифования.
11. Сформулируйте цель и основные задачи, решаемые при формообразовании рабочей поверхности шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов.
12. Назовите основные требования к свойствам связок для алмазных кругов.
13. Как классифицируются методы и способы размерного формообразования рельефа алмазно-абразивных инструментов?
14. В чем заключается особенность статистического моделирования?
15. В чем суть концепции 3D объектно-ориентированного моделирования алмазно-абразивных инструментов?
16. Какова роль и содержание концепции объекта в объектно-ориентированном программировании и моделировании?
17. Охарактеризуйте алмазно-абразивный инструмент как объект.
18. Каковы основные этапы формирования экземпляра модели алмазно-абразивного инструмента?

ГЛАВА 2. ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЛОЯ

Decipimur Specie recti –
Мы обманываемся видимостью правильного.

Человек сохраняет в своей памяти всё то,
что интересует его, а глубокий ум простирает
свои интересы на бесчисленное множество
предметов.

Готель

В настоящем разделе рассмотрены вопросы параметризации структуры и элементов абразивного слоя кругов из сверхтвердых материалов. Приведена оценка возможности статистического моделирования навески зерен. Рассмотрены вопросы модификации параметров законов распределения для решения задач статистического моделирования алмазно-абразивных инструментов, связанных с исходными характеристиками шлифпорошков. Представлена система совместного анализа наборов распределений и композиций на их основе. Рассмотрена методология генерирования последовательностей значений элементов абразивного слоя с заданными статистическими свойствами.

Статистическая параметризация обеспечивается модификацией параметров масштабируемых законов распределения с приведением их к трем: характеристическому размеру абразивных зерен, коэффициенту смещения математического ожидания относительно характеристического размера и коэффициенту вариации.

2.1. Статистическое моделирование распределения размеров зерен в навеске шлифпорошка из сверхтвердых материалов

Порошки из синтетических алмазов и других сверхтвердых материалов представляют собой совокупность зерен различной величины и формы: монокристаллы, осколки, сростки и поликристаллы. При производстве и контроле порошок подразделяют на фракции.

Основной фракцией называется совокупность зерен определенного размера, преобладающих в составе данного порошка по массе в шлифпорошках и по числу зерен в микропорошках. Получить алмазный порошок, состоящий только из зерен одного размера, не представляется возможным, поэтому, *кроме основной фракции, в составе порошков содержатся побочные фракции, которые крупнее или мельче основной*. Зернистость алмазного порошка определяется и характеризуется размером зерен основной фракции.

Для просева алмазных порошков используются проволочные сита, размеры которых построены на основе ряда предпочтительных чисел, представляющего собой геометрическую прогрессию со знаменателем

$$\varphi = \sqrt[10]{10} = 1{,}259.$$

Алмазные шлифпорошки выпускаются с узким и широким диапазонами зернистости. Из последних изготовляют инструмент, используемый на менее ответственных операциях, когда к обрабатываемым деталям не предъявляются повышенные требования по точности и шероховатости поверхности. Крупность основной фракции порошка узкого диапазона зернистости определяется размерами двух смежных контрольных сит из ряда по ГОСТ 3584-73, из которых через одно сито зерна порошка должны проходить, а на другом задерживаться. Крупность основной фракции шлифпорошка широкого диапазона зернистости определяется размерами ячеек сит, разделенных в ряду двумя интервалами. Зернистость шлифпорошков обозначается дробью, в которой числитель соответствует размеру ячеек верхнего, а знаменатель – нижнего сита в микрометрах, на которых выделяются зерна основной фракции данного порошка.

Зернистость и нормы зернового состава шлифпорошков из природных и синтетических алмазов разных марок определяются ГОСТ 9206-80 (ДСТУ 3292-95).

Представляет научный и практический интерес систематизация распределения зернового состава шлифпорошков из сверхтвердых материалов в параметрическом виде. В качестве основного параметра в таком случае должен быть принят некоторый характерный размер, а прочие размеры должны определяться через него. С учетом вышесказанного, обозначив размер ячеек верхнего сита в свету для основной фракции шлифпорошка – a_0, можно представить распределение шлифпорошков по фракциям в общем виде (табл. 2.1).

Таблица 2.1– Распределение шлифпорошков по фракциям в параметрическом виде

Фракция	Размер ячеек сит в свету, мкм		Расположение сит (с верхнего)	Допустимое содержание фракции по массе шлифпорошка, %
	верхнее	нижнее		
Предельная	$a_п = a_0 \varphi^{2 \cdot k}$	$a_0 \varphi^{1 \cdot k}$	первое	$P_п \le 0{,}1$
Крупная	$a_к = a_0 \varphi^{1 \cdot k}$	a_0	второе	$P_к \le 8 \ldots 15$
Основная	a_0	$a_0 \varphi^{-1 \cdot k}$	третье	$P_о \ge 90 \ldots 75$
Дополнительная	$a_д = a_0 \varphi^{-1 \cdot k}$	$a_0 \varphi^{-2 \cdot k}$	четвертое	$P_д = 100 - (P_п + P_к + P_о + \quad + P_м)$
Мелкая	$a_м = a_0 \varphi^{-2 \cdot k}$	0	поддон	$P_м \le 2$

П р и м е ч а н и я:

1. Для узкого диапазона зернистостей $k = 1$, широкого – $k = 2$.

2. Интервал размеров ячеек верхнего сита в свету для основной фракции шлифпорошка: узкий диапазон зернистостей – $a_0 = 2500 \ldots 50$ (знаменатель геометрической прогрессии – φ); широкий – $a_0 = 2500 \ldots 63$ (знаменатель – $\varphi^2 = 1{,}585$).

3. При контроле шлифпорошков с $a_0 = 50$ (для узкого диапазона зернистостей) и $a_0 = 63$ (для широкого диапазона) используются первые три сита.

Схема ячейки сита, описанной вокруг наименьшего сечения зерна, приведена на рис. 2.1.

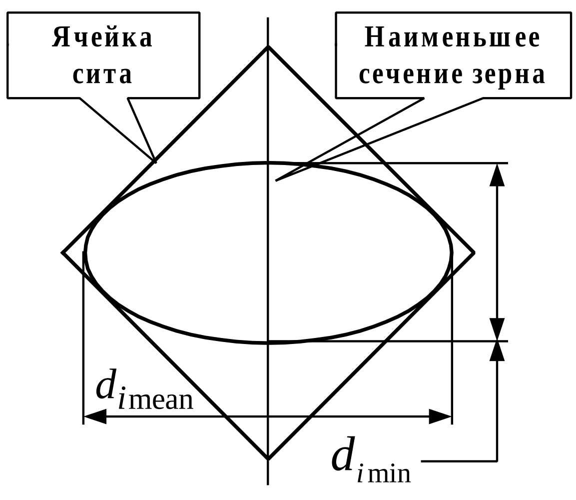


Рисунок 2.1 – Схема определения размера ячейки сита, описанной вокруг наименьшего сечения трехосного эллипсоида

Одной из центральных задач теории шлифования инструментами из сверхтвердых материалов является определение законов распределения параметров, характеризующих размеры и форму зерен. Сложность ее решения заключается в несоответствии контролируемых (содержание фракций по массе) и определяемых (закон распределения) параметров. Общего аналитического решения такой задачи в настоящее время не существует, поэтому имеет смысл рассмотреть некоторые пути ее решения методом статистического моделирования.

При статистическом моделировании примем следующие допущения:

– каждое отдельное зерно представляет собой трехосный эллипсоид;

– распределение размеров диаметров эллипсоида по каждой из осей соответствует нормальному закону распределения.

С учетом достаточно большого числа зернистостей по ГОСТ 9206-80 (18 для узкого диапазона и 9 для широкого) целесообразно производить моделирование для значения обобщенного параметра $a_0 = 1$, что позволит вести расчеты в относительных величинах.

Статистическое моделирование производилось в среде MathCad. Для нашего случая функция плотности нормального распределения и функция вероятности (рис. 2.2) имеют вид: dnorm (x, μ, σ), pnorm (x, μ, σ), где μ – математическое ожидание; σ – среднеквадратическое отклонение.

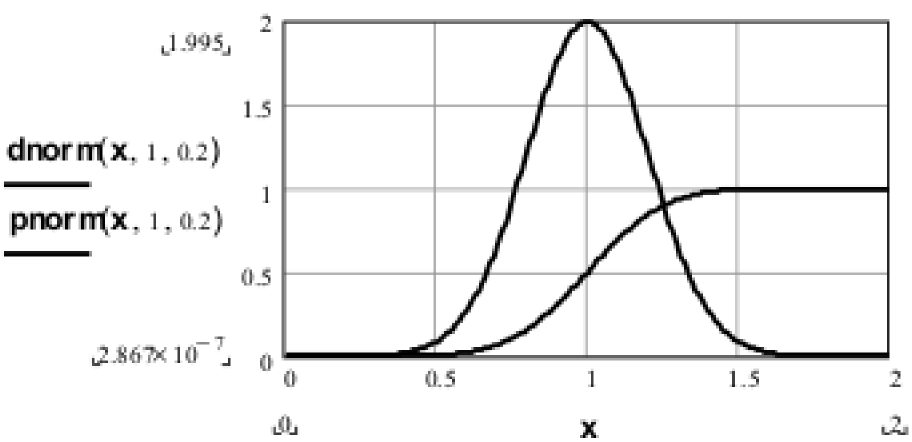


Рисунок 2.2 – Плотность нормального распределения и функция вероятности в среде MathCad

При моделировании использовалась специально разработанная функция-программа *Vs*(μ, σ, *c*, *b*), представленная на рис. 2.3. Эта функция позволяет генерировать размеры зерен с заданными параметрами нормального распределения (μ, σ) и определять объем зерен фракции, характеризующейся размерами ячеек верхнего *c* и нижнего *b* сит в свету (см. рис. 2.1). Моделирование производилось для матрицы (20×20) значений математического ожидания (μ = 0,7 – 1,175) и среднеквадратического отклонения (σ = 0,025 – 0,263). Определялись объемы зерен для каждой фракции и общий объем шлифпорошка с размерами ячеек сит в свету в соответствии с табл. 2.1. На основании полученных данных определялось процентное содержание каждой фракции. Результаты расчетов представлены на рис. 2.4.

```
Vs(μ, σ, c, b) ≡ | μ ← μ (математическое_ожидание)
                 | σ ← σ (среднеквадратическое_отклонение)
                 | c ← c(размер_ячейки_верхнего_сита_в_свету)
                 | b ← b(размер_ячейки_нижнего_сита_в_свету)
                 | Vs ← 0 (объем_зерен_фракции)
                 | for i ∈ 1.. N(цикл_моделирования_фракции)
                 |   | d_x ← qnorm(rnd(1), μ, σ) (диаметр_по_оси_X)
                 |   | d_y ← qnorm(rnd(1), μ, σ) (диаметр_по_оси_Y)
                 |   | d_z ← qnorm(rnd(1), μ, σ) (диаметр_по_оси_Z)
                 |   | D ← (d_x d_y d_z)(вектор_диаметров_эллипсоида)
                 |   | Ds ← sort(D) (сортировка_вектора_диаметров_эллипсоида)
                 |   | d_min ← Ds_1,1 (первый – минимальный_диаметр)
                 |   | d_mean ← Ds_1,2 (второй – минимальный_диаметр)
                 |   | a ← sqrt((d_min^2 + d_mean^2)/2) (предельный_размер_ячейки_сита)
                 |   | if (a ≤ c)·(a > b) (условие_соответствия_зерна_фракции)
                 |   |   | v ← π/6·d_x·d_y·d_z(объем_текущего_зерна_эллипсоида)
                 |   |   | Vs ← Vs + v(текущий_общий_объем_зерен_фракции)
                 | Vs(возвращаемое_значение_общего_объема_зерен_фракции)
```

Рисунок 2.3 – Функция-программа для определения объема шлифпорошка в отдельной фракции

Анализ линий уровня (см. рис. 2.4) показывает, что для основной фракции линия симметрии соответствует $\mu \cong 0{,}88$ и практически не зависит от σ. Следовательно, средний диаметр зерен соответствует 0,88 a_0 для всего диапазона шлифпорошков узкого диапазона зернистостей.

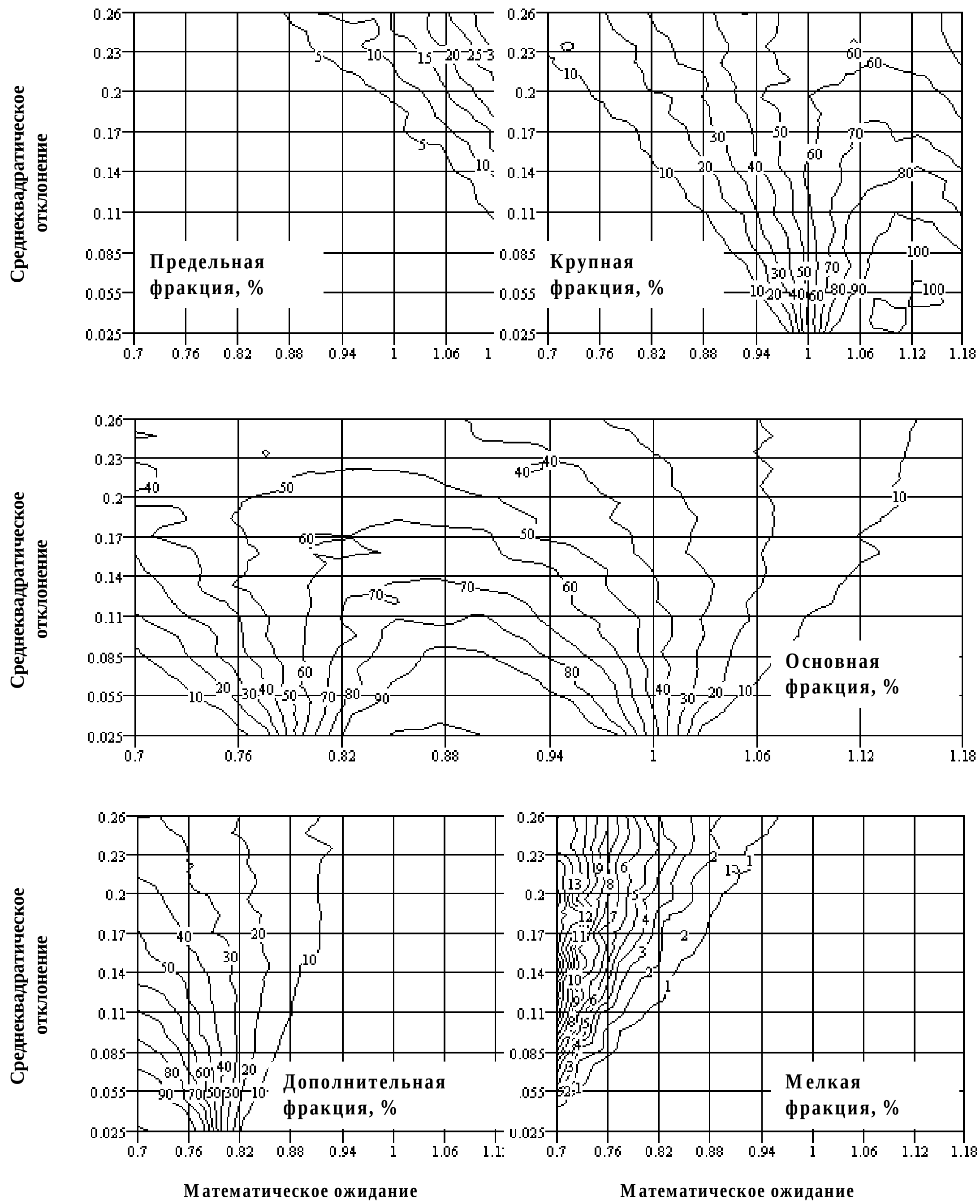


Рисунок 2.4 – Результаты статистического моделирования распределения шлифпорошков по фракциям в среде MathCad

Приведенные результаты позволяют сделать вывод о том, что *метод статистического моделирования обеспечивает качественную и количественную оценку параметров распределения размеров зерен шлифпорошка*.

Далее целесообразно рассмотреть вопросы параметризации законов распределения для решения задач статистического моделирования параметров шлифовальных кругов, связанных с исходными характеристиками шлифпорошков.

2.2. Модификация законов распределения для решения задач статистического моделирования

Одним из наиболее значимых признаков рабочих процессов высоких технологий является наличие развитой системы адекватных моделей, обеспечивающих возможность структурно-параметрической оптимизации в соответствующей компьютерно-технологической среде. В полной мере это относится и к прецизионному шлифованию труднообрабатываемых материалов кругами из шлифпорошков синтетических алмазов и нитрида бора. Достаточно малые размеры и большое количество режущих зерен, расположенных в исходной матрице и на рабочей поверхности шлифовального круга, приводят к необходимости использования аппарата прикладной статистики.

Одним из главных назначений прикладной статистики является обоснованный выбор модели, которая наилучшим образом соответствует имеющимся в распоряжении исследователя статистическим данным, характеризующим реальные свойства конкретно исследуемой системы.

Таким образом, успешное решение проблемы наилучшей статистической обработки и моделирования исходных данных существенно зависит от знания подходящих моделей и возможности их модификации, отражающей специфику анализируемой задачи в конкретной предметной области.

Построение и экспериментальная проверка модели, т. е. математическое описание интересующих исследователя связей и отношений между реальными элементами анализируемой системы, обычно основаны на одновременном использовании информации двух типов: априорной информации о природе и характере исследуемых соотношений; исходных статистических данных, характеризующих процесс и результат функционирования анализируемой системы.

Если исследователь располагает информацией обеих типов, то, как правило, используется прием содержательного математического моделирования: из априорной информации о природе искомых соотношений удается вывести общий вид аналитических уравнений, описывающих эти соотношения; на основе статистической обработки исходных данных оцениваются численные значения параметров, входящих в аналитические уравнения.

Статистическое моделирование (или моделирование типа «Монте-Карло») используется в следующих случаях: имеется только априорная информация; при наличии информации обоих типов ставится задача имитации поведения анализируемой реальной системы (объекта) путем варьирования численных значений параметров (свойств) модели; генерирование искусственных статистических данных на основе модельных соотношений.

Математическая модель (в своем современном развитии расширившаяся до уровня виртуальной компьютерной объектной модели) – это абстракция с определенным уровнем соответствия требованиям адекватности объекту. В модели отношения (взаимодействия) между реальными элементами (объектами) заменены подходящими отношениями (сценариями взаимодействий) между сущностями, которые отражают набор свойств реальных объектов в контексте решаемой задачи моделирования.

Под случайной величиной понимают величину определенного физического смысла, значения которой подвержены некоторому неконтролируемому разбросу при повторениях исследуемого эксперимента или наблюдения. Знать закон распределения вероятностей случайной величины – значит, уметь поставить в соответствие любому ее возможному значению вероятность появления именно этого значения.

2.2.1. Законы распределений, использующиеся при описании рабочей поверхности алмазно-абразивных инструментов

Статистическое исследование, как правило, начинается с анализа закона распределения рассматриваемой случайной величины; для нашего случая – распределения размеров зерен в навеске шлифпорошка. Рассмотрим основные свойства нормального закона распределения и (производного от него) логарифмически-нормального, наиболее часто используемых при описании распределения параметров рабочей поверхности абразивного инструмента и исходных характеристик шлифпорошков.

Нормальное распределение занимает центральное место в теории и практике вероятностно-статистических исследований, идея объяснения механизма формирования нормально распределенных случайных величин заключается в постулировании следующих положений:

– значения исследуемой непрерывной случайной величины формируются под воздействием очень большого числа независимых случайных факторов;

– сила воздействия каждого отдельного фактора мала и не может превалировать среди остальных;

– характер воздействия факторов – аддитивный, т. е. при воздействии случайного фактора F на величину μ получается величина, $\mu + \Delta(F)$, где случайное приращение $\Delta(F)$ мало и равновероятно по знаку.

Функция плотности случайных величин подобного типа имеет вид:

$$f_{\mathrm{Norm}}(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right], \tag{2.1}$$

где μ и σ^2 – параметры закона, интерпретируемые соответственно как среднее значение и дисперсия данной случайной величины.

Во многих случайных величинах, изучаемых в технике (в частности – обработка материалов резанием) и других областях, естественно видеть суммарный аддитивный эффект большого числа независимых причин. Центральное место нормального закона не следует объяснять его универсальной применимостью. В этом смысле нормальный закон – это один из многих типов распределений, имеющихся в природе.

Необходимо учитывать, что полнота теоретических исследований, относящихся к нормальному закону, а также сравнительно простые математические свойства делают его наиболее привлекательным и удобным в использовании.

В случае отклонения исследуемых экспериментальных данных от нормального закона существует, по крайней мере, два пути его целесообразного использования: использовать его в качестве первого приближения; подобрать такое преобразование исследуемой случайной величины *x*, которое видоизменяет исходный закон распределения, превращая его в нормальный.

Логарифмически-нормальное распределение. Случайная величина *x* называется логарифмически-нормально распределенной, если ее логарифм ($\ln x$) подчинен нормальному закону распределения. При этом, в отличие от схемы формирования механизма нормального закона распределения последовательный характер воздействия случайных факторов здесь таков, что случайный прирост, вызываемый действием каждого следующего фактора, пропорционален уже достигнутому к этому моменту значению исследуемой величины (в этом случае говорят о мультипликативном характере воздействия фактора).

Функция плотности случайных величин подобного типа имеет вид:

$$f_{\mathrm{lnNorm}}(x;\mu,\sigma)=\begin{cases}\dfrac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\ln x-\mu}{\sigma}\right)^{2}\right] & x>0;\\ 0 & x\le 0,\end{cases} \tag{2.2}$$

где μ и σ – параметры закона.

Описанная схема формирования значений логарифмически-нормальной случайной величины может оказаться характерной для размеров и веса частиц, образующихся при дроблении (в частности при размоле шлифпорошков из сверхтвердых материалов).

Основные статистические характеристики рассмотренных законов распределений в терминах параметров μ и σ^2 представлены в табл. 2.2. Необходимо отметить следующее:

– для нормального закона распределения параметры μ и σ^2 имеют представительный характер ($\mu = E$ – среднее арифметическое рассматриваемого признака являющееся центром группирования; $\sigma^2 = D$ – дисперсия, характеризующая степень разброса случайной величины относительно среднего значения);

– для логарифмически-нормального закона распределения параметры теряют явную представительность, т. к. их вычисление производилось при переходе к функциональной шкале $\hat{x} = \ln x$; вследствие этого после возврата к исходной числовой шкале $x \to E,\ D = f(\mu,\ \sigma^2)$;

– при необходимости рассмотрения распределения одной и той же величины (для нашего случая размеров зерен шлифпорошка) при оценке применимости нормального или логарифмически-нормального распределения возникают проблемы совместимости результатов вследствие принципиального различия значений параметров μ, σ^2.

Таблица 2.2 – Параметры законов распределения на основе нормального

Наименование	Закон распределения непрерывных величин	
	нормальный	логарифмически-нормальный
Математическое ожидание, E	μ	$\exp\left(\mu + \frac{1}{2}\sigma^2\right)$
Дисперсия, D	σ^2	$\exp\left(2\mu + \sigma^2\right)\left[\exp\left(\sigma^2\right) - 1\right]$
Мода, x_{mod}	μ	$\exp\left(\mu - \sigma^2\right)$
Медиана, x_{med}	μ	$\exp(\mu)$
Коэффициент асимметрии, β	0	$\left[\exp(\sigma^2) - 1\right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\exp(\sigma^2) + 2\right]$
Коэффициент эксцесса, γ	0	$\left[\exp(\sigma^2) - 1\right] \cdot \left[\exp(3\sigma^2) + 3\exp(2\sigma^2) + 6\exp(\sigma^2) + 6\right]$
Дополнительные параметры предметной области распределения размеров зерен		
Размер верхнего сита в свету, мкм		a_0
Коэффициент смещения (сдвига) математического ожидания закона распределения относительно размера ячейки верхнего сита в свету		$k_m = \frac{E}{a_0}$
Коэффициент вариации		$k_v = \frac{\sqrt{D}}{E}$

Рассмотренные особенности задания параметров распределений на основе нормального выявляют необходимость их модификации для решения задач статистического моделирования параметров шлифовальных кругов, связанных с исходными характеристиками шлифпорошков.

Одним из путей повышения представительности параметров законов распределения на основе нормального является систематизация распределения зернового состава шлифпорошков из сверхтвердых материалов в параметрическом виде. В качестве основного параметра в таком случае принимается некоторый характерный размер, а прочие размеры (ГОСТ 9206-80) должны определяться через него. Обозначив размер ячеек верхнего сита в свету для основной фракции шлифпорошка – a_0, можно представить распределение шлифпорошков по фракциям в общем виде (табл. 2.3). Допустимое содержание фракции по массе шлифпорошка (в %) принималось пропорциональным количеству зерен в данной фракции. Такой подход не является достаточно корректным для получения абсолютных значений (необходимо имитационное моделирование просева порошка). В нашем случае решается задача качественного подхода к сравнению семейства кривых распределений размеров зерен шлифпорошка для законов на основе нормального.

Введем следующие дополнительные параметры предметной области распределения размеров зерен шлифпорошков:

a_0 – размер ячейки верхнего сита в свету (для основной фракции) или первая цифра в обозначении зернистости; имеет размерность – мкм и является масштабным коэффициентом; т. к. он характеризует натуральную шкалу размеров, то можно называть его характеристическим размером;

$k_m = \dfrac{E}{a_0}$ – коэффициент относительного смещения (сдвига) математического ожидания плотности закона распределения относительно характеристического размера (безразмерная величина);

$k_v = \dfrac{\sqrt{D}}{E} = \dfrac{\sigma}{E} = \dfrac{\sigma}{a_0 k_m}$ – коэффициент вариации (безразмерная величина),

где E – математическое ожидание или выборочное среднеарифметическое; D – дисперсия; σ – среднеквадратическое отклонение.

Выразим коэффициенты законов распределения μ, σ (табл. 2.3) через введенные параметры a_0, k_m, k_v.

Таблица 2.3 – Распределение шлифпорошков по фракциям в параметрическом виде

Фракция	Расположение сит (с верхнего)	Допустимое содержание фракции по массе шлифпорошка, %
Предельная	первое $a = a_0\varphi^k$	$P_п = 100 \int_{a_0 \varphi^k}^{\infty} f(x)\,dx \quad < 0{,}1$
Крупная	второе $a = a_0$	$P_к = 100 \int_{a_0}^{a_0 \varphi^k} f(x)\,dx \quad \le 8 \ldots 15$
Основная	третье $a = a_0\varphi^{-k}$	$P_о = 100 \int_{a_0 \varphi^{-k}}^{a_0} f(x)\,dx \quad \le 90 \ldots 75$
Дополнитель-ная	четвертое $a = a_0\varphi^{-2k}$	$P_д = 100 \int_{a_0 \varphi^{-2k}}^{a_0 \varphi^{-k}} f(x)\,dx \quad = 100 - (P_п + P_к + P_о + P_м)$
Мелкая	поддон $a = 0$	$P_м = 100 \int_{0}^{a_0 \varphi^{-2k}} f(x)\,dx \quad \le 2$

Примечание. Для узкого диапазона зернистостей $k = 1$, широкого – $k = 2$.

Для нормального закона распределения (2.1) переход к модифицированным параметрам осуществляется путем тождественных преобразований:

$$\mu = E = a_0 k_m ; \tag{2.3}$$

$$\sigma = \sqrt{D} = s = a_0 k_m k_v ; \tag{2.4}$$

$$f_n\,(x; a_0, k_m, k_v) \equiv f_n\,(x; \mu, \sigma) , \tag{2.5}$$

где μ, σ – параметры нормального закона распределения; E – математическое ожидание или выборочное среднеарифметическое; D – дисперсия; s – среднеквадратическое отклонение; a_0 – характеристический размер (масштабный коэффициент); k_m – коэффициент относительного смещения математического ожидания (параметр относительного расположения); k_v – коэффициент вариации (параметр формы).

В общем случае (для масштабируемых законов распределения) задачу перехода к модифицированным (характеристическим) параметрам можно определить следующим образом: с учетом взаимосвязи между статистическими характеристиками распределения E, D и характеристическими параметрами $E = a_0 k_m$, $\sqrt{D} = s = a_0 k_m k_v$ переход к характеристическим параметрам для плотности вероятности заданного закона распределения $f\ (x; a_0, k_m, k_v) \equiv f\ (x;\ p_1,\ p_2)$ производится путем определения зависимости параметров распределения от его статистических характеристик $p_1,\ p_2 = f\left[E = a_0 k_m;\ D = \left(a_0 k_m k_v\right)^2\right]$.

При переходе к характеристическим параметрам для логарифмически-нормального закона распределения (2.2) необходимо решить систему нелинейных уравнений относительно параметров μ, σ (исходные зависимости приведены в табл. 2.2) и перейти к a_0, k_m, k_v:

$$\begin{cases} E = e^{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2} \\ D = e^{2\mu + \sigma^2}\left(e^{\sigma^2} - 1\right) \end{cases}; \qquad (2.6)$$

решение имеет следующий вид:

$$\mu = \ln\left(\frac{a_0 k_m}{\sqrt{k_v^2 + 1}}\right); \qquad (2.7)$$

$$\sigma = \sqrt{\ln\left(k_v^2 + 1\right)}. \qquad (2.8)$$

Таким образом, функции плотности нормального (2.1) и логарифмически-нормального (2.2) распределений зависят от характеристических (модифицированных) представительных параметров (a_0, k_m, k_v) с учетом зависимостей перехода $\mu, \sigma = f\left[E = a_0 k_m;\ D = \left(a_0 k_m k_v\right)^2\right]$.

Оценка предложенной методологии производилась при статистическом моделировании распределения размеров зерен в среде пакета для математических расчетов MathCad. Параметры нормального (2.1) и логарифмически-нормального (2.2) распределений определялись для различных диапазонов зернистостей (табл. 2.4, 2.5). Группирование по диапазонам зернистости производилось для одинаковых предельных значений содержания фракций (ГОСТ 9206-80). Определение значений модифицированных параметров производилось для заданного процентного содержания основной ($P_о$) и крупной ($P_к$) фракций путем совместного решения системы интегральных уравнений:

$$\begin{cases} 100 \int\limits_{a_0 \varphi^{-k}}^{a_0} f(x; a_0, k_m, k_v)\, dx = P ; \\ 100 \int\limits_{a_0}^{a_0 \varphi^{k}} f(x; a_0, k_m, k_v)\, dx = P , \end{cases} \quad (2.9)$$

где $f(x; a_0, k_m, k_v)$ – плотность нормального (2.1) или логарифмически-нормального распределения (2.2) с учетом рассмотренных преобразований, а пределы интегрирования соответствуют приведенным в табл. 2.3.

Для обеспечения возможности сравнительного анализа результатов, полученных для различных диапазонов зернистостей, расчеты производились для единичной ячейки сита ($a_0 = 1$). Результаты моделирования приведены в табл. 2.4, 2.5. Визуализация кривых распределений представлена на рис. 2.5, 2.6.

Результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы:

– *рассмотренный подход к модификации законов распределения на основе нормального для решения задач статистического моделирования параметров, связанных с исходными размерами шлифпорошков, является перспективным*;

– *невысокий уровень отличий между нормальным и логарифмически-нормальным законами определяется сравнительно небольшой величиной коэффициента вариации (в рассмотренном случае) распределения размеров зерен*;

– *дальнейшее направление развития работ по использованию методологии модификации параметров законов распределений имеет научный и практический смысл при оценке статистических характеристик рельефа рабочей поверхности шлифовальных кругов, зависящих от исходных характеристик шлифпорошков.*

Таблица 2.4 – Модифицированные параметры нормального закона распределения

Диапазон зернистостей, мкм	Параметры закона распределения		Содержание фракций по массе шлифпорошка, %				
	смещения	вариации	Мелкая	Дополнитель-ная	Основная	Крупная	Предельная
	k_m	k_v	$P_м$	$P_д$	$P_о$	$P_к$	$P_п$
узкий диапазон зернистостей шлифпорошков							
2000–1000	0,916	0,065	$8{,}511\cdot10^{-5}$	2,050	90,035	7,915	$6{,}280\cdot10^{-5}$
800…250	0,897	0,089	0,043	9,852	80,230	9,849	0,026·
200…125	0,906	0,088	0,028	7,997	80,014	11,919	0,042
100	0,895	0,100	0,159	12,834	74,931	12,034	0,043
80…63	0,899	0,099	0,130	11,804	75,199	12,820	0,047
50	0,908	0,098	0,092	9,949	74,868	15,055	0,035
широкий диапазон зернистостей шлифпорошков							
2000–1000	0,850	0,126	$1{,}225\cdot10^{-3}$	2,040	89,891	8,067	$5{,}284\cdot10^{-8}$
630…250	0,815	0,177	0,193	9,908	79,915	9,984	$4{,}291\cdot10^{-4}$
200…125	0,812	0,198	0,502	12,499	74,879	12,113	$5{,}654\cdot10^{-3}$
100	0,819	0,196	0,437	11,628	74,953	12,975	$6{,}731\cdot10^{-3}$
80…63	0,835	0,191	0,308	9,721	75,919	15,043	$9{,}404\cdot10^{-3}$

Распределения, использующиеся при описании рабочей поверхности алмазно-абразивных инструментов. Число потенциально возможных моделей распределения элементов рельефа рабочей поверхности шлифовальных кругов может быть достаточно велико. *Выбор тех или иных законов распределений при описании рабочей поверхности определяется двумя основными причинами – соответствие математических свойств распределения задачам исследования и адекватное описание полученных экспериментальных данных*. В связи с отсутствием научно-обоснованного подхода к выбору законов распределений при решении задач описания рельефа рабочей поверхности были выбраны 17 одномерных непрерывных распределений из числа наиболее часто используемых в теории и практике статистических исследований. В их число вошли следующие распределения (в скобках указано их условное обозначение): 1 – равномерное (Rand); 2 – нормальное (Norm); 3 – логарифмически-нормальное (lnNorm); 4 – логарифмически-нормальное распределение с заданным основанием логарифма (logNorm); 5 – распределение Вейбулла (Weibull); 6 – экспоненциальное (показательное) распределение (Exp); 7 – гамма-распределение (Gamma); 8. – бета–распределение (Beta); 9 – хи-квадрат (Hi^2); 10 – Фишера (F); 11 –распределение по закону арксинуса (ArcSin); 12 – треугольное распределение Симпсона (Simpson); 13 – Релея (Relay); 14 – Максвелла (Maxwell); 15 –логистическое распределение (Logistic); 16 – Парето (Pareto); 17 –трапециидальное распределение Симпсона (Simpson2). Номера распределений соответствуют номерам позиций меню разработанной системы статистического анализа.

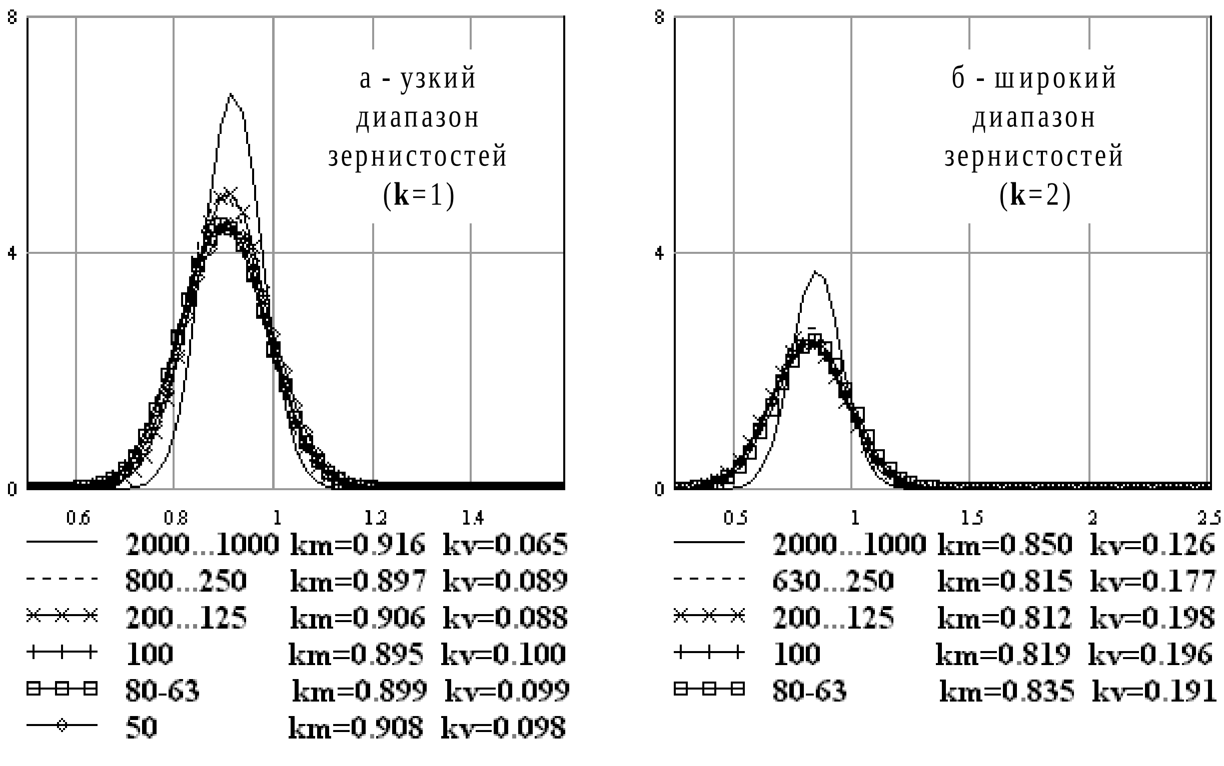


Рисунок 2.5 – Графики плотности вероятности нормального закона распределения размеров зерен шлифпорошков из сверхтвердых материалов для различных диапазонов зернистости

Таблица 2.5 – Модифицированные параметры логарифмически-нормального закона распределения

Диапазон зернистостей, мкм	Параметры закона распределения		Содержание фракций по массе шлифпорошка, %				
	коэффициент смещения	коэффициент вариации	Мелкая	Дополнительная	Основная	Крупная	Предельная
	k_m	k_v	$P_М$	$P_Д$	$P_О$	$P_К$	$P_П$
узкий диапазон зернистостей шлифпорошков							
2000–1000	0,913	0,067	$2{,}184 \cdot 10^{-6}$	2,027	89,794	8,174	$5{,}974 \cdot 10^{-3}$
800…250	0,895	0,090	$5{,}980 \cdot 10^{-3}$	9,923	80,009	10,022	0,041
200…125	0,904	0,089	$3{,}121 \cdot 10^{-3}$	7,881	80,210	11,879	0,027
100	0,894	0,100	0,029	12,776	75,148	12,012	0,036
80…63	0,898	0,100	0,024	11,865	75,141	12,928	0,042
50	0,907	0,100	0,017	10,011	74,784	15,145	0,044
широкий диапазон зернистостей шлифпорошков							
2000–1000	0,837	0,134	$1{,}863 \cdot 10^{-6}$	2,007	89,921	8,068	$3{,}456 \cdot 10^{-3}$
630…250	0,807	0,181	$6{,}008 \cdot 10^{-3}$	9,987	80,032	9,950	0,025
200…125	0,807	0,202	0,030	12,863	75,032	12,030	0,045
100	0,815	0,202	0,025	11,875	75,023	13,043	0,034
80…63	0,830	0,201	0,016	10,038	74,926	14,975	0,044

В качестве основы при проведении модификации параметров рассмотренных распределений использовались их описания и статистические моментные характеристики. Модификация параметров производилась аналогично законам распределений на основе нормального, рассмотренным ранее.

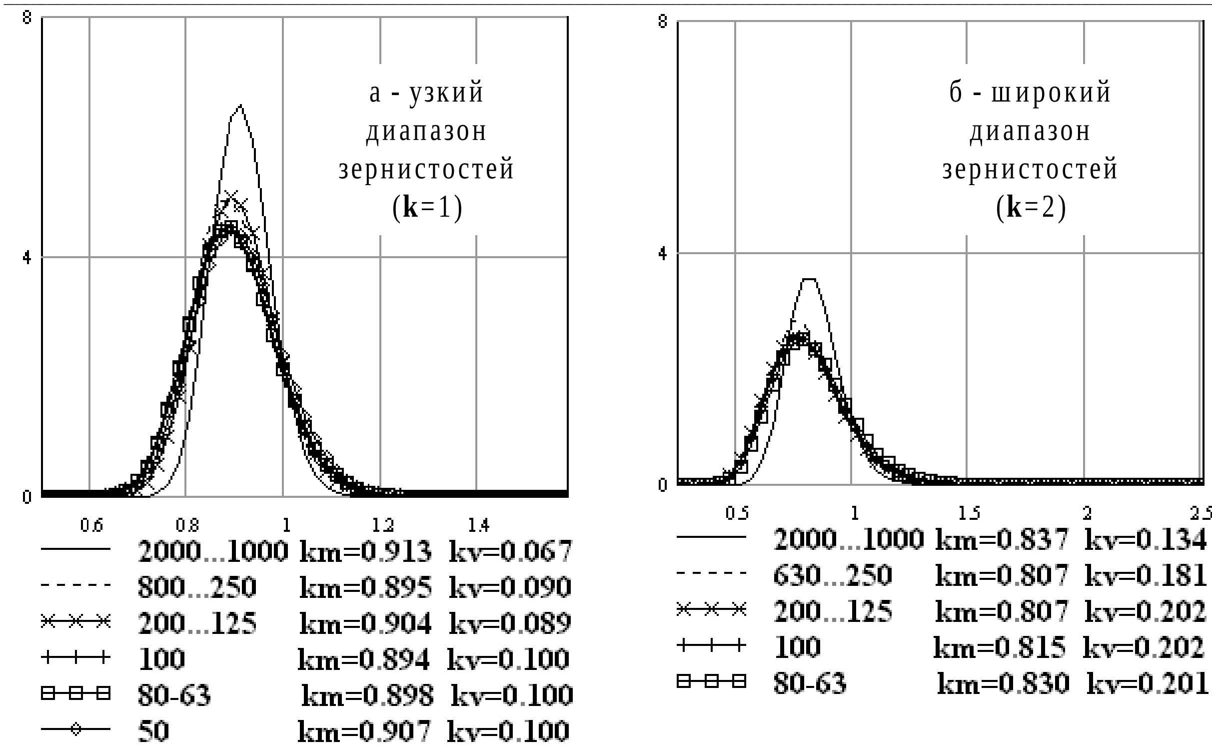


Рисунок 2.6 – Графики плотности вероятности логарифмически-нормального закона распределения размеров зерен шлифпорошков из сверхтвердых материалов для различных диапазонов зернистости

Модификация параметров законов распределения наиболее часто использующихся при описании элементов рабочей поверхности алмазно-абразивных инструментов содержит:

1. *Равномерное распределение* ($-\infty < x < \infty$). Плотность вероятности:

$$f_{\text{Rand}} = \frac{1}{x_{\max} - x_{\min}} = \frac{1}{2\delta}, \qquad x_{\min} \le x \le x_{\max} \quad , \tag{2.10}$$

где $x_{\max}$, $x_{\min}$ – максимальное и минимальное значения исследуемого признака;

δ – параметр центрированного распределения;

$$\delta = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2} = \sqrt{3D} = \sqrt{3} a_0 k_m k_v \, . \tag{2.11}$$

2. *Нормальное распределение* ($-\infty < x < \infty$): плотность вероятности (2.1); характеристические параметры (2.3), (2.4).

3. *Логарифмически-нормальное* распределение ($0 < x < \infty$): плотность вероятности (2.2); характеристические параметры (2.7), (2.8)

4. *Логарифмически-нормальное распределение с заданным основанием логарифма* ($0 < x < \infty$). Параметры определяются аналогично логарифмически-нормальному распределению (по основанию e). Плотность вероятности:

$$f_{\text{logNorm}} = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{ -\frac{1}{2}\left[\frac{1}{\sigma}\left(\frac{\ln(x)}{\ln(b)} - \mu \right) \right]^2 \right\}, \qquad x > \qquad , \quad (2.12)$$

где b – основание логарифма; μ, σ – параметры распределения:

$$\sigma = \frac{1}{\ln(b)} \sqrt{\ln\left(k_v{}^2 + 1\right)} \quad (\sigma > 0); \quad (2.13)$$

$$\mu = \frac{1}{\ln(b)} \ln\left(\frac{a_0 k_m}{\sqrt{k_v^2 + 1}} \right). \quad (2.14)$$

5. *Распределение Вейбулла* ($0 \le x < \infty$). Плотность вероятности:

$$f_{\text{Weibul}} = \frac{\delta}{\eta}\left(\frac{x}{\eta}\right)^{(\delta-1)} \exp\left[-\left(\frac{x}{\eta}\right)^{\delta} \right], \qquad \le x < \infty \qquad , \quad (2.15)$$

где δ, η – параметры распределения.

Математическое ожидание и дисперсия определяются следующими зависимостями:

$$E = \eta\Gamma\left(\frac{1}{\delta} + 1 \right); \quad (2.16)$$

$$D = \eta^2\left[\Gamma\left(\frac{2}{\delta} + 1 \right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{\delta} + 1 \right) \right], \quad (2.17)$$

где $\Gamma(z)$ – гамма-функция Эйлера, $\Gamma(z) = \int_0^{\infty} \exp(-u)\, u^{z-1}\, du$.

Гамма-функция не выражается аналитически (для нецелых z), поэтому при выполнении расчетов можно использовать асимптотическую формулу Стирлинга

$$\Gamma(z) \cong \sqrt{\frac{2\pi}{z}} z^z \exp\left(-z + \frac{1}{12z} - \frac{1}{360z^3}\right). \qquad (2.18)$$

Оценка точности аппроксимации гамма-функции формулой Стирлинга производилась в среде MathCad для интервала значений z = 1 … 5. Результаты оценки точности аппроксимации показали, что относительная погрешность аппроксимации составляет –0,05 % → 0, причем она быстро уменьшается при увеличении z.

Переход к характеристическим параметрам для распределения Вейбулла производится в два этапа. На первом этапе из уравнений для математического ожидания (2.16) и дисперсии (2.17) определяется коэффициент вариации:

$$k_v = \frac{\sqrt{D}}{E} = \frac{\sqrt{\eta^2\left[\Gamma\left(\frac{2}{\delta}+1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{\delta}+1\right)\right]}}{\eta\Gamma\left(\frac{1}{\delta}+1\right)} = \frac{\sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{\delta}+1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{\delta}+1\right)}}{\Gamma\left(\frac{1}{\delta}+1\right)}. \qquad (2.19)$$

Анализ полученного уравнения (2.19) свидетельствует об однозначной взаимосвязи коэффициента вариации k_v и параметра распределения δ. Однако полученное уравнение не может иметь решения в явном виде относительно k_v, т. к. параметр δ является элементом аргумента гамма-функции. Следовательно, необходимо подобрать аппроксимационную зависимость $\delta = f(k_v)$, обеспечивающую достаточную точность перехода от коэффициента вариации k_v к параметру распределения Вейбулла δ. Выбор аппроксимационной зависимости производился с учетом возможности линеаризации зависимости $\delta = f(k_v)$ в двойных логарифмических шкалах $\ln\delta = f(\ln k_v)$. Вычислительные эксперименты показали, что для получения достаточной точности аппроксимации интервалы возможных значений коэффициента вариации $k_v \approx 0{,}05 ... 15$ и параметра $\delta \approx 30 ... 0{,}2$ необходимо разбить на три подинтервала. Исходные данные в количестве 100 пар значений δ и k_v (2.19) для каждого подинтервала готовились в математическом пакете MathCad и через буфер обмена передавались в табличный процессор Excel. Подбор аппроксимационной зависимости, вычисление ее коэффициентов (модуль Nonlinear Estimation) и погрешности замены производились в среде статистического пакета Statistica. Полученная аппроксимационная зависимость имеет следующий вид:

$$\delta(k_v) \cong \exp\left(a_0 + a_1 \ln k_v + a_2 \ln^2 k_v + a_3 \ln^3 k_v + a_4 \ln^4 k_v\right) + \varepsilon(k_v)\,, \tag{2.20}$$

где a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, $\varepsilon\,(k_v)$ – коэффициенты и абсолютная погрешность аппроксимации, зависящие от интервалов значений k_v, δ:

k_v = 0,041176862 – 0,36344650, δ = 3 – 30, a_0 = –0,0701484,
a_1 = –1,1855327, a_2 = –0,0298041, a_3 = 0,0017869, a_4 = 0,0006329,
ε = +0,0016 ... –0,0008; k_v = 0,36344650 – 1, δ = 1 – 3, a_0 = 0,0000617,
a_1 = –0,9983355, a_2 = –0,1556905, a_3 = 0,0817673, a_4 = 0,0127610,
$\varepsilon = -7\cdot10^{-5}$ ... $3\cdot10^{-5}$; k_v = 1 – 15,84297952, δ = 0,2 – 1, a_0 = 0,0006418,
a_1 = –1,0123317, a_2 = –0,1912559, a_3 = –0,0014621, a_4 = –0,0042408,
ε = +0,001 ... –0,0006.

На втором этапе перехода к характеристическим параметрам для рассматриваемого распределения Вейбулла производится определение параметра η из уравнения (2.16) для математического ожидания:

$$\eta = E \Big/ \Gamma\left(\frac{1}{\delta} + 1\right) = a_0 k_m \Big/ \Gamma\left(\frac{1}{\delta} + 1\right), \tag{2.21}$$

где $\Gamma(z)$ – гамма-функция вычисляется по асимптотической формуле Стирлинга (2.18).

6. *Экспоненциальное (показательное) распределение* ($0 \le x < \infty$). Плотность вероятности:

$$f_{\text{Exp}} = \frac{1}{b}\exp\left(-\frac{x}{b}\right), \qquad \le x < \infty \qquad , \tag{2.22}$$

где $b = E = a_0 k_m$ – параметр распределения.

7. *Гамма-распределение* ($0 \le x < \infty$). Плотность вероятности:

$$f_{\text{Gamma}} = \frac{\left(\frac{x}{b}\right)^{(c-1)}\exp\left(-\frac{x}{b}\right)}{b\Gamma(c)}, \qquad \le x < \infty \qquad , \tag{2.23}$$

где b, c – параметры распределения, определяемые по зависимостям:

$$b = D/E = a_0 k_m k_v^2 \quad (b > 0); \quad c = E^2/D = 1/k_v^2 \quad (c > 0). \tag{2.24}$$

8. *Бета-распределение* ($-\infty < x < \infty$). Плотность вероятности:

$$f_{\text{Beta}} = \frac{\Gamma(v+w)}{\Gamma(v)\Gamma(w)}\left(\frac{x}{b}\right)^{v-1}\left(1-\frac{x}{b}\right)^{w-1}, \tag{2.25}$$

где v, w – параметры; b – параметр масштаба $b = x_{\max} - x_{\min}$.

С учетом параметра масштаба приведенные значения математического ожидания и дисперсии имеют следующий вид:

$$\bar{E} = E/b = a_0 k_m / b; \quad \bar{D} = D/b^2 = (a_0 k_m k_v)^2 / b^2. \tag{2.26}$$

Переход к характеристическим параметрам определяется уравнениями:

$$v = \bar{E}\left\{\left[\frac{\bar{E}(1-\bar{E})}{\bar{D}}\right] - 1\right\} \quad (v > 0); \quad w = (1-\bar{E})\left\{\left[\frac{\bar{E}(1-\bar{E})}{\bar{D}}\right] - 1\right\} \quad (w > 0). \tag{2.27}$$

9. *Хи-квадрат распределение* ($0 \le x < \infty$). Плотность вероятности:

$$f_{\text{Hi}^2} = x^{\frac{v}{2}-1}\exp\left(-\frac{x}{2}\right) \Big/ 2^{\frac{v}{2}}\Gamma\left(\frac{v}{2}\right), \qquad \le x < \infty \qquad , \tag{2.28}$$

где ν – параметр распределения $\nu = E = a_0 \cdot k_m$.

10. *Распределение Фишера* ($0 \le x < \infty$). Плотность вероятности:

$$f_{\mathrm{F}} = \frac{\Gamma\left(\frac{v+w}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{v}{2}\right)\Gamma\left(\frac{w}{2}\right)} \cdot \frac{v^{\frac{v}{2}} w^{\frac{w}{2}} x^{\frac{v}{2}-1}}{(vx+w)^{\frac{v+w}{2}}}, \qquad \le x < \infty \qquad , \tag{2.29}$$

где v, w – параметры распределения.

Переход к характеристическим параметрам: $E = a_0 k_m$; $D = (a_0 k_m k_v)^2$;

$$w = \frac{2E}{E-1} \quad (w > 4); \quad v = \frac{2w^2(w-2)}{D(w-2)^2(w-4) - 2w} \quad (v > 1). \tag{2.30}$$

11. *Распределение по закону арксинуса* ($-\infty < x < \infty$). Плотность вероятности:

$$f_{\mathrm{ArcSin}} = \frac{1}{\pi\sqrt{l^2 - (x-a)^2}}, \qquad a - l \le x \le a + l \qquad , \tag{2.31}$$

где a, l – параметры центрированного распределения.

Переход к характеристическим параметрам:

$$a = E = a_0 k_m; \quad l = \sqrt{D}\big/2 = 0{,}5 a_0 k_m k_v \quad (l > 0). \tag{2.32}$$

12. *Треугольное распределение Симпсона* ($-\infty < x < \infty$). Плотность вероятности:

$$f_{\mathrm{Simpson}} = \begin{cases} \dfrac{l + x - a}{l^2}, & a - l \le x \le a \\ \dfrac{l - x + a}{l^2}, & a \le x \le a + l \end{cases} \tag{2.33}$$

где a, l – параметры центрированного распределения.

Переход к характеристическим параметрам:

$$a = E = a_0 k_m; \quad l = \sqrt{6D} = \sqrt{6} a_0 k_m k_v \quad (l > 0). \tag{2.34}$$

13. *Распределение Релея* ($0 \le x < \infty$). Плотность вероятности:

$$f_{\mathrm{Relay}} = \frac{x}{\sigma^2}\exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \qquad x \ge \qquad , \tag{2.35}$$

где $\sigma = E\big/2\sqrt{\pi} = a_0 k_m \big/ 2\sqrt{\pi}$ – параметр распределения.

14. *Распределение Максвелла* ($0 \le x < \infty$). Плотность вероятности:

$$f_{\text{Maxwell}} = \frac{x^2}{\sigma^3}\sqrt{\frac{2}{\pi}}\exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \qquad x \ge \qquad , \tag{2.36}$$

где $\sigma = E\sqrt{\frac{\pi}{8}} = a_0 k_m \sqrt{\frac{\pi}{8}}$ – параметр распределения.

15. *Логистическое распределение* ($-\infty < x < \infty$). Плотность вероятности:

$$f_{\text{Logistic}} = \frac{\exp\left[(x-a)/k\right]}{k\left\{1+\exp\left[(x-a)/k\right]\right\}^2}, \tag{2.37}$$

где a, k – параметры распределения.

Переход к характеристическим параметрам:

$$a = E = a_0 k_m; \quad k = \frac{\sqrt{3D}}{\pi} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} a_0 k_m k_v \quad (k > 0). \tag{2.38}$$

16. *Распределение Парето* ($1 \le x < \infty$). Плотность вероятности:

$$f_{\text{Pareto}} = c x^{-c-1}, \qquad x \ge \qquad , \tag{2.39}$$

где $c = \frac{E}{E-1} = 1 + \frac{1}{a_0 k_m - 1} \quad (c > 0)$ – параметр распределения.

17. *Трапециидальное распределение Симпсона* ($-\infty < x < \infty$). Плотность вероятности:

$$f_{\text{Simpson2}} = \begin{cases} (x-a+l)/(l^2-b^2), & a-l \le x \le a-b \\ 1/(1+b), & a-b \le x \le a+b \\ (a+l-x)/(l^2-b^2), & a+b \le x \le a+l \end{cases} \tag{2.40}$$

где a, l, b – параметры распределения; $l = 0{,}5\,(x_{\max} - x_{\min})$ – определяется из геометрических соображений.

Переход к характеристическим параметрам:

$$a = E = a_0 k_m; \quad b = \sqrt{6D - l^2} = \sqrt{6\,(a_0 k_m k_v)^2 - l^2}. \tag{2.41}$$

Проведенная модификация параметров и полученные расчетные соотношения послужили методической основой для создания подсистемы статистического анализа исследуемых признаков, входящей составной частью в следующие системы:

– система 3D моделирования алмазно-абразивных инструментов;

– система совместного анализа наборов распределений и композиций на их основе.

2.2.2. Комплексная система анализа наборов распределений и композиций на их основе

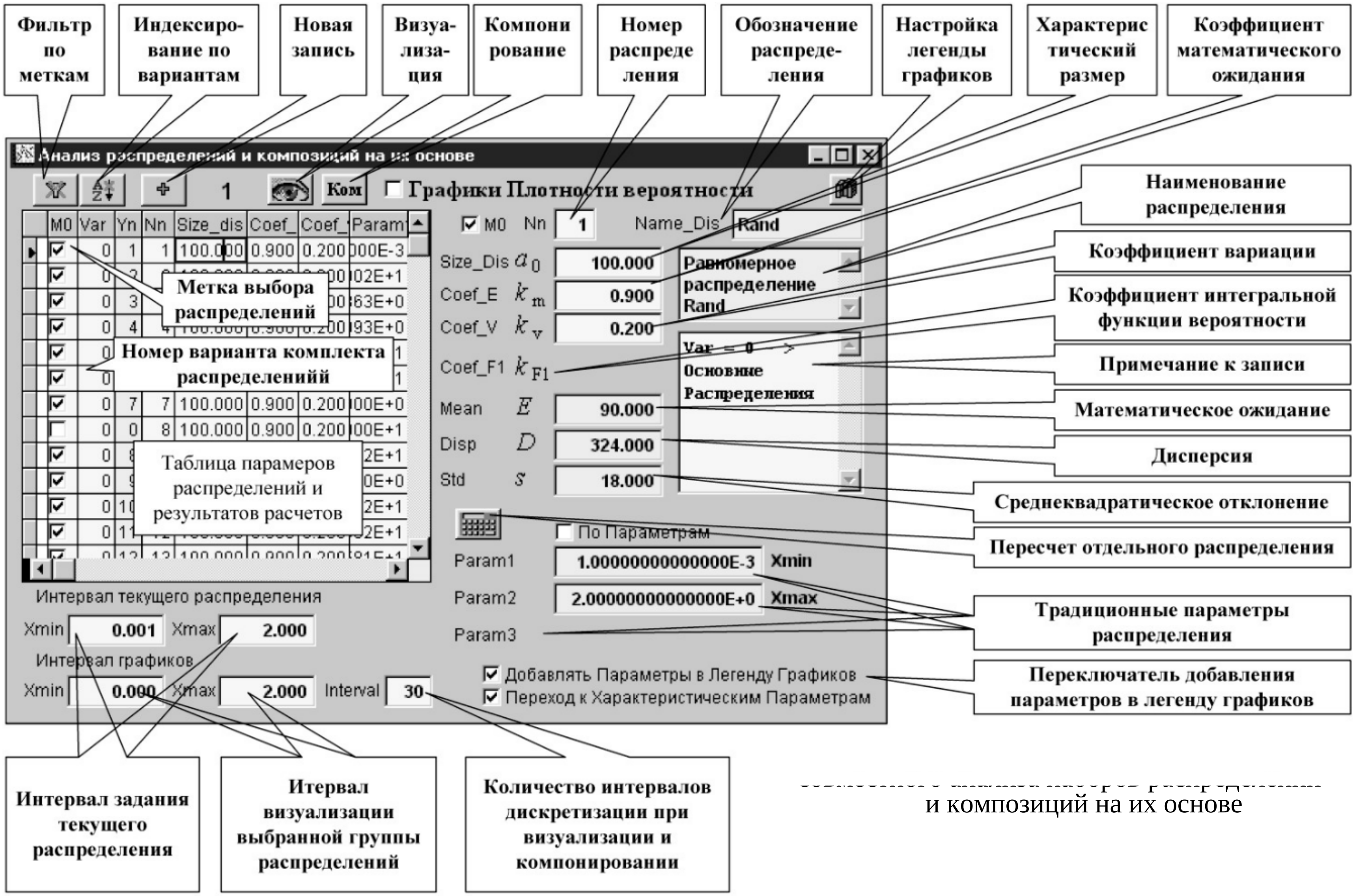
Система анализа наборов распределений и композиций на их основе позволяет решать следующие основные задачи:

– *производить совместный анализ группы законов распределений с заданием параметров, как в традиционном виде, так и с использованием модификации*;

– *выполнять исследования механизмов формирования композиционных распределений, получаемых при суммировании нескольких исходных законов распределения*.

Форма управления системой совместного анализа наборов распределений и композиций на их основе представлена на рис. 2.7. Система позволяет визуализировать плотности или интегральные функции наборов распределений (до 100 графиков одновременно). Введенные параметры распределений хранятся в базе данных и могут быть объединены в наборы простановкой меток выбора. В качестве примера на рис. 2.8. представлена визуализация набора распределений, наиболее часто применяющихся при статистических исследованиях рабочей поверхности алмазно-абразивных инструментов. Эти распределения имеют одинаковые модифицированные параметры: $k_m = 0{,}9$ – коэффициент расположения математического ожидания относительно характеристического размера; $k_v = 0{,}2$ – коэффициент вариации.

В качестве теоретической базы при разработке алгоритмов получения композиционных распределений были использованы зависимости для определения результирующих законов распределения сумм независимых случайных величин. Система позволяет производить компонирование распределений в количестве от 2 до 5 в одном наборе.



...совместного анализа наборов распределений
и композиций на их основе

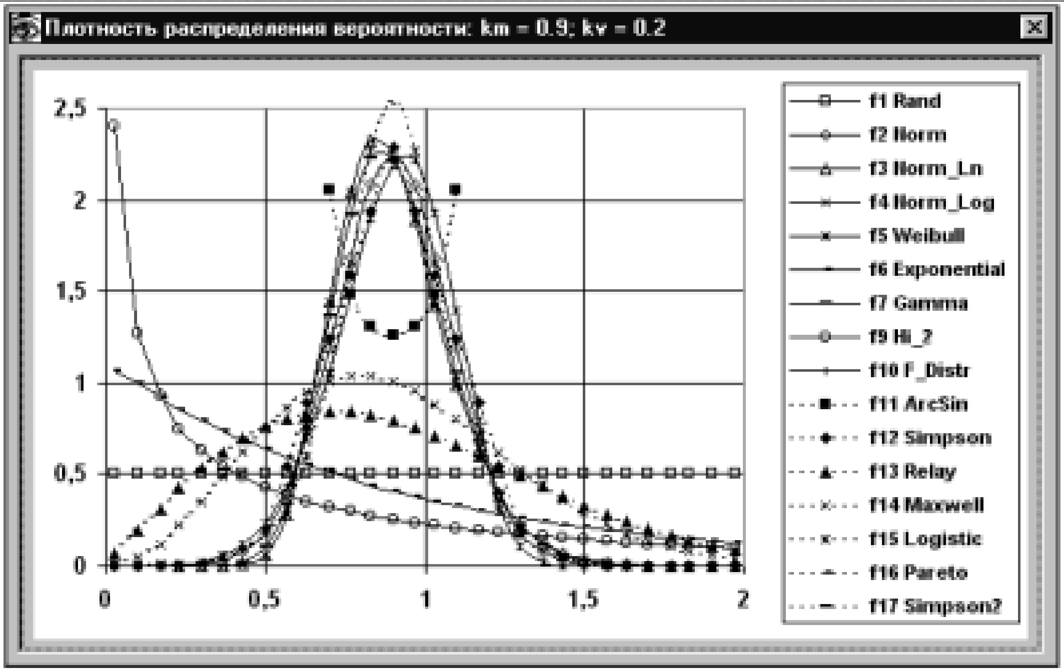


Рисунок 2.8 – Визуализация набора распределений, наиболее часто применяющихся при статистических исследованиях

Рассмотрим примеры использования разработанной системы при нахождении композиции законов распределения. На рис. 2.9 представлена композиция двух равномерных распределений (2.10) с отличающимися параметрами f1 ≡ f_{Rand} ($x_{\min}$ = 0, $x_{\max}$ = 0,5) и f2 ≡ f_{Rand} ($x_{\min}$ = 0,25, $x_{\max}$ = 1). Результирующий закон распределения c1 = f1*f2 является трапециидальным законом Симпсона (2.40).

Последовательная композиция пяти равномерных распределений (2.10) с одинаковыми параметрами

$$f1 = f2 = f3 = f4 = f5 \equiv f_{\text{Rand}} (x_{\min} = 0, x_{\max} = 0{,}5)$$

представлена на рис. 2.10. Закон распределения суммы нескольких слагаемых находится путем последовательной композиции двух законов распределения: сначала для первых двух слагаемых c1 = f1*f2, затем для их суммы и третьего слагаемого c2 = c1*f3 и т. д. (c3 = c2*f4, c4 = c3*f5). Суммирование двух равномерных распределений с одинаковыми параметрами f1*f2 = c1 (рис. 2.10) приводит к получению треугольного распределения Симпсона (2.33). Дальнейшее компонирование может служить в качестве иллюстрации статистического механизма возникновения нормального распределения (2.1) – одного из основных законов распределения суммы независимых случайных слагаемых.

Рисунок 2.9 – Композиция двух равномерных распределений с отличающимися параметрами $f1 <> f2$

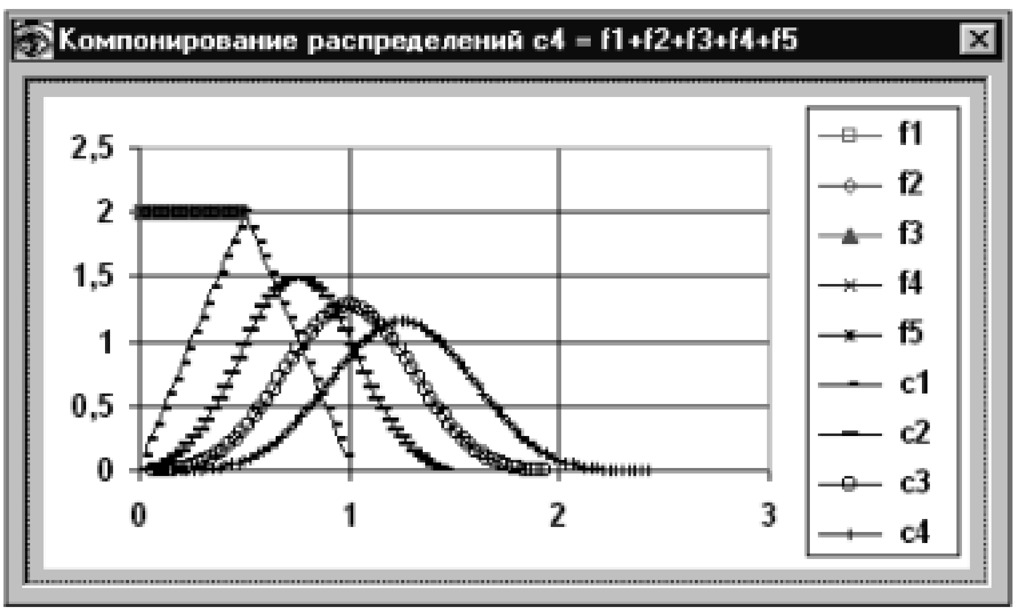


Рисунок 2.10 – Последовательная композиция пяти равномерных распределений с одинаковыми параметрами: $f1 = f2 = f3 = f4 = f5$

2.3. Генерирование последовательностей случайных чисел при решении задач статистического моделирования

В настоящее время при решении прикладных задач все большее применение получают методы статистического моделирования. Особый интерес представляет их использование для решения задач, связанных с абразивной обработкой материалов и, в частности, процесса шлифования, когда в работе участвует большое число абразивных зерен.

Построение и экспериментальная проверка модели обычно основаны на использовании априорной информации о природе и характере исследуемых соотношений и исходных статистических данных, характеризующих процесс и результат функционирования анализируемой системы.

При необходимости более глубокого изучения поведения анализируемой реальной системы могут выполняться дополнительные имитационные исследования с использованием ЭВМ: варьирование численных значений параметров, входящих в аналитическую запись модели; генерирование статистических данных, соответствующих модельным соотношениям. Такой тип моделирования принято называть статистическим или моделированием типа «Монте-Карло».

Центральное место в теории и практике вероятностно-статистических исследований занимает нормальный закон распределения. Для расширения возможностей его применения при решении прикладных задач в конкретной предметной области используются законы распределения на его базе (например, логарифмически-нормальное распределение и др.).

Схема генерирования последовательности случайных чисел с заданным законом распределения на основе нормального приведена на рис. 2.11. Рассмотрим более подробно отдельные этапы этого процесса.

Получение равномерно распределенных случайных чисел. Для получения случайных чисел можно использовать два метода:

– «физический», когда случайные числа формируются с помощью аналого-цифровых преобразователей на основе сигналов физических генераторов, использующих естественные источники случайных шумов (радиоактивный распад, шумы электронных и полупроводниковых устройств и т.п.);

– математический – случайные числа, генерируются аппаратно или программно на ЭВМ.

Случайные числа, генерируемые ЭВМ, не являются «истинно» случайными, обычно их принято называть псевдослучайными. Однако их статистические свойства совпадают со статистическими свойствами «истинно» случайных чисел. В настоящее время чаще используется математический метод. Для этого есть несколько причин:

– при статистическом моделировании (как впрочем, и при решении любых научно-технических задач) принципиально важно обеспечить воспроизводимость исходных данных и результатов;

– трудно гарантировать стабильную работу физических датчиков;

– в настоящее время разработаны и апробированы простые и вместе с тем надежные математические методы генерирования случайных чисел.

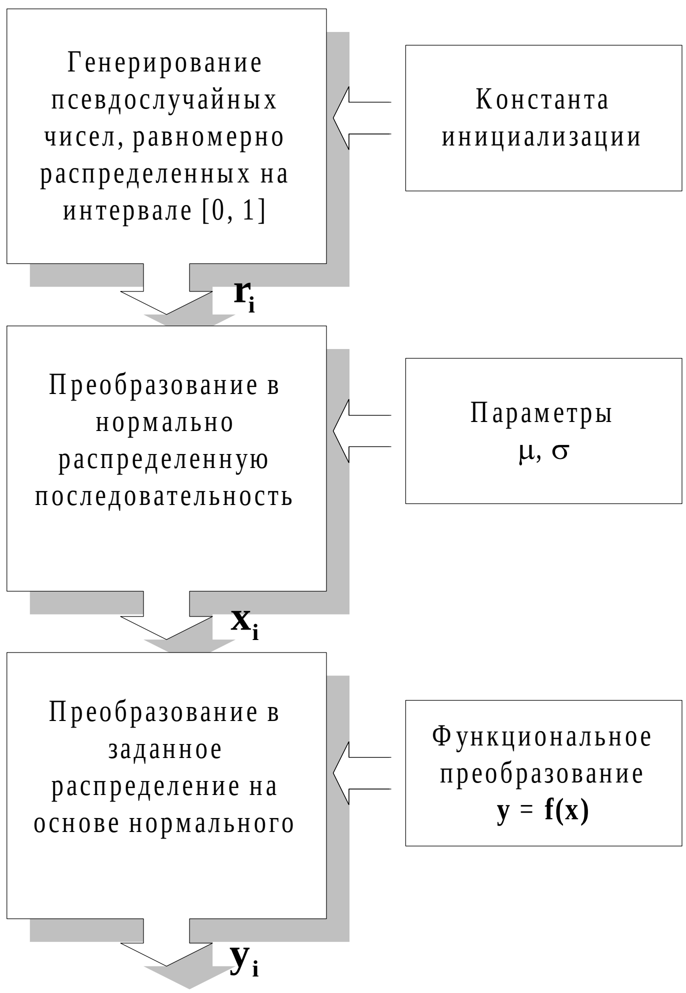


Рисунок 2.11 – Схема генерирования последовательности случайных чисел с заданным законом распределения на основе нормального

В состав практически всех современных систем программирования входят специальные функции генерации случайных чисел, которые обычно называют датчиками или генераторами случайных чисел. Рассмотрим их возможности на примере системы объектно-ориентированного программирования Microsoft Visual FoxPro. Функция RAND ([nSeedValue]) возвращает случайное число [0, 1]. Необязательный числовой аргумент [nSeedValue] позволяет специфицировать константу инициализации (начальное число при генерации псевдослучайных чисел). Использование одинаковых положительных значений для nSeedValue приводит к генерации одинаковых последовательностей случайных чисел. Если функция использована без аргумента, то для инициализации псевдослучайного числа используется системная константа 100001. В любой момент можно выполнить переустановку принимаемой по умолчанию константы посредством функции RAND (nSeedValue). Если же nSeedValue отрицательно, константа инициализации формируется из значения системного времени (с точностью 1 мкс). Использование отрицательного аргумента создает эффект максимальной случайности (при потере воспроизводимости, т. е. приближаемся к физическому датчику).

Получение случайных чисел с нормальной функцией распределения. Получение случайных чисел с любой функцией распределения F из равномерно распределенных случайных чисел основывается на следующем утверждении: пусть R – непрерывная случайная величина, равномерно распределенная на отрезке [0, 1], а F – любая функция распределения, определенная на подмножестве A множества действительных чисел. Тогда случайная величина

$$X = \sup_{z \in A} \left\{ z : F(z) \le R \right\} \tag{2.42}$$

имеет F в качестве функции распределения. Это преобразование можно представить графически (рис. 2.12).

Такой общий подход получения случайных чисел с нормальным законом распределения широкого применения не получил. Это связано с отсутствием аналитического решения при определении квантилей по заданным значениям вероятности. Следовательно, необходимо для преобразования каждого случайного числа решать нелинейное уравнение численным методом или использовать таблицы табулированных значений с последующей интерполяцией данных. В то же время развитие ЭВМ и программного обеспечения прикладной статистики привело к новому подходу в табулировании функций распределения и связанных с ними величин. При ручных вычислениях пользователи были заинтересованы в том, чтобы иметь обширные таблицы, которые позволяли бы вычислять значения функций с помощью простейшей интерполяции. Однако при работе с ЭВМ невыгодно заносить таблицы в память машины, а затем составлять программу обращения к нужной таблице и последующей интерполяции. Обычно предпочтительнее иметь не таблицу, а алгоритм вычисления значений функции с необходимой точностью. Особенно в рассматриваемом случае, когда вычисление значений обратной функции распределения используется при генерации случайных чисел с заданным законом распределения. Поскольку обычно необходимо генерировать значительное число таких чисел, то для получения приемлемого времени моделирования требуются более простые алгоритмы вычисления обратных функций распределения. Например, в абразивном слое шлифовального круга 12А2х45° 150х10х3 АС6 100/80 в зависимости от концентрации алмазов в круге содержится 2 … 18 млн. зерен.

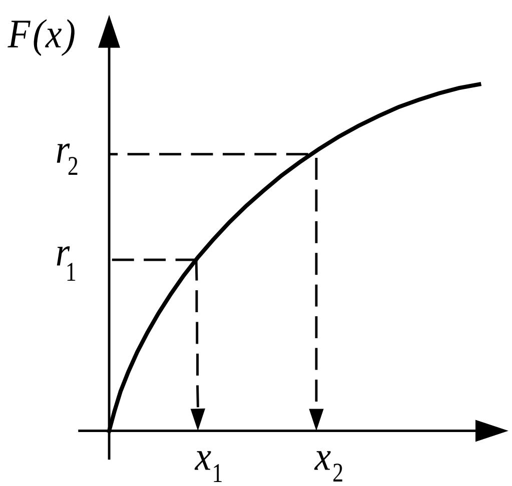


Рисунок 2.12 – Получение случайных чисел x_i с функцией распределения $F(x)$ из равномерно распределенных случайных чисел r_i

Рассмотрим более простой способ получения случайных чисел с непрерывной функцией распределения F. Если F – непрерывная и строго монотонная функция, то имеет место равенство $F(X) = R$, а также $X = F^{-1}(R)$

(см. уравнение (2.42). Тогда из последовательности r_1, r_2, … случайных чисел, равномерно распределенных на отрезке [0, 1], с помощью соотношения:

$$x_i = F^{-1}(r_i), \quad i = 1, 2, \ldots, \tag{2.43}$$

получают функцию распределения F.

Для продолжения рассмотрения вопроса использования обратной функции распределения (при генерировании нормально распределенных чисел) вернемся к основным свойствам нормального распределения.

Функция нормального распределения с математическим ожиданием μ и дисперсией σ^2 имеет вид:

$$\Phi(x;\ \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}\, dx\,. \tag{2.44}$$

Поскольку

$$\Phi(x;\ \mu, \sigma) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma};\ 0,\ 1\right), \tag{2.45}$$

то достаточно уметь вычислять функцию $\Phi(x) = \Phi(x; 0, 1)$, называемую интегральной функцией стандартного нормального распределения или функцией Лапласа:

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^{x} \varphi(x)\, dx\,, \tag{2.46}$$

где

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\, e^{-\frac{x^2}{2}} \tag{2.47}$$

плотность стандартного нормального распределения или кривая Гаусса.

Отметим следующее свойство функции $\Phi(x)$:

$$\Phi(-x) = 1 - \Phi(x). \tag{2.48}$$

Обратную функцию для нормального распределения $\Phi(x; \mu, \sigma)$ будем обозначать через $\psi(p; \mu, \sigma)$.

Имеет место соотношение

$$\psi\ (p;\ \mu,\ \sigma) = \mu + \sigma \cdot \psi\ (p), \qquad (2.49)$$

где $\psi\ (p)$ – функция обратная функции Лапласа, т. е.

$$\Phi\ (\psi\ (p);\ 0,\ 1) = p \quad (0 < p < 1). \qquad (2.50)$$

Поскольку при всех $p \in (0, 1)$ $\psi\ (p) + \psi\ (1 – p) = 0$, то практически нужно уметь вычислять значения $\psi\ (p)$ в полуинтервале $0{,}5 < p < 1$. На рис. 2.13 представлен график обратной функции распределения для стандартного закона нормального распределения.

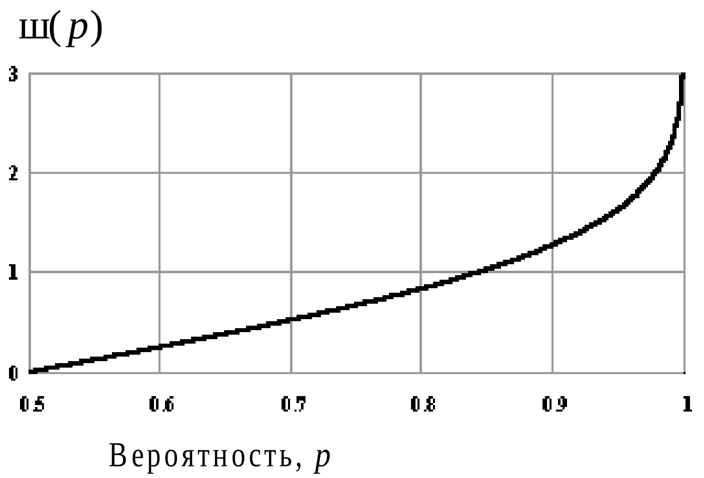


Рисунок 2.13 – Обратная функция нормального распределения в математическом пакете MathCad:

$$\psi(p) = \text{qnorm}(p, 0, 1)$$

Приведем следующие аппроксимационные формулы, использующие преобразование $t = \sqrt{-2\ln(1-p)}$, $0{,}5 < p < 1$:

$$\psi_1(p) = t - \frac{c_0 + c_1 t}{1 + d_1 t + d_2 t^2} + \varepsilon_1(p), \qquad (2.51)$$

где c_0 = 2,30753, c_1 = 0,270061, b_1 = 0,99229, d_2 = 0,04481 – коэффициенты;

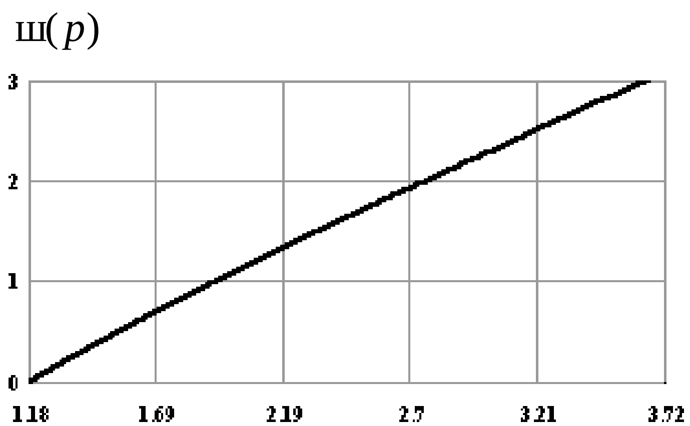
$\varepsilon_1\ (p)$ – абсолютная ошибка данной аппроксимации;

$$\psi_2(p) = t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} + \varepsilon_2(p), \qquad (2.52)$$

где c_0 = 2,515517, c_1 = 0,802853, c_2 = 0,010328,

d_1 = 1,432788, d_2 = 0,189269, d_3 = 0,001308.

Результат преобразования $t = f(p)$, используемого для предварительной линеаризации (условной т. к. такое преобразование не обеспечивает абсолютной линеаризации), представлен на рис. 2.14.



$$t = \sqrt{-2\ln(1-p)}$$

Рисунок 2.14 – Преобразование обратной функции нормального распределения к виду:

$$\psi(p) = f\left(\sqrt{-2\ln(1-p)}\right)$$

Экспериментальная проверка аппроксимационных зависимостей (2.51), (2.52) проводилась в среде математического пакета MathCad (рис. 2.15, 2.16). Абсолютная погрешность при использовании зависимости (2.51) составляет $|\varepsilon_1(x)| < 2{,}8\cdot10^{-3}$, а при использовании зависимости (2.52) – $|\varepsilon_2(x)| < 8{,}8\cdot10^{-4}$ (т. е. может обеспечить только три правильные значащие цифры).

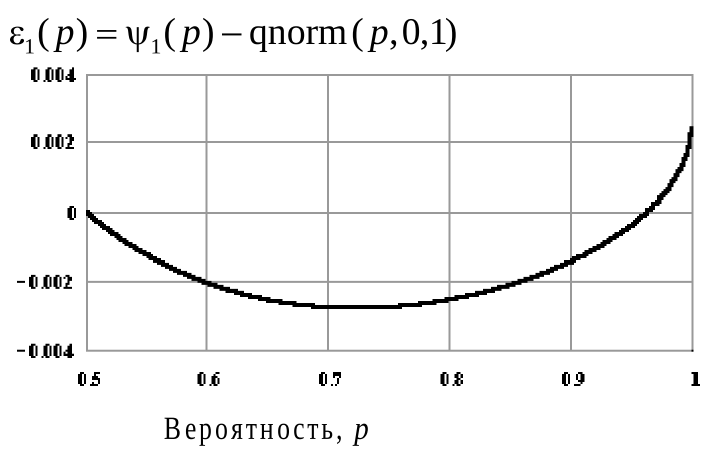


Рисунок 2.15 – Абсолютная погрешность аппроксимации обратной функции нормального распределения выражением:

$$\psi_1(p) = t - \frac{a_0 + a_1 t}{1 + b_1 t + b_2 t^2} + \varepsilon_1(p)$$

$$\varepsilon_2(p) = \psi_2(p) - \mathrm{qnorm}(p, 0, 1)$$

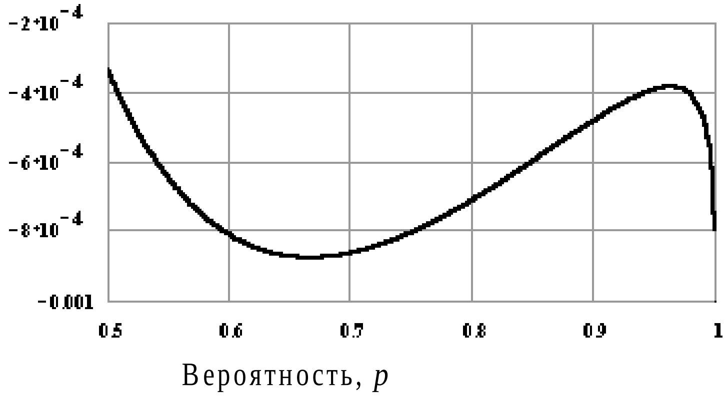


Рисунок 2.16 – Абсолютная погрешность аппроксимации выражением:

$$ш_2(p) = t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} + е_2(p)$$

При решении задач моделирования абразивного слоя шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов такая точность может оказаться недостаточной, поэтому был рассмотрен вопрос повышения точности, путем введения дополнительных членов в аппроксимационную зависимость по аналогии с выражениями (2.51), (2.52):

$$\psi_3(p) = t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3 + d_4 t^4} + \varepsilon_3(p). \qquad (2.53)$$

Определение коэффициентов аппроксимационной зависимости (2.53) производилось в среде MathCad путем решения системы восьми нелинейных уравнений относительно коэффициентов:

$$\begin{cases} \psi(p)_1 = f(t_1, c_0, c_1, c_2, c_3, d_1, d_2, d_3, d_4) \\ \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \\ \psi(p)_8 = f(t_8, c_0, c_1, c_2, c_3, d_1, d_2, d_3, d_4) \end{cases} \qquad (2.54)$$

Значения параметров для узловых точек и результаты определения коэффициентов приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6 – Значения параметров для узловых точек и результаты определения коэффициентов аппроксимирующего выражения

Табулированные значения узловых точек				Аппроксимация значений		
i	вероятность p	вспомогательный параметр $t = \sqrt{-2\ln(1-p)}$	Параметр x		приближе-ния	коэффициенты аппроксими-рующего выражения
1	0,50000	1,1774100225	0	c_0	1	3,2555230991
2	0,60000	1,3537287261	0,2533471031	c_1	0,1	10,2051357400
3	0,71000	1,5734512106	0,5533847196	c_2	0,01	3,2615610115
4	0,90000	2,1459660263	1,2815515655	c_3	0,001	0,1452486750
5	0,95000	2,4477468307	1,6448536270	d_1	1	6,0002774126
6	0,99900	3,7169221888	3,0902323062	d_2	0,1	5,3170230129
7	0,99990	4,2919320526	3,7190164855	d_3	0,01	0,9367393163
8	0,99999	4,7985259122	4,2648907939	d_4	0,001	0,0244291756

Выбор значений узловых точек производился по результатам экспериментальных расчетов с минимизацией абсолютного отклонения от функции обратной стандартной плотности вероятности в MathCad – qnorm (p, 0, 1).

График абсолютной погрешности при использовании аппроксимационной зависимости (2.53) приведен на рис. 2.17. Применение аппроксимационной зависимости (2.53) обеспечивает $|\varepsilon_3(x)| < 1{,}35 \cdot 10^{-8}$, что на четыре порядка ниже, чем у зависимости (2.52). В дальнейшем для решения задач статистического моделирования навески зерен из сверхтвердых материалов использовалась предложенная зависимость (2.53).

Окончательно, после тождественных преобразований (2.53) для повышения скорости расчетов и охвата всего возможного интервала значений вероятности ($0 \le p \le 1$), получим аппроксимационную зависимость для функции обратной функции Лапласа:

$$\psi(p) = \begin{cases} t = \sqrt{-2\ln(1-p, \qquad p < \qquad p} \\ \left| t - \dfrac{c_0 + t\left[c_1 + t\left(c_2 + c_3 t\right)\right]}{1 + t\left\{d_1 + t\left[d_2 + t\left(d_3 + d_4 t\right)\right]\right\}} \right|, \end{cases} \tag{2.55}$$

где c_0 = 3,2555230991, c_1 = 10,20513574, c_2 = 3,2615610115, c_3 = 0,145248675, d_1 = 6,0002774126, d_2 = 5,3170230129, d_3 = 0,9367393163, d_4 = 0,0244291756.

$$\varepsilon_3(p) = \psi_3(p) - \text{qnorm}(p, 0, 1)$$

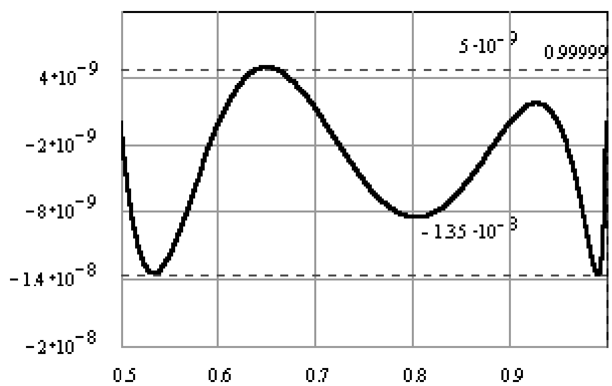


Рисунок 2.17 – Абсолютная погрешность аппроксимации обратной функции нормального распределения выражением:

$$\psi_3(p) = t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3 + d_4 t^4} + \varepsilon_3(p)$$

Для реализации предложенной аппроксимационной зависимости расчета при статистическом моделировании в среде объектно-ориентированного программирования Microsoft Visual FoxPro была разработана процедура-функция преобразования равномерно распределенных случайных величин [0, 1] в величины, имеющие стандартное нормальное распределение (рис. 2.18).

Для проверки рассмотренной методологии было проведено моделирование формирования навески алмазных зерен (зернистостью 100/80 мкм), имеющих форму трехосного эллипсоида с нормальным законом распределения размеров по осям (μ = 89,5 мкм, σ = 8,95 мкм). Навеска зерен формировалась для заполнения алмазоносного слоя торцового шлифовального круга 12A2x45° 150x10x3 с концентрацией зерен в слое 4 (100 %), что соответствует 1/4 общего объема. Полученная объектная модель навески зерен в количестве 8788322 шт. сохранялась в таблице Visual FoxPro. Статистические характеристики, вычисленные в FoxPro для размеров зерен по осям *X*, *Y*, *Z*, имели следующие значения: $\hat{\mu}$ = 89,498; 89,496; 89,496; $\hat{\sigma}$=8,8748; 8,8760; 8,8735.

```
FUNCTION X_p
LPARAMETERS pNum
IF pNum < 0.5
   adjust = .T.
ELSE && переход к интервалу [0.5, 1]
   pNum = 1 - pNum
   adjust = .F.
ENDIF
t = SQRT(-2*LOG(1-pNum)) && преобразование
x = t - (3.2555230991 + t*(10.20513574 + ;
      t*(3.2615610115 + 0.145248675*t))) /  ;
     (1 + t*(6.0002774126 + t*(5.3170230129 + ;
      t*(0.9367393163 + 0.0244291756*t))))
RETURN IIF(adjust, -x, x)
```

Рисунок 2.18 – Листинг (Visual FoxPro) процедуры-функции преобразования равномерно распределенных случайных величин [0,1] в величины, имеющие стандартное нормальное распределения

Контрольная проверка статистических характеристик полученной объектной модели навески зерен проводилась с использованием программного пакета для статистических расчетов Statistica. Производился импорт данных таблицы Visual FoxPro (*.dbf) в формат данных Statistica (*.sta) с последующим построением гистограммы распределения (для случая нормального) размеров по одной из осей. Гистограмма распределения размеров зерен по оси *X* (200,000 значений в соответствии с возможностями Statistica) представлена на рис. 2.19. При построении гистограммы использовалось разбиение на 35 интервалов. Сравнение исходных (μ = 89,5; σ = 8,95) и выборочных характеристик ($\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}$) распределения размеров зерен показывает их хорошую сходимость.

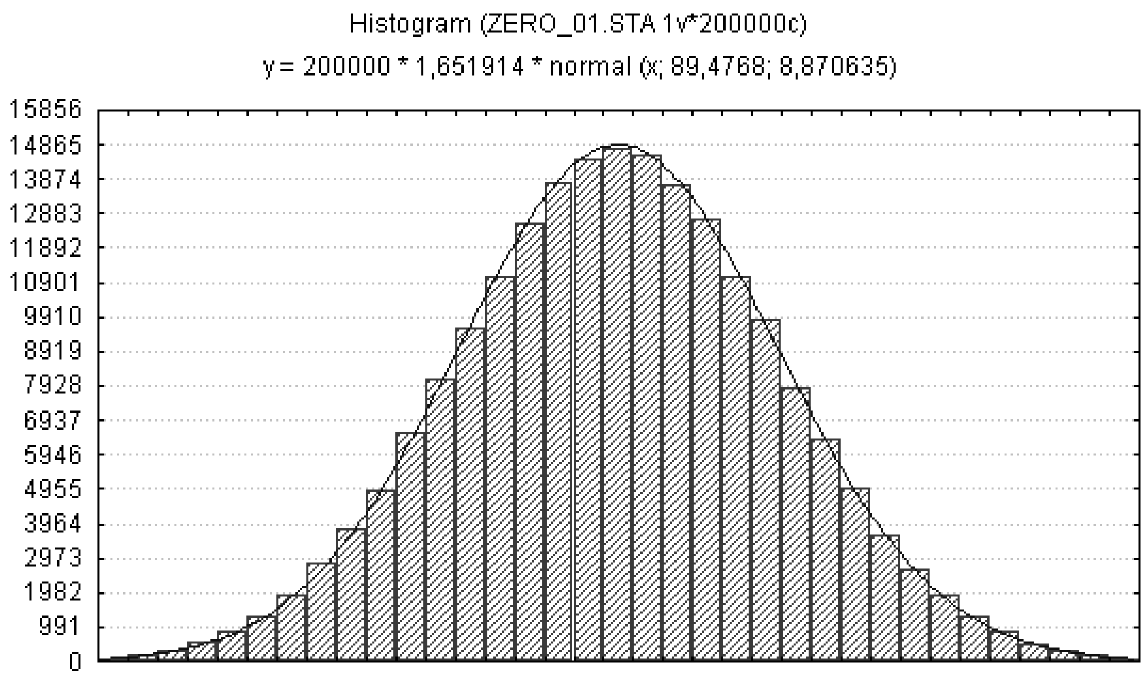


Рисунок 2.19 – Гистограмма распределения размеров зерен по оси *X* в среде программного пакета для статистических расчетов Statistica

2.4. Вопросы для самостоятельной подготовки

1. Дайте определение основной фракции алмазного порошка.
2. Как осуществляется контроль зернового состава порошков из сверхтвердых материалов?
3. Назовите отличительные особенности контроля зернового состава шлиф- и микропорошков.
4. Каково основное назначение прикладной статистики?

5. Оцените целесообразность использования статистического моделирования при исследовании алмазно-абразивных инструментов.

6. Что Вы понимаете под случайной величиной и вероятностным законом распределения ее значений?

7. Каковы механизмы формирования нормально и логарифмически-нормально распределенных случайных величин?

8. В чем заключаются основные принципы модификации параметров законов распределения при решении задач статистического моделирования параметров шлифовальных кругов, связанных с исходными характеристиками шлифпорошков?

9. Чем определяется выбор закона распределения исследуемых признаков при моделировании?

10. Назовите наиболее важные, на Ваш взгляд, законы распределений из числа часто используемых в теории и практике статистических исследований.

11. Как называется и выполняется сложение нескольких законов распределений взаимно независимых случайных величин?

12. Охарактеризуйте методы получения равномерно распределенных случайных чисел.

13. Какие требования предъявляются к генераторам случайных чисел?

14. Как производится генерирование случайных чисел с нормальной функцией распределения.

15. Для каких задач и как используется функция Лапласа в статистических расчетах?

16. Обоснуйте необходимость использования обратной функции распределения при генерировании случайных величин с заданным законом распределения.

ГЛАВА 3. СИСТЕМА 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Feci quod potui, faciant meliora potentes –
Я сделал все, что смог, пусть те, кто могут, сделают лучше.

Каждый великий успех науки имеет своим истоком великую дерзость воображения.
Дьюи

В настоящей главе изложена концепция 3D моделирования алмазно-абразивных инструментов на базе объектно-статистической методологии – статистическое моделирование с реализацией в объектно-ориентированной среде программирования. Рассмотрены структура и основные элементы системы. Сформулирован и практически реализован комплекс условий, необходимых для реалистического 3D моделирования алмазно-абразивных инструментов.

Изложена методология статистического анализа законов распределения исследуемых признаков при 3D моделировании алмазно-абразивного инструмента. Проведен регрессионный анализ взаимосвязи между параметрами распределения размеров зерен навески и процентным содержанием фракций. Определены параметры распределений размеров зерен для всех зернистостей алмазно-абразивных шлифпорошков и микропорошков в соответствии с ГОСТ.

3.1. Структура и основные элементы системы 3D моделирования

Переход к 3D моделированию при изучении рабочих процессов алмазно-абразивной обработки позволяет повысить содержательность и уровень визуализации результатов. Принятие объективных решений при проведении модельных исследований затруднительно, а порою и просто невозможно без наглядной визуализации данных и результатов.

В основу рассматриваемой системы моделирования положены научные разработки кафедры «Резание материалов и режущие инструменты»

НТУ «Харьковский политехнический институт». Структурная схема разработанной системы 3D моделирования представлена на рис. 3.1. Разработанная система является многовариантной. Предусмотрена возможность создания до 999 вариантов (экземпляров) моделей. Реализация системы произведена в среде визуального объектно-ориентированного программирования Microsoft Visual FoxPro.

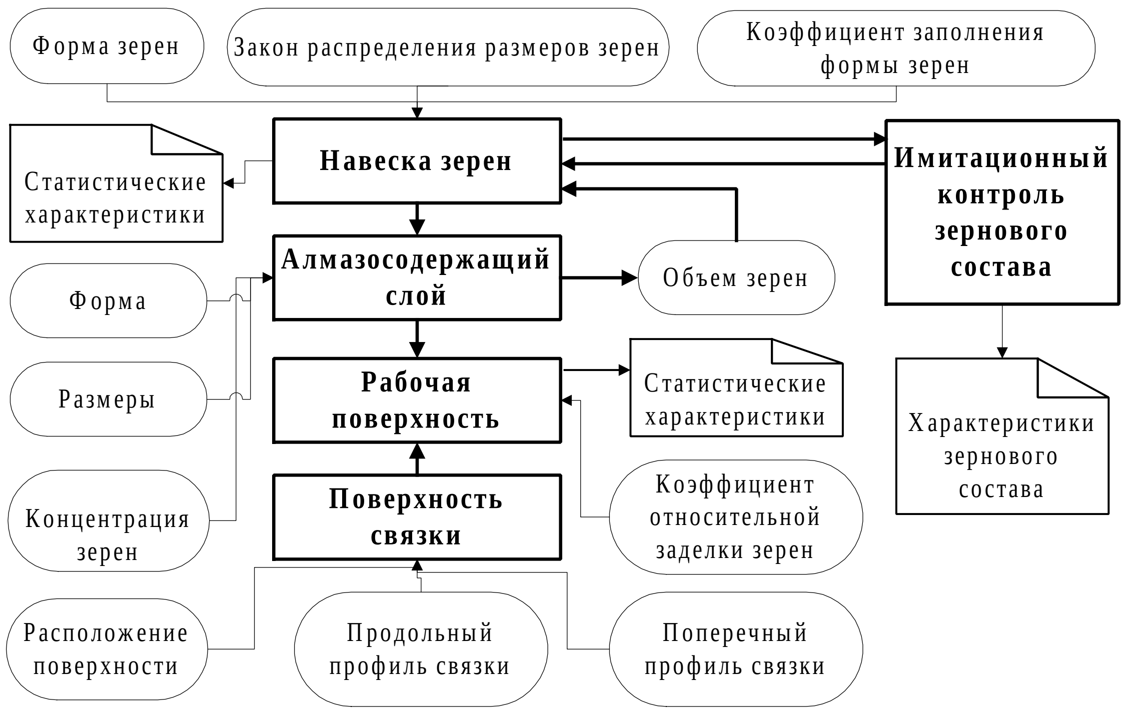


Рисунок 3.1 – Структурная схема 3D моделирования алмазно-абразивных инструментов

При создании экземпляра модели принята следующая структура системы:

– формирование абразивного пространства (форма и размеры алмазосодержащего слоя, концентрация зерен, определение объема навески);

– формирование навески зерен (модельная форма зерен, статистический закон распределения размеров зерен, коэффициент заполнения модели зерен, формирование базы данных навески зерен);

– имитационный контроль зернового состава навески, осуществляемый методом рассеивания для шлифпорошков и методом проекций для микропорошков; комплексный контроль для всего диапазона зернистостей шлифпорошков и микропорошков методами рассеивания и проекций (база данных навески зерен, определение процентного содержание фракций и коэффициента формы зерен);

– определение координат центров зерен методом Монте-Карло (форма и размеры абразивного пространства, база данных навески зерен, формирование базы данных 3D модели алмазосодержащего слоя);

– статистический анализ модельных характеристик алмазосодержащего слоя: размеры зерен по пространственным осям; соотношения размеров зерен; объем зерен; координаты зерен (база данных 3D модели алмазосодержащего слоя, определение статистических характеристик исследуемых признаков, гистограмм распределений, визуализация, анализ законов распределения);

– задание поверхности связки в абразивном пространстве (параметры абразивного пространства, параметры поверхности связки, формирование 3D модели поверхности связки);

– формирование рабочей поверхности инструмента (база данных 3D модели абразивного пространства, 3D модель поверхности связки, коэффициент относительной критической заделки зерен, создание базы данных 3D модели рабочей поверхности);

– формирование износа зерен по заданному закону изнашивания вершин зерен и вида их износа;

– задание параметров микрорельефа поверхности зерен и (или) связки;

– статистический анализ модельных характеристик рабочей поверхности: (база данных 3D модели рабочей поверхности, определение интегральных и статистических характеристик исследуемых признаков, гистограмм распределений, визуализация, анализ законов распределения, функциональный регрессионный и корреляционный анализ модельных зависимостей);

– интегральные характеристики: максимальные элементы рельефа (высота зерен, глубина лунок, рельеф); номинальные объемы рабочего пространства (область зерен и лунок, рельеф); количество, площадь и объем зерен и лунок;

– статистические характеристики: высота выступания зерен над уровнем связки; расстояние до вершин зерен по глубине рабочей поверхности;

неравномерность поверхности связки; рельеф поверхности относительно уровня связки; рельеф, количество зерен, расстояние между зернами, площадь сечения зерен по глубине рабочей поверхности;

– формирование поперечного и продольного профиля рабочей поверхности инструмента (база данных 3D модели рабочей поверхности, параметры сечений, формирование базы данных 2D моделей профилей, визуализация).

Схема данных системы 3D моделирования алмазно-абразивных инструментов приведена на рис. 3.2. Исходные данные и результаты моделирования сохраняются в базах данных (БД). Базы данных можно главить на две группы: системные или общего пользования (используются при работе системы) и создаваемые для каждого экземпляра объектов системы. Имя таких БД заканчивается на «_NNN», где NNN – номер варианта модели. Каждый экземпляр 3D модели определяется комплектом БД: ZERO_NNN – алмазосодержащий слой (размеры и координаты центров каждого зерна); CONT_NNN – результаты имитационного контроля зернового состава навески; STAT_NNN, GIST_NNN – статистические характеристики и данные гистограмм исследуемых элементов алмазосодержащего слоя; Z3DM_NNN – рабочая поверхность (размеры зерен, координаты поверхности связки и центров зерен, принадлежащих поверхности связки, для заданного участка рабочей поверхности); ST3D_NNN, GI3D_NNN – статистические характеристики и данные гистограмм исследуемых элементов рабочей поверхности; Z3DG_NNN – координаты 3D рабочей поверхности (с учетом износа зерен и микрорельефа связки и зерен); Z3DG_NNN.PRN – матрица координат поверхности для 3D визуализации в среде MathCad; Z2XM_NNN, Z2ZM_NNN – поперечный и продольный профиль (размеры зерен, координаты поверхности связки и центров зерен, принадлежащих поверхности связки, для заданного сечения участка рабочей поверхности); Z2XG_NNN, Z2ZG_NNN – координаты поперечного и продольного профилей рабочей поверхности. Структура основных баз данных, входящих в систему 3D моделирования приведена в приложении А, основные формы и примеры использования – в приложении Б.

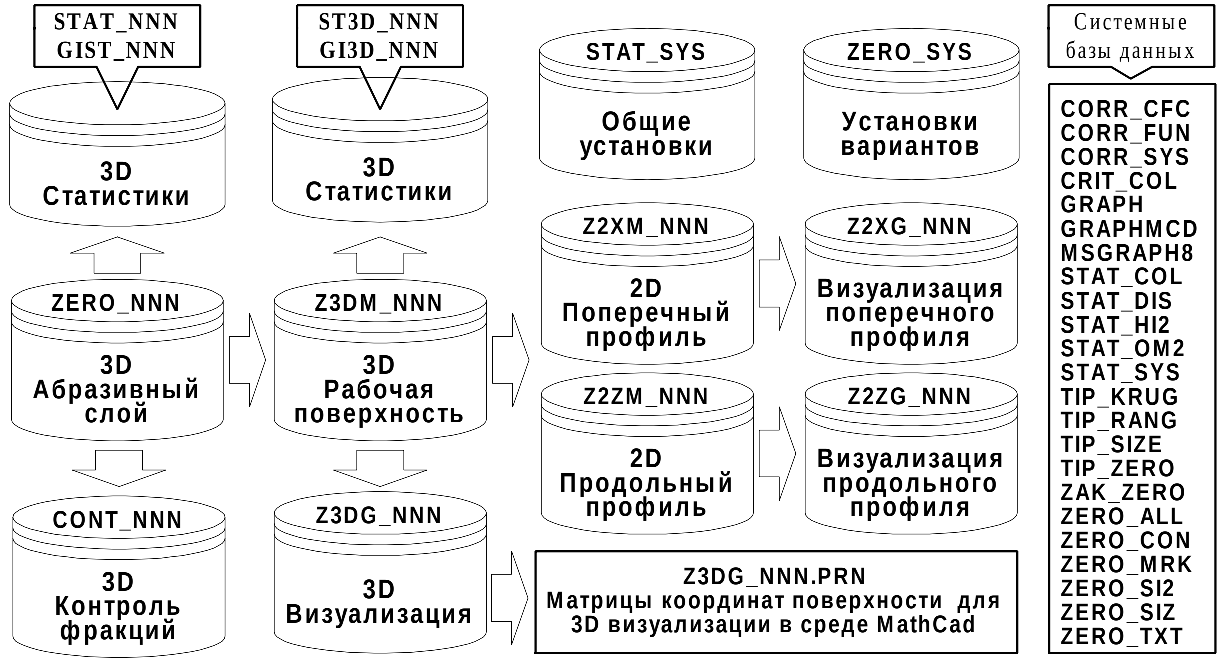


Рисунок 3.2 – Схема данных системы 3D моделирования алмазно-абразивных инструментов

3D и 2D визуализация производится с использованием встроенных в формы Visual FoxPro графиков Microsoft Graph. Для 3D визуализации также используются графики математического пакета MathCad. Методология визуализации результатов моделирования построена на базе возможностей взаимодействия Visual FoxPro с Microsoft Graph и MathCad на основе механизмов OLE (Object Linking and Embedding).

3.2. Подобие при 3D моделировании алмазно-абразивных инструментов

Под моделированием принято понимать замещение исследуемого объекта (оригинала) его условным образом или другим объектом (моделью) и изучение свойств оригинала путем исследования свойств модели. Моделирование имеет практический смысл при выполнении двух основных условий: модель обеспечивает подобное (адекватное) отображение свойств ориги-

нала; модель позволяет устранить проблемы, связанные с проведением измерений на реальных объектах.

Адекватность модели является более общим понятием, чем подобие, и при 3D моделировании алмазно-абразивных инструментов (см. рис. 3.1) должно включать в себя *систему подобий*:

– *технологическое и эволюционное подобие* процесса формирования модели (аналогичное процессу формирования объекта исследования: технологическое – на этапе создания исходного алмазосодержащего слоя; эволюционное – при его изменении в процессе работы);

– *геометрическое подобие* алмазосодержащего слоя, формы зерен и поверхности связки;

– *статистическое подобие* навески (комплекта, коллекции) абразивных зерен;

– *структурное подобие*: создание навески, распределение зерен в объеме алмазосодержащего слоя, задание поверхности связки, формирование рабочей поверхности инструмента.

Рассмотрим концептуальную модель алмазно-абразивного инструмента на базе системного объектно-ориентированного подхода. В рамках такого подхода каждый объект является экземпляром некоторого класса и имеет свои значения свойств, характерных для данного класса. *С позиций компьютерного моделирования объект представляется совокупностью свойств и методов (процедур, функций). Свойства имеет смысл разделить на три группы: входные – параметры, выходные – характеристики и вспомогательные (используемые для хранения промежуточных данных)*.

Под алмазно-абразивным инструментом будем понимать шлифовальный инструмент из порошков сверхтвердых материалов на основе алмаза или нитрида бора. Обычно такой инструмент состоит из алмазосодержащего слоя и корпуса, выполняющего вспомогательные функции. Основным элементом такого инструмента является алмазосодержащий слой, выполняющий полезную работу по удалению припуска с обрабатываемого изделия.

Алмазосодержащий слой–объект-контейнер, включающий в себя навеску зерен, закрепленных в связке инструмента. Зерна равновероятно распределены в пространстве алмазосодержащего слоя. Параметры объекта: форма и размеры слоя, концентрация зерен; характеристики: объемы слоя и зерен.

Навеска зерен состоит из коллекции зерен. Каждое отдельное зерно – экземпляр класса «Зерно» и характеризуется своими уникальными значениями свойств из набора свойств данного класса. Параметры навески: форма и размеры (закон плотности вероятности распределения геометрических параметров) зерен.

Рабочая поверхность алмазно-абразивного инструмента – поверхность, на которой происходят процессы, связанные с выполнением полезной работы. Для нашего случая это воздействие на поверхность обрабатываемой заготовки с целью придания ей требуемой геометрической формы и свойств поверхностного слоя.

Как объект рабочая поверхность представляет собой наружную поверхность алмазосодержащего слоя, состоящую из связки и выступающих из нее зерен. Как элемент процесса шлифования рабочая поверхность есть результат эволюции наружной поверхности алмазосодержащего слоя, имеющая свойства, зависящие как от исходных свойств самого слоя, так и от условий его функционирования в процессе эксплуатации. В настоящее время очевидно (благодаря исследованиям многих ученых), что построить адекватную модель рабочей поверхности шлифовального круга, игнорируя свойства исходного алмазосодержащего слоя, невозможно. Следовательно, необходимо первоначальное построение 3D модели алмазосодержащего слоя с последующим переходом к 3D модели рабочей поверхности.

При построении 3D модели алмазосодержащего слоя возникает принципиальный вопрос, какой она должна быть – стохастической или детерминированной? Так как основное требование к модели – ее адекватность объекту, то рассмотрим статистические свойства алмазосодержащего слоя реального шлифовального круга. С одной стороны, алмазосодержащий слой содержит большое число абразивных зерен. Распределение их размеров и положение в пространстве алмазосодержащего слоя можно охарактеризовать только параметрами законов распределения, что приводит к выводу о необходимости использования стохастической модели. С другой стороны, алмазосодержащий слой как объект – детерминирован, т. е. размеры и положение зерен однозначно определены. Его стохастическая природа проявляется в процессе и во время изготовления, следовательно, адекватная модель должна быть объектной: стохастической на этапах формирования навески зерен и ее распределения в пространстве алмазосодержащего слоя и детерминированной для полученного варианта экземпляра класса «Алмазосодержащий слой». Объект «Алмазосодержащий слой» можно рассматривать как контейнерный объект, включающий в себя объект «Связка» класса «Связка» и определенное множество ($i = 1 \ldots n$) объектов «Зерно$_{(i)}$» класса «Зерно», каждое из которых характеризуется размерами и положением в пространстве алмазосодержащего слоя.

В качестве методической основы при разработке модели было принято статистическое моделирование и объектно-ориентированное программирование в среде управления базами данных Visual FoxPro. Выбор среды программирования определился необходимостью создания и манипулирования большим числом данных, связанных с большим количеством экземпляров зерен в алмазосодержащем слое. Главная форма 3D модели представлена на рис. 3.3.

Методика создания и исследования варианта экземпляра 3D модели алмазосодержащего слоя и рабочей поверхности круга *включает следующие основные этапы: создание алмазосодержащего слоя; задание поверхности связки; формирование 3D модели рабочей поверхности; учет износа вершин зерен, микрорельефа поверхности связки и (или) зерен; статистический анализ элементов алмазосодержащего слоя и рабочей поверхности; формирование 2D профилей рабочей поверхности; визуализация и документирование результатов моделирования.*


3D модель
3D - модель рабочей поверхности кругов и абразивоносного слоя
Кнопка запуска главного меню
Кнопка запуска системы редактирования баз данных
Кнопка Завершения работы
Меню выбора формы круга
Меню выбора формы зерен
Меню выбора закона распределения размеров зерен
Меню выбора типа абразивного порошка и диапазона зернистостей
Кнопка запуска просмотра проекций зерен на плоскость X-Z
Кнопка запуска Построителя параметров закона распределения размеров зерен в соответствии с ГОСТ
Кнопка запуска Справки по выбору параметров законов распределения размеров зерен
Кнопка запуска 3D модели рабочей поверхности
Кнопка запуска контроля зернистости порошка по фракциям
Кнопка запуска результатов статистического анализа размеров зерен и координат
Меню выбора зернистости абразивного порошка
Кнопка запуска Редактирования текущей БД 3D модели абразивоносного слоя
Вариант 3
Вариант
Форма круга
5 - Сегмент торцового круга
Диаметр, мм
Ширина, мм
Толщина, мм
D= 150.00
B= 10.00
S= 3.00
Угол сегмента алмазоносного слоя
6.283,185 рад.
360.00 град.
Форма зерен
2 - Трехосный эллипсоид
Диаметр зерен, мкм
Отклонение
Основание
Ось X 90.0 11.00 2.72
Ось Y 90.0 11.00 2.72
Ось Z 90.0 11.00 2.72
Закон распред.
5 - Логарифмически - нормальное распределение с заданным
Концентрация
4
100 %
Диапазон зернистостей
1 - Алмазные шлифпорошки широкого
Характеристический размер
100
Зернистость
100/80
Выбор
Объем, мм3
Абразивн. слой
13,194.689
Зерна (предв.)
3,298.672
Зерна (модель)
3,298.672
Единичн. зерно
0.000,381,704
Количество
Зерна (предв.)
8,641,963
Зерна (модель)
8,646,073

3.3. Создание алмазосодержащего слоя

Методика создания варианта экземпляра 3D модели алмазосодержащего слоя включает следующие основные этапы:

– выбор формы и размеров алмазосодержащего слоя;

– создание навески абразивных зерен (в количестве, обеспечивающем заданную концентрацию зерен в алмазосодержащем слое);

– размещение зерен в объеме алмазосодержащего слоя методом Монте-Карло (распределение центров зерен с учетом ограничений по взаимному размещению зерен и выходу зерен за границы алмазосодержащего слоя).

Перед созданием навески необходимо задать следующие параметры: форма зерен; закон распределения размеров зерен; концентрация зерен в алмазосодержащем слое; плотность материала абразивных зерен; коэффициент заполнения объема модели абразивных зерен.

Главная форма 3D модели представлена на рис. 3.3. Модель позволяет реализовать следующие варианты свойств алмазосодержащего слоя:

– тип алмазосодержащего слоя (меню выбора формы круга): 1 – параллелепипед (параметры: длина, ширина, толщина); 2 – торцовый круг (параметры: наружный диаметр, ширина, толщина); 3 – цилиндрический круг (параметры: диаметр, ширина, толщина); 4 – профильный периферийный круг (резерв); 5 – сегмент торцового круга (параметры: наружный диаметр, ширина, толщина, угол сегмента); 6 – сегмент цилиндрического круга (параметры: диаметр, ширина, толщина, угол сегмента); 7 – сегмент профильного периферийного круга (резерв);

– форма зерен (меню выбора формы зерен): 1 – шар; 2 – трехосный эллипсоид;

– закон распределения (меню выбора закона распределения размеров зерен): 1 – постоянный размер (параметр – диаметр зерен); 2 – равномерное распределение (параметры: математическое ожидание диаметра, максимальное отклонение); 3 – нормальное распределение (параметры: математическое ожидание диаметра, среднеквадратическое отклонение); 4 – логарифмически-нормальное распределение (параметры: математическое ожидание диаметра, среднеквадратическое отклонение);

– концентрация зерен в алмазосодержащем слое (1 … 8 или 25 ... 200 %);

– плотность материала абразивных зерен (устанавливается в настройках для текущего варианта, по умолчанию – 3,53 мг/мм^3);

– коэффициент заполнения объема модели абразивных зерен (устанавливается в настройках для текущего варианта, по умолчанию – 1).

Дополнительная группа управляющих элементов (см. рис. 3.3) обеспечивает работу с характеристическими размерами зернистости порошка. В качестве характеристического размера принят первый размер в обозначении зернистости. Понятие характеристического размера (глава 2) введено для возможности сравнительного анализа статистических характеристик порошков различных зернистостей. В эту группу входят следующие элементы управления:

– меню выбора типа абразивного порошка и диапазона зернистостей: 1 – алмазные шлифпорошки широкого диапазона зернистостей; 2 – алмазные шлифпорошки узкого диапазона зернистостей; 3 – микропорошки;

– меню выбора зернистости абразивного порошка (производится выбор с учетом выбранного типа порошка и записывается характеристический размер);

– кнопка запуска построителя параметров закона распределения размеров зерен в соответствии с ГОСТ.

При изменении значений рассмотренных параметров система автоматически выполняет пересчет исходных данных для формирования навески зерен: объем алмазосодержащего слоя; объем, занимаемый абразивными зернами (предварительный). Дополнительно определяются ориентировочные справочные данные: объем единичного зерна и количество зерен в навеске (предварительное).

Объем алмазосодержащего слоя определяется с учетом формы алмазно-абразивного инструмента и его размеров:

– параллелепипед

$$V_{\text{а}} = LBS, \tag{3.1}$$

где L, – длина; B – ширина; S – толщина слоя;

– торцовый круг

$$V_{а} = \pi BS(D - B);\tag{3.2}$$

– цилиндрический круг

$$V_{а} = \pi BS(D - S),\tag{3.3}$$

где B – ширина слоя; S – толщина; D – наружный диаметр;

– сегмент торцового круга

$$V_{а} = 2\pi BS(D - B)\varphi_{сект};\tag{3.4}$$

– сегмент цилиндрического круга

$$V_{а} = 2\pi BS(D - S)\varphi_{сект},\tag{3.5}$$

где B – ширина слоя; S – толщина; D – наружный диаметр; $\varphi_{сект}$ – угол сектора сегмента в радианах. Переход от угла сектора в градусах к радианам (см. рис. 3.3) производится по известной зависимости $\varphi_{(рад.)} = \varphi_{(град.)}\,\pi / 180$.

Объем (предварительный), занимаемый абразивными зернами, определяется по следующей зависимости:

$$V_{з\,(предв.)} = V_{а}\frac{K_{з}}{16},\tag{3.6}$$

где $V_{а}$ – объем алмазосодержащего слоя; $K_{з}$ – концентрация зерен в алмазосодержащем слое (1 ... 8). Переход к справочному значению концентрации в % (см. рис. 3.3) производится по соотношению $K_{з\,(\%)} = 25 \cdot K_{з}$.

Объем единичного зерна (предварительный) определяется с учетом формы зерен и математических ожиданий размеров (см. рис. 3.3):

– для формы зерен в виде шара

$$V_{з1(предв.)} = \frac{\pi}{6}E^{3}\{d_{з}\},\tag{3.7}$$

где $E\{d_{з}\}$ – математическое ожидание распределения диаметров зерен;

– для формы зерен в виде трехосного эллипсоида

$$V_{з1(предв.)} = \frac{\pi}{6}E\{d_{зX}\}E\{d_{зY}\}E\{d_{зZ}\},\tag{3.8}$$

где $E\{d_{з\,X}\}$, $E\{d_{зY}\}$, $E\{d_{з\,Z}\}$, – математические ожидания распределений диаметров зерен по осям X, Y, Z.

Количество зерен в навеске (предварительное) определяется делением объема, занимаемого абразивными зернами $V_{з\,(предв.)}$ (3.6), на объем единичного зерна $V_{з1\,(предв.)}$.

3.3.1. Формирование навески зерен с заданным законом распределения размеров

Формирование базы данных геометрических параметров зерен (в соответствии с заданными законами распределения) в количестве, соответствующем заданному объему навески, производится запуском соответствующей процедуры из главного меню (см. рис. 3.3).

При создании навески последовательно создаются экземпляры отдельных зерен, определяется объем i-го зерна и суммарный объем навески. При достижении заданного объема навески (3.6) процесс ее формирования завершается. Математически это условие можно записать следующим образом:

$$\sum_i k_ф \cdot V_{з1(i)} = \sum_i k_ф \frac{\pi}{6} d_{X(i)} d_{Y(i)} d_{Z(i)} = V_з \geq V_{з(предв.)}, \tag{3.9}$$

где $k_ф$ – коэффициент заполнения объема (формы) модели; $V_{з1(i)}$ – объем единичного i-го зерна; $d_{X(i)}$, $d_{Y(i)}$, $d_{Z(i)}$ – диаметры i-го зерна по осям X, Y, Z; $V_з$, $V_{з(предв.)}$ – модельный (итоговый) объем, занимаемый абразивными зернами, и предварительный (3.6). Разность между этими объемами не превышает объема последнего сформированного зерна.

Генерирование случайных чисел при формировании размеров зерен производится в соответствии с методологией, рассмотренной в 2.3.

В зависимости от модельной формы зерен (шар или трехосный эллипсоид) формирование диаметров зерен осуществляется по одной или трем осям. Для простоты изложения будем рассматривать формирование диаметров зерен по одной координате с заданным законом распределения размеров. *В общем случае используемые законы распределения имеют от одного до* *трех исходных параметров (с полями редактирования значений, представленными на рис. 3.3): математическое ожидание E «Диаметр зерен»; максимальное отклонение от среднего значения для равномерного распределения или среднеквадратическое отклонение для распределений на основе нормального s «Отклонение»; основание логарифма для логарифмически-нормального распределения b «Основание».*

Постоянный размер. Для этого случая диаметр зерен постоянен и равен исходному параметру $d_i = E = \text{const}$.

Равномерное распределение. Значения диаметра зерна находятся в интервале $d_{\min} = E - s \le d_i \le E + s = d_{\max}$ и определяются зависимостью

$$d_i = d_{\min} + (d_{\max} - d_{\min})\,\text{RAND}() = E - s\left[1 + 2\,\text{RAND}()\right], \qquad (3.10)$$

где RAND() – функция, возвращающая равномерно распределенное случайное число [0, 1].

Нормальное распределение. Значения диаметра зерна (с учетом 2.3) определяются выражением:

$$d_i = E + \psi\left[\text{RAND}()\right]s\,, \qquad (3.11)$$

где $\psi\,(p)$ – функция обратная функции Лапласа, аппроксимируемая зависимостью (2.55) для интервала значений вероятности ($0 \le p \le 1$).

Логарифмически-нормальное распределение. Вначале исходные параметры модифицируются и приводятся к логарифмической шкале:

$$k_v = s/E\,; \quad \widehat{E} = \ln\left(\frac{E}{\sqrt{k_v^2 + 1}}\right); \quad \hat{s} = \sqrt{\ln\left(k_v^2 + 1\right)}, \qquad (3.12)$$

где k_v – коэффициент вариации исходных параметров распределения; $\widehat{E}$, $\hat{s}$ – модифицированные значения математического ожидания и среднеквадратического отклонения.

Далее определяется модифицированное значение диаметра зерна аналогично (3.11):

$$\hat{d}_i = \widehat{E} + \psi\left[\text{RAND}()\right]\hat{s}\,. \qquad (3.13)$$

Возврат к исходной шкале производится следующим преобразованием:

$$d_i = \exp\left(\widehat{E} + \hat{d}_i \hat{s}\right), \quad (3.14)$$

где $\widehat{E}$, $\hat{s}$, $\hat{d}_i$ – модифицированные значения математического ожидания, среднеквадратического отклонения и диаметра i-го зерна.

Логарифмически-нормальное распределение с заданным основанием логарифма. Определение значений размеров зерен производится аналогично логарифмически-нормальному распределению. Вначале исходные параметры модифицируются и приводятся к логарифмической шкале по основанию b:

$$k_v = s/E; \quad \widehat{E} = \frac{1}{\ln b} \ln\left(\frac{E}{\sqrt{k_v^2 + 1}}\right); \quad \hat{s} = \frac{1}{\ln b} \sqrt{\ln\left(k_v^2 + 1\right)}, \quad (3.15)$$

где k_v – коэффициент вариации исходных параметров распределения; $\widehat{E}$, $\hat{s}$ – модифицированные значения математического ожидания и среднеквадратического отклонения; b – заданное основание логарифма.

Далее определяется модифицированное значение диаметра зерна $\hat{d}_i$ аналогично (3.13). Возврат к исходной шкале производится преобразованием, подобным (3.14): $d_i = b^{\widehat{E} + \hat{d}_i \hat{s}}$, где b – заданное основание логарифма.

Полученные значения диаметров d_i зерен для каждой из координат X, Y, Z записываются в базу данных (БД) ZERO_NNN, где NNN – номер текущего варианта модели. Для этого перед началом формирования навески зерен создается новая БД, а перед записью размеров каждого зерна к ней добавляется новая запись (строка). После завершения формирования экземпляра навески количество записей в БД соответствует числу зерен.

Исходные данные и параметры полученной навески записываются в БД вариантов ZERO_SYS (рис. 3.2). Итоговые значения объема навески $V_З$ «Алмазосодержащий слой–Зерна (модель)» и количества зерен «Количество-зерна (модель)» представляются на главной форме 3D модели (см. рис. 3.3).

Оценка свойств навески зерен (для каждого варианта модели) может быть выполнена запуском имитационного контроля зернового состава из главного меню (см. рис. 3.3).

3.3.2. Имитационный контроль зернового состава навески

Всякая модель является упрощенным представлением изучаемой действительности. Мера адекватности выбранной модели и изучаемой действительности является решающим фактором, определяющим эффективность, научную и практическую ценность результатов моделирования. Это в полной мере относится к задачам 3D моделирования рабочей поверхности шлифовальных кругов на базе предварительно сформированной 3D модели алмазосодержащего слоя. *Основой 3D модели алмазосодержащего слоя является навеска абразивного порошка. Отдельные зерна навески моделируются трехосным эллипсоидом с заданными взаимно независимыми законами распределения размеров по каждой из пространственных осей. Контроль модельной навески, проведенный с использованием виртуальных методов, эквивалентных применяемым в реальной действительности, является имитационным моделированием*.

Рассмотрим методы, применяемые при контроле зернового состава реальных шлифпорошков и микропорошков из сверхтвердых материалов. Порошки из синтетических алмазов и других сверхтвердых материалов представляют собой совокупность зерен различной величины и формы. При производстве и контроле порошок подразделяют на фракции.

Зернистость и нормы зернового состава шлифпорошков и микропорошков, а также методика определения коэффициента формы зерен из природных и синтетических алмазов различных марок определяются ГОСТ 9206-80 (ДСТУ 2486-94).

Контроль шлифпорошков. Рассмотрим имитационную модель контроля зернового состава абразивных порошков. Модель реализована в среде объектно-ориентированного управления базами данных Microsoft Visual FoxPro и входит в комплект системы 3D моделирования алмазно-абразивных инструментов.

Исходные данные и результаты статистического моделирования навески зерен шлифпорошка узкого диапазона зернистостей 100/80 представлены на рис. 3.4.

Результатом объектно-статистического моделирования навески зерен является база данных с числом записей, равным числу зерен

(n = 196652 шт.). В каждой записи содержатся размеры зерен $d_{X(i)}$, $d_{Y(i)}$, $d_{Z(i)}$ по каждой из трех координатных осей X, Y, Z. Распределение размеров зерен соответствует нормальному закону (см. рис. 3.4) с одинаковыми параметрами по всем трем осям: математическое ожидание «Диаметр зерен» E = 90 мкм и среднеквадратическое отклонение «Отклонение» s = 11 мкм. Для каждого зерна размеры по осям различны, т. к. их формирование производилось случайным образом $d_{X(i)} \neq d_{Y(i)} \neq d_{Z(i)}$. Гистограммы распределения размеров зерен приведены на рис. 3.5. Результаты имитационного контроля представлены на рис. 3.6.

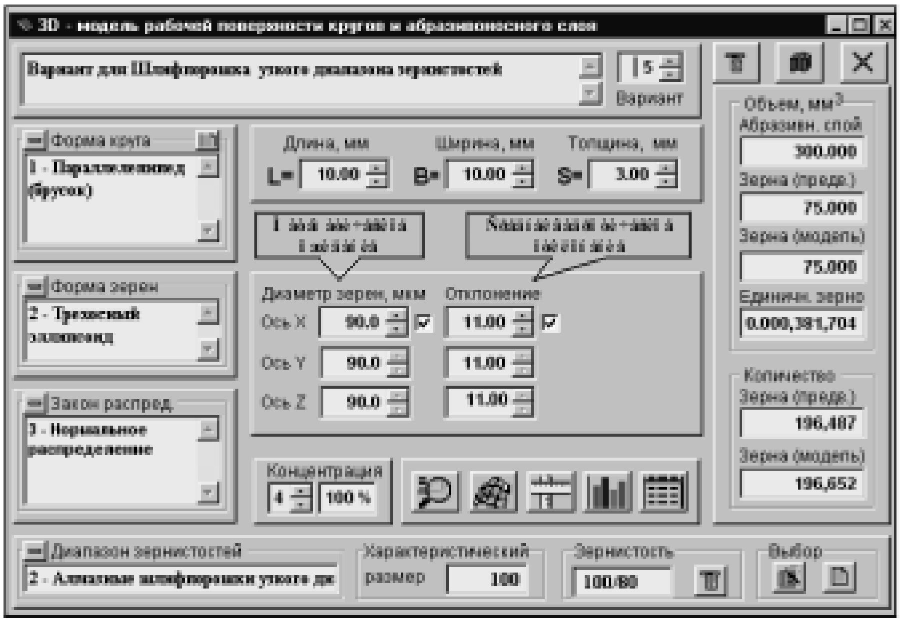


Рисунок 3.4 – Исходные данные и результаты статистического моделирования навески зерен шлифпорошка узкого диапазона зернистостей

Экранная форма для контроля зернового состава шлифпорошков имеет следующие элементы установки параметров:

– меню выбора диапазона зернистостей («Широкий диапазон зернистости», «Узкий диапазон зернистости»);

– меню выбора величины зернистости в соответствии с ГОСТ (с учетом установленного диапазона зернистостей): «Широкий диапазон зернистости» – «2500/1600, 1600/1000, 1000/630, 630/400, 400/250, 250/160, 160/100, 100/63, 63/40»; «Узкий диапазон зернистости» – «2500/2000, 2000/1600, 1600/1250, 1250/1000, 1000/800, 800/630, 630/500, 500/400, 400/315, 315/250, 250/200, 200/160, 160/125, 125/100, 100/80, 80/63, 63/50, 50/40»;

– меню выбора марки шлифпорошка: «А1, А2, А3, А5, А8, АС2, АС4, АС6, АС15, АС20, АС32, АС50, АРВ1, АРК4, АРС3».

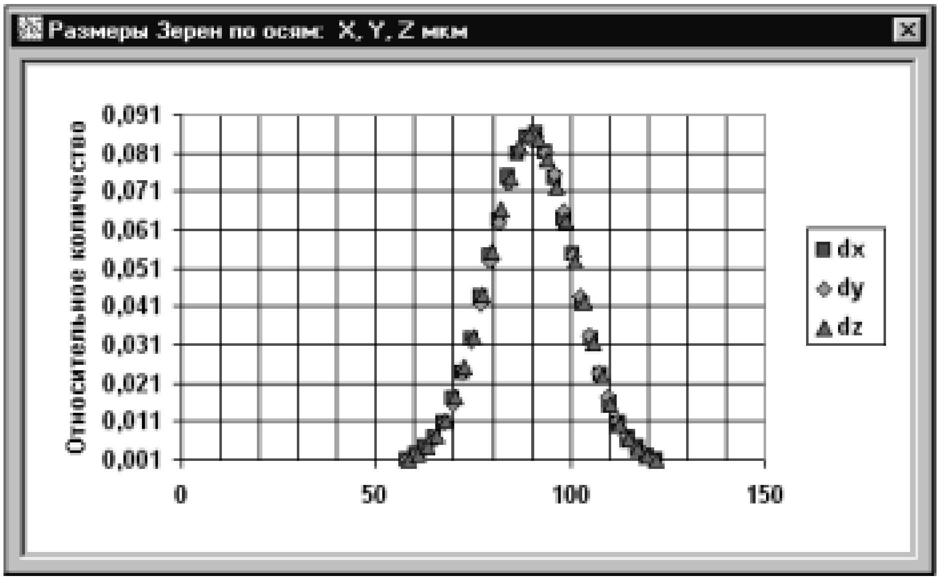


Рисунок 3.5 – Обобщенные гистограммы распределения размеров зерен модельной навески по осям *X*, *Y*, *Z* для шлифпорошка узкого диапазона зернистостей

Рисунок 3.6 – Результаты имитационного контроля модельной навески зерен шлифпорошка узкого диапазона зернистостей ситовым методом

Соотношение выбранных параметров определяет контрольные значения процентного содержания фракций в навеске (см. рис. 3.6, правая колонка). Наличие требуемой информации обеспечивается соответствующей средой данных с возможностью ее редактирования и обновления. В левой колонке визуализируются модельные характеристики содержания фракций. Анализ навески производится при нажатии командной кнопки – «Контроль методом рассева». Схема контроля шлифпорошков ситовым методом приведена на рис. 3.7 и может быть вызвана для справки наряду с другими справочными материалами (характеристика марки порошка и рекомендуемая область применения по ГОСТ).

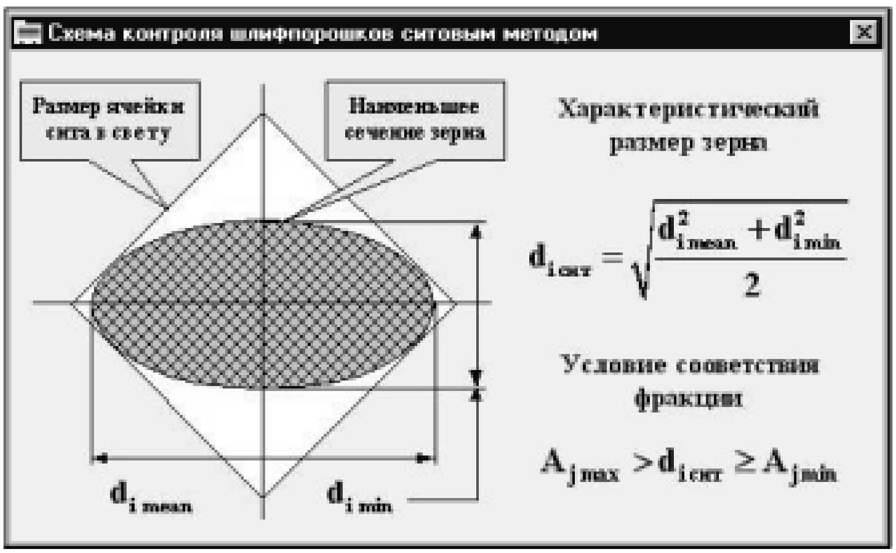


Рисунок 3.7 – Схема контроля шлифпорошков ситовым методом

Условие соответствия зерна заданной фракции можно записать следующим образом:

$$A_{j\,\max} > d_i \geq A_j \quad , \qquad (3.16)$$

где $A_{j\max}$, $A_{j\min}$ – максимальный и минимальный размеры ячеек сита в свету, определяющие выделение j-й фракции из навески; $d_{i\text{сит}}$ – размер условной ячейки сита, представляющий собой квадрат минимального размера, описанный вокруг минимального сечения i-го зерна. Введение такого характеристического размера позволяет сопоставлять пространственные размеры зерна с плоским сечением ячеек сита.

Определение $d_{i\text{сит}}$ для i-го зерна, имеющего размеры $d_{X(i)}$, $d_{Y(i)}$, $d_{Z(i)}$, производится по зависимости:

$$d_{i\text{сит}} = \sqrt{\frac{d_{i\text{mean}}^2 + d_{i\min}^2}{2}}, \tag{3.17}$$

где $d_{i\text{mean}}$, $d_{i\text{min}}$ – среднее и минимальное значения диаметров $d_{X(i)}$, $d_{Y(i)}$, $d_{Z(i)}$ зерна, имеющего форму трехосного эллипсоида.

Контроль методом рассева производится в несколько этапов, объединенных единой программной процедурой. Для заданной зернистости порошка (из базы данных) выбираются размеры ячеек сит. Производится сканирование базы данных (БД) навески зерен $i = 1 \dots n$, где n – число записей БД, соответствующее числу зерен. Для каждого зерна вычисляются следующие характеристики:

– определяется объем i-го зерна

$$V_{з(i)} = \frac{\pi}{6} d_{X(i)} d_{Y(i)} d_{Z(i)}, \tag{3.18}$$

где $d_{X(i)}$, $d_{Y(i)}$, $d_{Z(i)}$ – диаметры i-го зерна по осям X, Y, Z;

– сортируются размеры по осям

$$d_{X(i)}, d_{Y(i)}, d_{Z(i))} \Rightarrow d_{i\max}, d_{i\text{mean}}, d_{i\min}; \tag{3.19}$$

– вычисляется $d_{i\text{сит}}$ по зависимости (3.17);

– определяется номер j-й фракции по (3.16);

– объем зерна добавляется к суммарному объему j-й фракции $V_j = V_j + V_{з(i)}$, где $V_{з(i)}$ (3.18);

– производится суммирование для последующего определения коэффициента формы зерен по ГОСТ (рис. 3.15): $\sum_i d_{i\max}$; $\sum_i d_{i\text{mean}}$, где $d_{i\max}$, $d_{i\text{mean}}$ – максимальный и средний размеры зерна после сортировки.

После завершения сканирования БД навески определяется относительное содержание зерновых фракций (пропорционально объемам):

$$P_j = 100 \frac{V_j}{\sum V_j} \%, \tag{3.20}$$

где V_j , $\sum V_j$ – объем *j*-й фракции и общий объем навески;

и коэффициент формы зерен

$$K_ф = \sum_{i}^{n} d_{i\max} \Big/ \sum_{i}^{n} d_{i\text{mean}} , \qquad (3.21)$$

где $d_{i\max}$, $d_{i\text{mean}}$ – максимальный (длина проекции) и средний (ширина проекции) размеры зерна после сортировки.

Результаты контроля (см. рис. 3.6) подтверждают адекватность параметров модели навески зерен (для рассмотренного экземпляра) требованиям ГОСТ: $P_п$ = 0 < 0,1 % – содержание предельной фракции; $P_к$ = 2,55 < 12 % – крупной; $P_о$ = 82,13 > 75 % – основной; $P_м$ = 0,01 < 2 % – мелкой. Процентное содержание дополнительной фракции не регламентируется $P_д$ = 15,31 %. Коэффициент формы $K_ф$= 1,103. Дополнительно к рассмотренным характеристикам в процессе контроля определяется вес навески (в г. и кар.).

Контроль микропорошков. Исходные данные и результаты статистического моделирования навески зерен (*n* = 5873383 шт.) микропорошка 40/28 представлены на рис. 3.8. Распределение размеров зерен соответствует нормальному закону с одинаковыми параметрами по всем трем осям: математическое ожидание «Диаметр зерен» *E* = 29 мкм и среднеквадратическое отклонение «Отклонение» *s* = 7 мкм. Гистограммы распределения размеров зерен приведены на рис. 3.9.

Результаты имитационного контроля представлены на рис. 3.10. Форма для контроля зернового состава микропорошков имеет следующие элементы установки параметров:

– меню выбора величины зернистости в соответствии с ГОСТ: «60/40, 40/28, 28/20, 20/14, 14/10, 10/7, 7/5, 5/3, 3/2, 2/1, 1/0»;

– меню выбора марки микропорошка: «АМ, АСМ, АН, АСН».

В отличие от шлифпорошков микропорошки по диапазонам зернистостей не делятся, но по диапазонам предельных размеров в большей степени приближаются к широкому диапазону зернистостей.

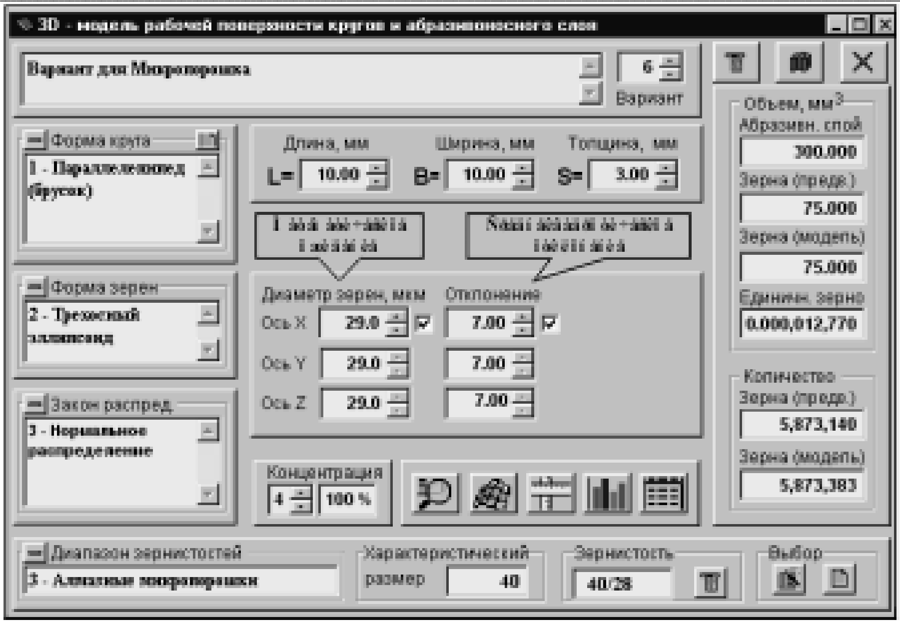


Рисунок 3.8 – Исходные данные и результаты статистического моделирования навески зерен микропорошка

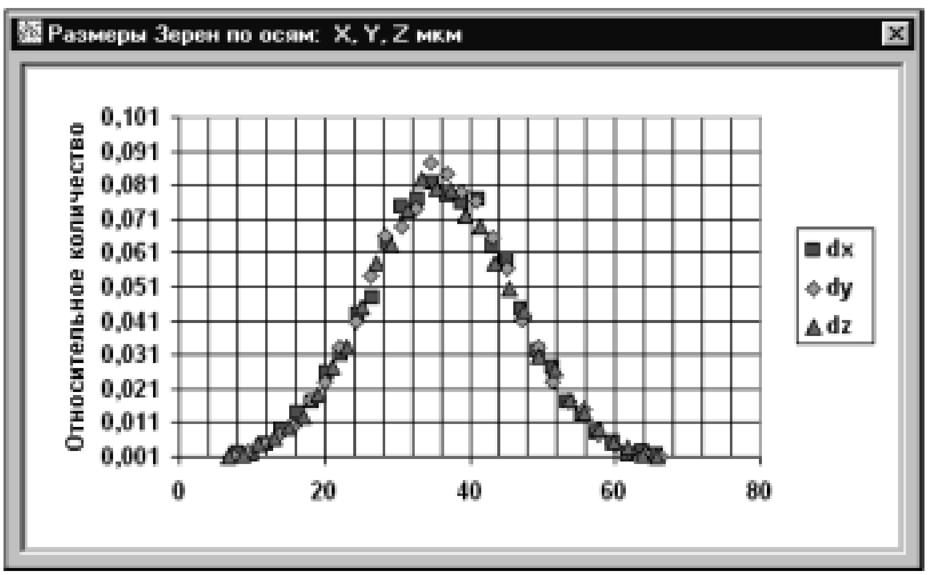


Рисунок 3.9 – Обобщенные гистограммы распределения размеров зерен модельной навески по осям *X*, *Y*, *Z* для микропорошка

Соотношение выбранных параметров определяет контрольные значения процентного содержания фракций в навеске (см. рис. 3.10, правая колонка). В левой колонке визуализируются модельные характеристики содержания фракций. Особенностью микропорошков (по сравнению со шлифпорошками) является меньшее число фракций. Анализ навески производится при нажатии командной кнопки – «Контроль методом проекций». Схема контроля микропорошков методом проекций приведена на рис. 3.11 и может быть вызвана для справки наряду с другими справочными материалами (характеристика марки микропорошка и рекомендуемая область его применения). Контроль микропорошков методом проекций производится аналогично контролю шлифпорошков методом рассева. При его выполнении имеется два принципиальных отличия:

– при определении характеристического размера зерна $d_{i\text{про}}$ вместо уравнения (3.17) используется зависимость, отражающая специфику метода проекций (зерно самоориентируется на предметном стекле микроскопа таким образом, чтобы измерялись его максимальные размеры)

$$d_{i\text{про}} = \frac{d_{i\max} + d_{i\text{mean}}}{2}, \qquad (3.22)$$

где $d_{i\max}$, $d_{i\text{mean}}$ – максимальное и среднее значения диаметров $d_{X(i)}$, $d_{Y(i)}$, $d_{Z(i)}$ зерна, имеющего форму трехосного эллипсоида;

– при определении процентного содержания фракций учитываются не объемы зерен (3.20), а их количество:

$$P_j = 100\frac{N_j}{\sum N_j}\ \%, \qquad (3.23)$$

где N_j , $\sum N_j$ – количество зерен в j-й фракции и во всей навеске.

Результаты контроля (см. рис. 3.10) подтверждают адекватность параметров модели навески зерен (для рассмотренного экземпляра) требованиям ГОСТ: $P_\text{к}$ = 3,24 < 5 % – крупная фракция; $P_\text{о}$ = 78,5 > 65 % – основная; $P_\text{м}$= 18,26 < 30 % – мелкая. Зерна с размерами «больше крупной» и «меньше мелкой» отсутствуют. Коэффициент формы $K_\text{ф}$ = 1,203. Дополнительно к рассмотренным характеристикам в процессе контроля определяется вес навески (в г. и кар.).

Комплексный контроль. Для расширения методических возможностей имитационного контроля навесок абразивных порошков был предложен и реализован комплексный контроль, отвечающий следующим требованиям:

– контроль порошков по всем диапазонам зернистости шлифпорошков и микропорошков (2500/2000 ... 1/0);

– одновременный контроль методом рассева и методом проекций.

Рисунок 3.10 – Результаты имитационного контроля модельной навески зерен микропорошка методом проекций

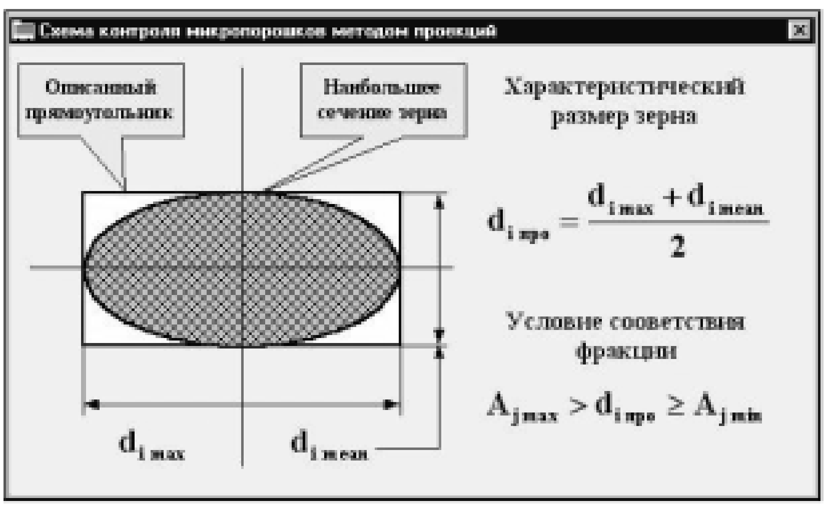


Рисунок 3.11 – Схема контроля микропорошков методом проекций

Такой подход расширяет познавательные возможности модели, поскольку ни одна из жестко определенных моделей не может на практике идеально соответствовать изучаемой реальной действительности и позволяет решать следующие задачи:

– анализ навесок абразивных порошков с характеристиками, выходящими за рамки ГОСТ;

– сравнение результатов контроля ситовым методом и методом проекций;

– оценочный анализ навесок порошков с произвольными характеристиками распределения размеров зерен.

В качестве примера рассмотрим комплексный контроль навески шлифпорошка с повышенным коэффициентом вариации размеров. Исходные данные и результаты статистического моделирования навески зерен (*n* = 189537 шт.) представлены на рис. 3.12. Распределение размеров зерен соответствует нормальному закону с одинаковыми параметрами по всем трем осям: математическое ожидание «Диаметр зерен» *E* = 90 мкм и среднеквадратическое отклонение «Отклонение» *s* = 40 мкм. Гистограммы распределения размеров зерен приведены на рис 3.13. Результаты комплексного контроля представлены на рис. 3.14. Анализ навески производится при нажатии командной кнопки – «Контроль». Схема определения коэффициента формы приведена на рис. 3.15 и может быть вызвана для справки во всех формах контроля.

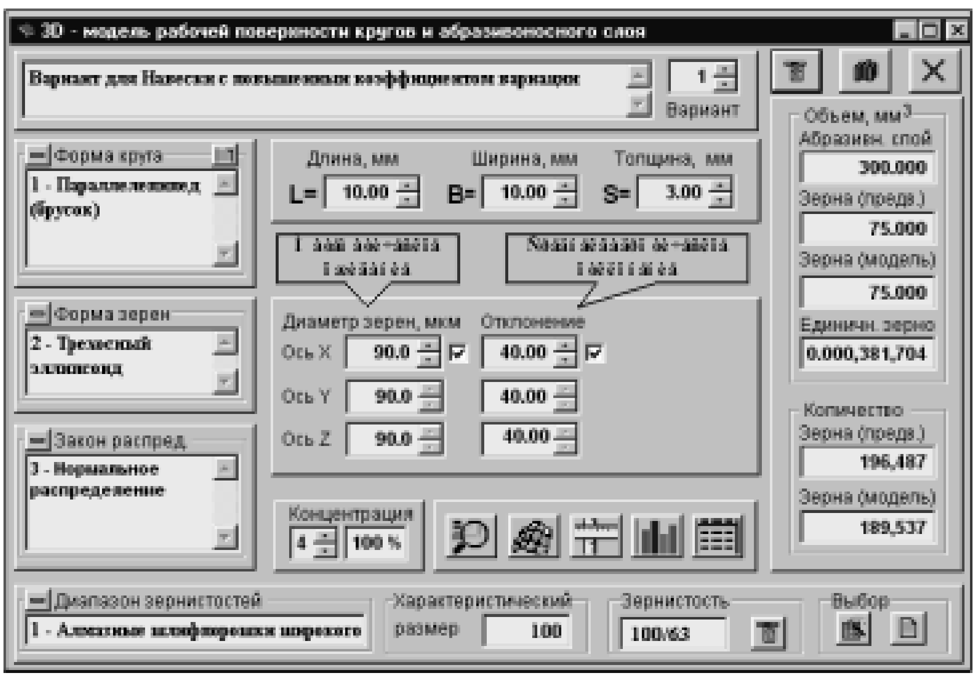


Рисунок 3.12 – Исходные данные и результаты статистического моделирования навески зерен шлифпорошка с повышенным коэффициентом вариации размеров

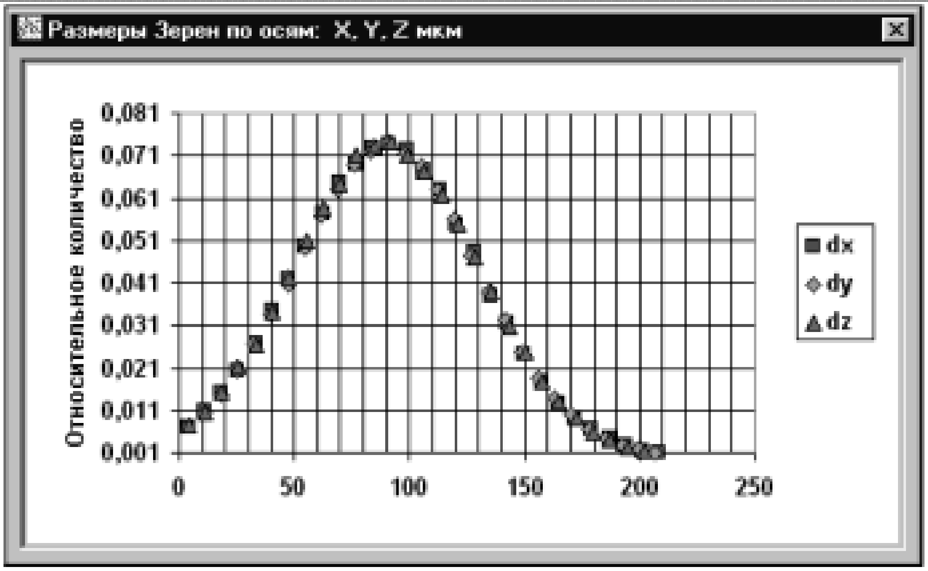


Рисунок 3.13 – Обобщенные гистограммы распределения размеров зерен модельной навески по осям *X*, *Y*, *Z* для шлифпорошка с повышенным коэффициентом вариации размеров

Результаты комплексного контроля (см. рис. 3.14) позволяют анализировать структуру зернового состава навески и особенности метода ее сортировки по фракциям. Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

– при контроле ситовым методом размер основной фракции соответствует зернистости 100/80 (34,84 %);

– при контроле методом проекций – 125/100 (37,76 %);

– результаты контроля зависят от применяемого метода, причем использование метода проекций приводит к увеличению размера зернистости основной фракции.

В целом в результате проведенных исследований можно сделать вывод о перспективности рассмотренной методологии контроля модельных навесок порошков. Ее использование позволяет производить оценку адекватности модельных навесок требованиям ГОСТ, соответствующим реальным шлифпорошкам и микропорошкам. Такой подход создает предпосылки для реалистического 3D моделирования алмазно-абразивных инструментов. Для его реализации необходимо произвести определение параметров распределений для всей номенклатуры шлифпорошков и микропорошков.

Рисунок 3.14 – Результаты имитационного комплексного контроля модельной навески зерен шлифпорошка с повышенным коэффициентом вариации размеров

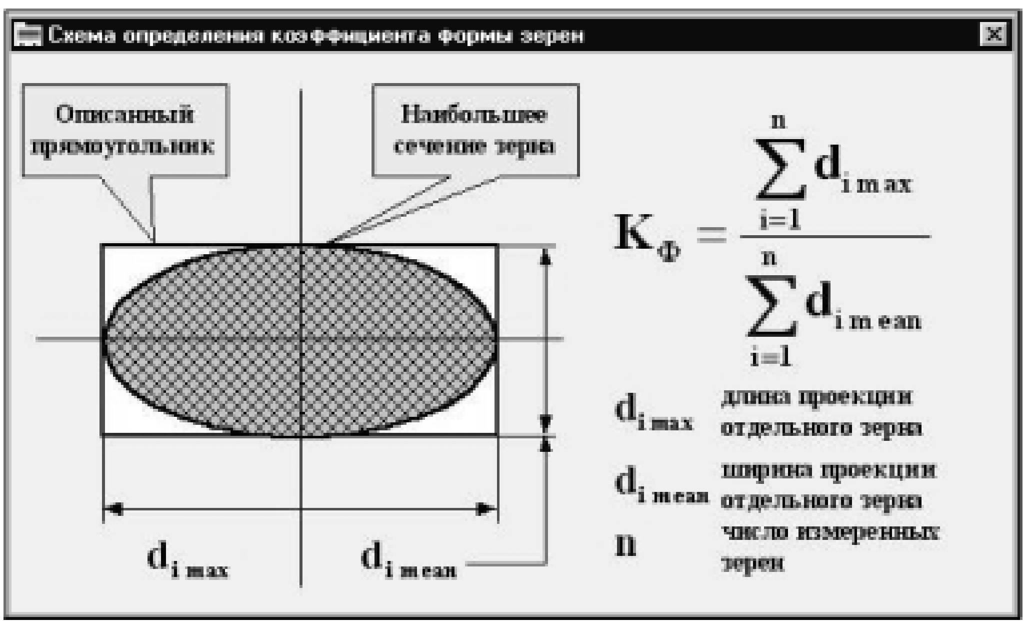


Рисунок 3.15 – Схема определения коэффициента формы зерен методом проекций

3.3.3. Распределение зерен в пространстве алмазосодержащего слоя

Задача распределения в пространстве алмазосодержащего слоя сводится к формированию базы данных координат зерен (с присвоением значений каждому зерну), равномерно распределенных по объему алмазосодержащего слоя.

Для решения этой задачи используется база данных (БД) навески зерен (ZERO_NNN), дополненная полями для записи их координат. Каждая запись этой БД содержит значения диаметров зерен по координатным осям $d_{X(i)}$, $d_{Y(i)}$, $d_{Z(i)}$. Будем рассматривать алмазосодержащий слой в форме параллелепипеда длиной L, шириной B и толщиной S.

Формирование координат центров зерен производится с использованием метода Монте-Карло, рассмотренного в главе 2. Определение координат центров зерен производится при последовательном сканировании БД навески. Для каждого i-го зерна выполняется следующая последовательность действий, объединенная единым циклом:

– формируются равномерно распределенные координаты центров зерен с учетом границ алмазосодержащего слоя и размеров текущего зерна

$$x_{ц(i)} = 0{,}5 d_{X(i)} + \left(B - d_{X(i)}\right)\mathrm{RAND}(); \quad (3.24)$$

$$y_{ц(i)} = 0{,}5 d_{Y(i)} + \left(S - d_{Y(i)}\right)\mathrm{RAND}(); \quad (3.25)$$

$$z_{ц(i)} = 0{,}5 d_{Z(i)} + \left(L - d_{Z(i)}\right)\mathrm{RAND}(), \quad (3.26)$$

где $d_{X(i)}$, $d_{Y(i)}$, $d_{Z(i)}$ – размеры i-го зерна; B, S, L – ширина, толщина и длина алмазосодержащего слоя; RAND () – функция, возвращающая равномерно распределенное случайное число [0, 1];

– производится контроль на «попадания» i-го текущего зерна на ранее «брошенные» j-е (j = 1 ... i–1) зерна

$$\Delta_{ji} \le r_j + r_i, \quad (3.27)$$

где Δ_{ji} – расстояние между центрами j-го и i-го зерен; r_j, r_i – радиусы j-го и i-го зерен, измеренные по линии, соединяющей их центры;

– если контроль на «попадания» i-го текущего зерна на ранее «брошенные» j-е зерна выполняется, то повторяется цикл генерирования координат и контроля. Концом цикла является невыполнение условия (3.27). Если за заданное число циклов координаты зерна подобрать не удалось, то процесс прерывается. Предельное число циклов для одного зерна устанавливается в настройках системы и по умолчанию равно 100.

Определение значений переменных, входящих в неравенство (3.27), производится методами аналитической геометрии. Расстояние между центрами j-го и i-го зерен определяется уравнением:

$$\Delta_{ji} = \left(x_{ц(j)} - x_{ц(i)}\right)^2 + \left(y_{ц(j)} - y_{ц(i)}\right)^2 + \left(z_{ц(j)} - z_{ц(i)}\right)^2, \tag{3.28}$$

где $x_{ц(j)}$, $y_{ц(j)}$, $z_{ц(j)}$, $x_{ц(i)}$, $y_{ц(i)}$, $z_{ц(i)}$ – пространственные координаты сравниваемых зерен.

Для определения радиусов j-го и i-го зерен, измеряемых по линии, соединяющей их центры, необходимо определить направляющие косинусы:

$$\cos_{X(j,i)} = \left(x_j - x_i\right) / \Delta_{ji}; \tag{3.29}$$

$$\cos_{Y(j,i)} = \left(y_j - y_i\right) / \Delta_{ji}; \tag{3.30}$$

$$\cos_{Z(j,i)} = \left(z_j - z_i\right) / \Delta_{ji}. \tag{3.31}$$

Тогда радиусы сравниваемых зерен определяются уравнениями:

$$r_j = \sqrt{\left(0{,}5 d_{X(j)} \cos_{X(j,i)}\right)^2 + \left(0{,}5 d_{Y(j)} \cos_{Y(j,i)}\right)^2 + \left(0{,}5 d_{Z(j)} \cos_{Z(j,i)}\right)^2}, \tag{3.32}$$

где $d_{X(j)}$, $d_{Y(j)}$, $d_{Z(j)}$ – размеры j-го зерна по осям X, Y, Z;

$$r_i = \sqrt{\left(0{,}5 d_{X(i)} \cos_{X(j,i)}\right)^2 + \left(0{,}5 d_{Y(i)} \cos_{Y(j,i)}\right)^2 + \left(0{,}5 d_{Z(i)} \cos_{Z(j,i)}\right)^2}, \tag{3.33}$$

где $d_{X(i)}$, $d_{Y(i)}$, $d_{Z(i)}$ – размеры i-го зерна по осям X, Y, Z.

При формировании координат центров зерен для навесок с большим числом зерен продолжительность формирования координат достаточно велика. Причем, с увеличением числа зерен продолжительность формирования координат растет в геометрической прогрессии. Поэтому в системе предусмотрено отключение контроля зерен при решении задач, когда взаимное расположение не имеет принципиального значения, а для получения устойчивых статистик необходимо создание больших выборок.

3.3.4. Статистический анализ элементов алмазосодержащего слоя

Определение выборочных статистик сформированной 3D модели алмазосодержащего слоя производится для исследуемых признаков, представленных на рис. 3.16. Вопросы статистического анализа рассмотрены в 3.6.

Визуализация результатов производится с использованием графических возможностей MS Graph (рис. 3.17, 3.18).

При корреляционном анализе исследуемых признаков определяется выборочный коэффициент корреляции. Для проверки гипотезы о независимости двух случайных величин X и Y, имеющих нормальное двумерное распределение, по результатам выборки (x_1, y_1), ..., (x_n, y_n) объемом n коэффициент корреляции определяется по зависимости:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \overline{x}\right)\left(y_i - \overline{y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \overline{x}\right)^2 \sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \overline{y}\right)^2}}, \tag{3.34}$$

где $\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i, \overline{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i$ – выборочные средние.

Значимость коэффициента корреляции оценивается путем сравнения $|r|$ с его критическим значением $r_{m;q}$ при $m = n - 2$, $q = 1 - \frac{\alpha}{2}$, где m – число степеней свободы; q – доверительная вероятность; α – уровень значимости. Если $|r| > r_{m;q}$, то коэффициент корреляции значим.

Использование расчетной зависимости (3.34) требует производить обработку данных в два этапа, вначале определять выборочные средние значения признаков и только потом рассчитывать значение коэффициента корреляции. При обработке больших массивов вычисления целесообразно проводить по алгоритмам, позволяющим получать результат за одно сканирование таблицы исходных данных. Модификация расчетной зависимости (3.34) может быть произведена с учетом преобразования, имеющего следующий вид:

$$\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\overline{x}\right)^2=\sum_{i=1}^{n}x_i^2-n\overline{x}^2, \tag{3.35}$$

Расчетная зависимость для определения выборочного коэффициента корреляции с учетом (3.35) и требований, связанных с автоматизацией вычислений, будет иметь следующий вид:

$$r_{ij}=\frac{n\sum x_i\cdot x_j-\sum x_i\cdot\sum x_j}{\sqrt{n\sum x_i^2-\left(\sum x_i\right)^2}\cdot\sqrt{n\sum x_j^2-\left(\sum x_j\right)^2}}, \tag{3.36}$$

где n – количество элементов в выборке (для рассматриваемого случая – число записей в базе данных алмазосодержащего слоя или количество зерен в навеске); x_i, x_j – два исследуемых признака, для которых вычисляется коэффициент корреляции.

Критические значения коэффициента корреляции для малых выборок n = 1 ... 1000 были взяты из таблиц [23] и на их основе сформирована справочная база данных. Для случая $n > 1000$ было использовано асимптотическое соотношение [23].

Экранные формы с результатами корреляционного анализа представлены на рис. 3.19. Коэффициенты регрессии определяются для всех сочетаний исследуемых признаков. К ним относятся девять характеристик элементов алмазосодержащего слоя: размеры зерен по оси *X* «Dx», *Y* «Dy», *Z* «Dz»; объем зерен «Dv»; отношение среднего размера зерна к максимальному «Dk»; отношение минимального размера зерна к максимальному «Dm»; координаты центров зерен по оси *X* «Xc», *Y* «Yc», *Z* «Zc»

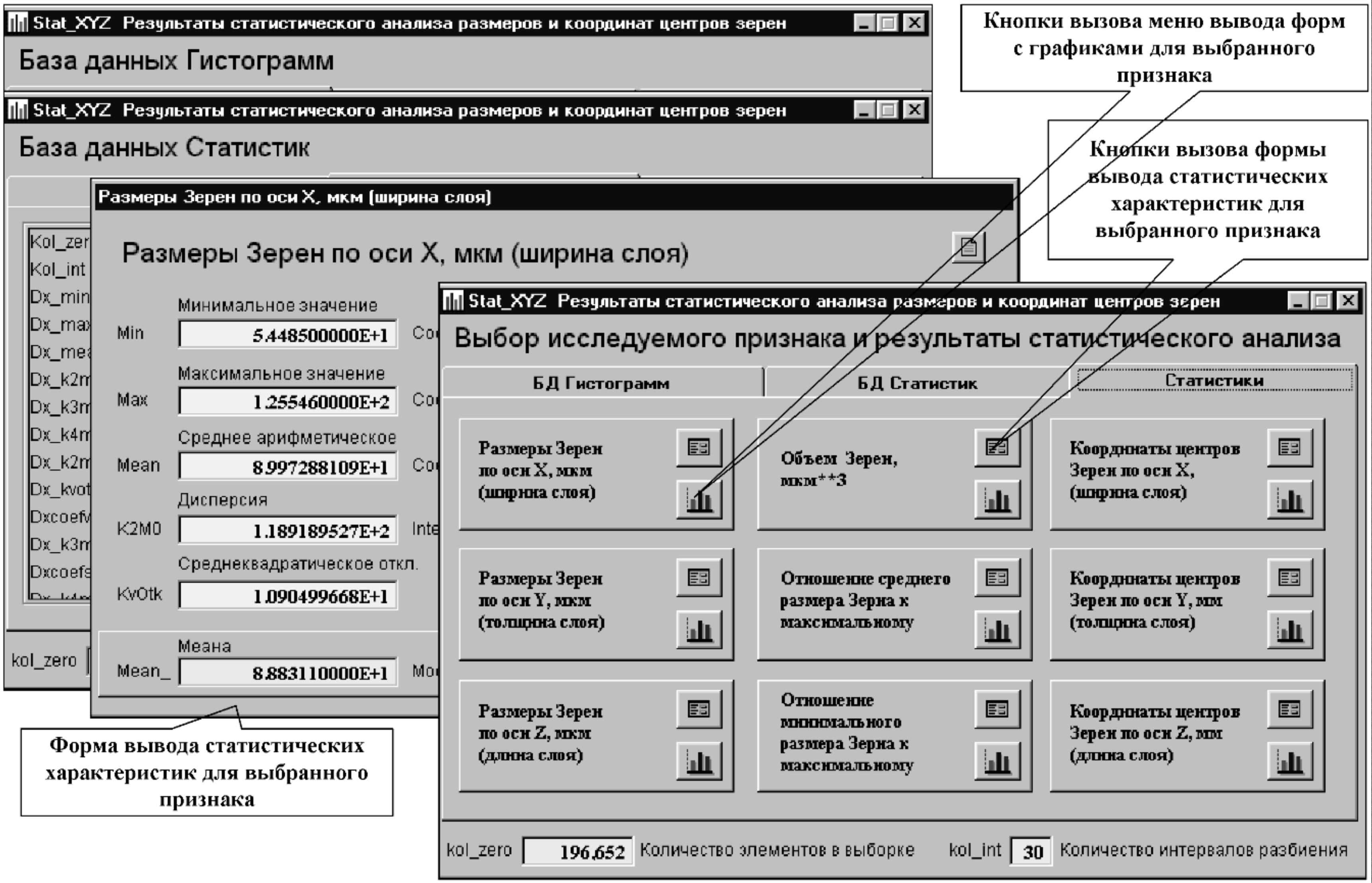


Рисунок 3.16 – Результаты статистического анализа алмазосодержащего слоя

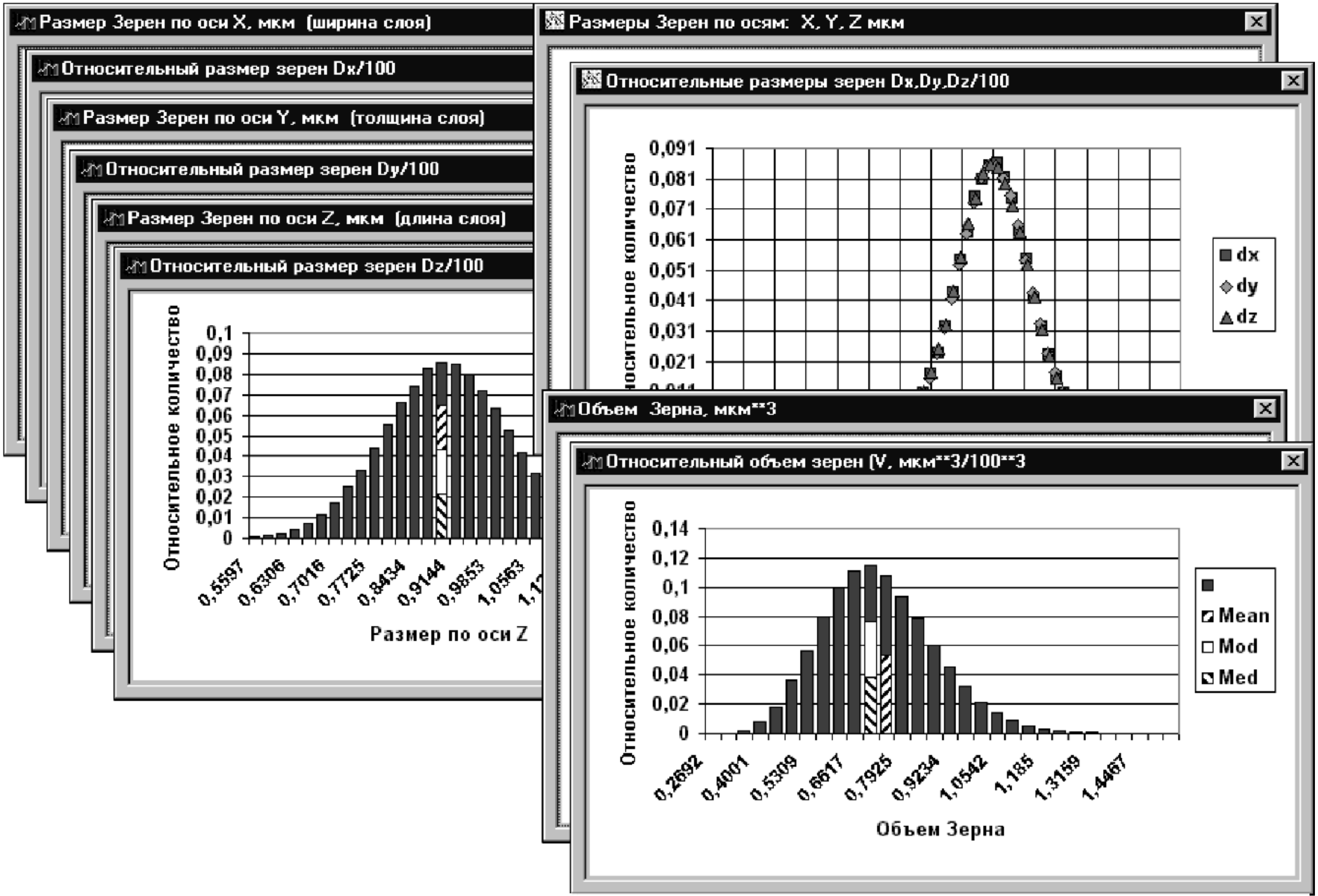


Рисунок 3.17 – Формы с графиками распределения размеров зерен по осям X, Y, Z и объемов зерен

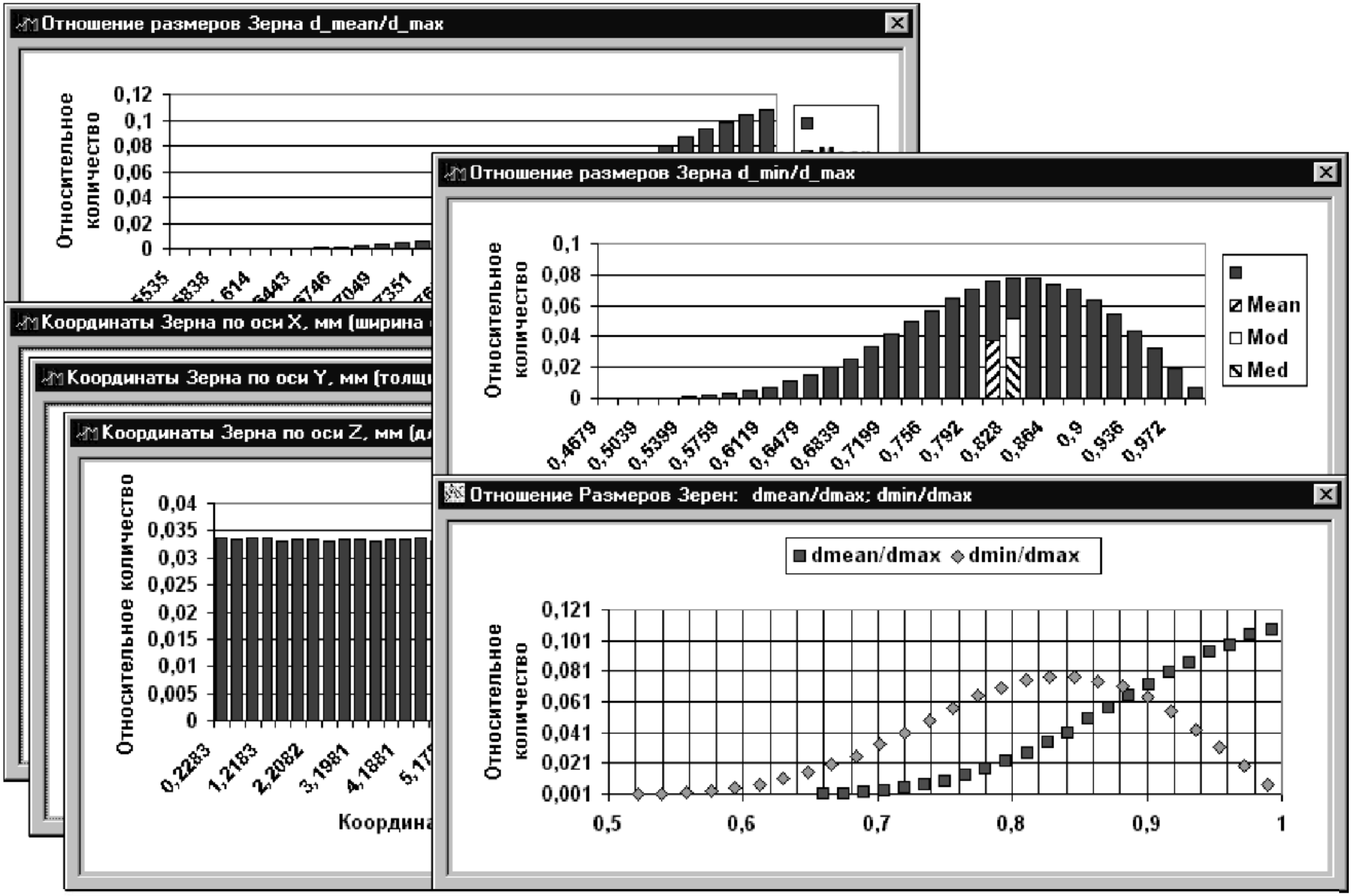
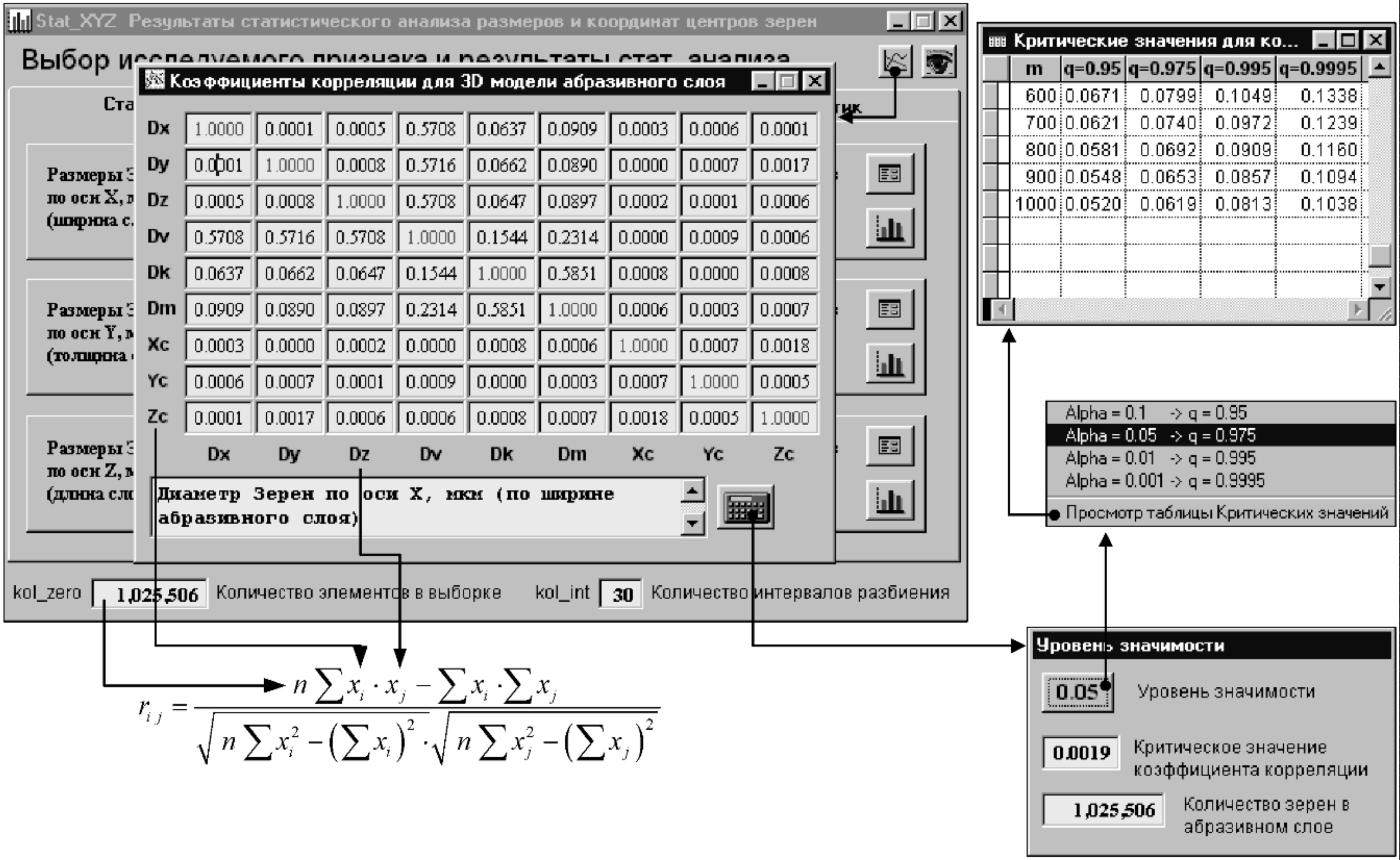


Рисунок 3.18 – Формы с графиками распределения координат центров зерен по осям X, Y, Z и соотношений размеров зерен



$$r_{ij} = \frac{n\sum x_i \cdot x_j - \sum x_i \cdot \sum x_j}{\sqrt{n\sum x_i^2 - \left(\sum x_i\right)^2} \cdot \sqrt{n\sum x_j^2 - \left(\sum x_j\right)^2}}$$

Рисунок 3.19 – Корреляционный анализ элементов 3D модели алмазосодержащего слоя

3.4. Формирование 3D модели рабочей поверхности кругов

Формирование 3D рабочей поверхности включает следующие этапы:

– установка основных параметров (рис. 3.20);

Рис. 3.20 – Форма 3D модели рабочей поверхности круга

– задание поверхности связки как $Y_{c(x,\,z)} = Y_{c(0)} + f_X(x) + f_Z(z)$, где $Y_{c(0)}$ – базовый уровень связки относительно исходной наружной поверхности алмазосодержащего слоя, $f_X(x)$ – поперечный профиль связки; $f_Z(z)$ – продольный (рис. 3.21);

– задание условия нахождения (удержания) зерна в составе рабочей поверхности – коэффициент относительной критической заделки зерен в связке (см. рис. 3.20). Зерно удерживается связкой и входит в состав рабочей поверхности или «выпадает», тогда вместо него находится лунка.

– задание границ 3D модели рабочей поверхности в системе координат алмазосодержащего слоя (см. рис. 3.20);

– формирование базы данных 3D модели рабочей поверхности по исходным данным базы данных 3D модели алмазосодержащего слоя в соответствии с заданными параметрами (см. рис. 3.20), (рис. 3.22).

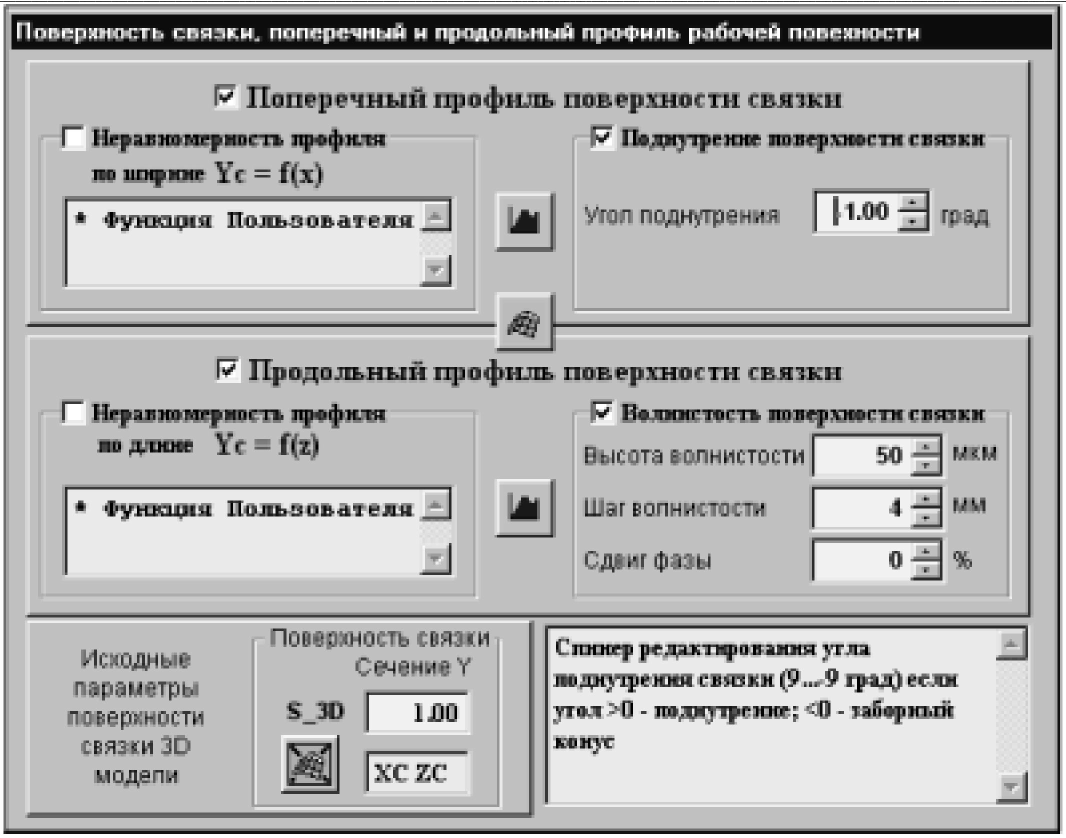


Рисунок 3.21 – Форма установки параметров уровня связки

Рисунок 3.22 – Форма базы данных 3D модели рабочей поверхности круга

Переход от модели алмазосодержащего слоя к 3D модели в условиях наличия заданной неравномерности поверхности связки по ширине и длине рабочей поверхности шлифовального круга нуждается в более детальном рассмотрении.

В качестве исходной используется таблица базы данных (рис. 3.23, 3.24) для текущего варианта алмазосодержащего слоя, имеющая шесть полей: DxN, DyN, DzN, X_N, Y_N, Z_N; где DxN, DyN, DzN – размеры трехосного эллипсоида; X_N, Y_N, Z_N – координаты центров эллипсоида по осям *X*, *Y*, *Z*.

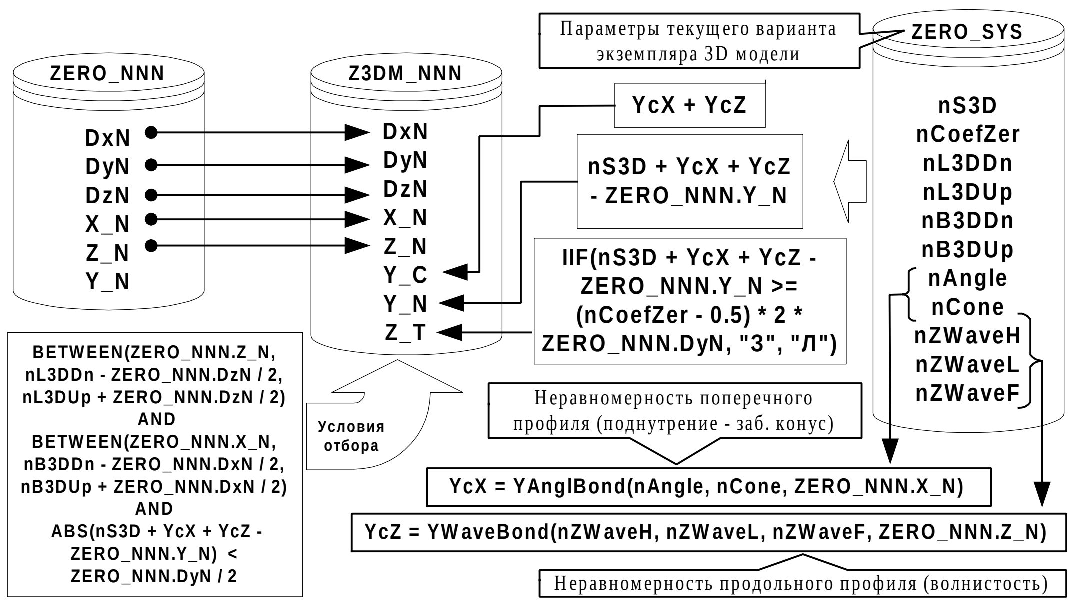


Рисунок 3.23 – Схема перехода от 3D модели алмазосодержащего слоя (ZERO_NNN) к 3D модели рабочей поверхности (Z3DM_NNN)

Для хранения данных применены компрессионные поля типа Integer (целочисленное поле размером 4 байта, позволяющее сохранять числа в диапазоне –2147483647 ... 2147483647). Использование полей типа Integer требует существенно меньшего количества дискового пространства для сохранения данных, чем другие типы полей. Согласование реальных размеров зерен и координат их центров производилось путем введения коэффициентов: nCoefZero = 1000 – перевод значений размеров зерен (мкм) в целые значения для поля Integer; nCoefCoord = 100000 – перевод значений координат зерен (мм). Тогда для полей типа Numeric: максимальное значение для размеров зерен (по ГОСТ) – 3000000 (8 байт) мкм; максимальное значение для координат центров зерен – 2147483647 (11 байт) мм. При этом одна запись для полей Numeric имеет длину – 3 (8+11) = 57 байт, а для Integer – 6 · 4 = 24. Таким образом, переход к полям типа Integer обеспечивает экономию дискового пространства более чем в два раза. Это имеет особую важность при решении задач 3D моделирования алмазосодержащего слоя и рабочей поверхности, требующих обеспечения возможности сохранения и манипуляции большими наборами данных – 10^5–10^8 шт. зерен в навеске, что соответствует числу записей в таблицах баз данных.

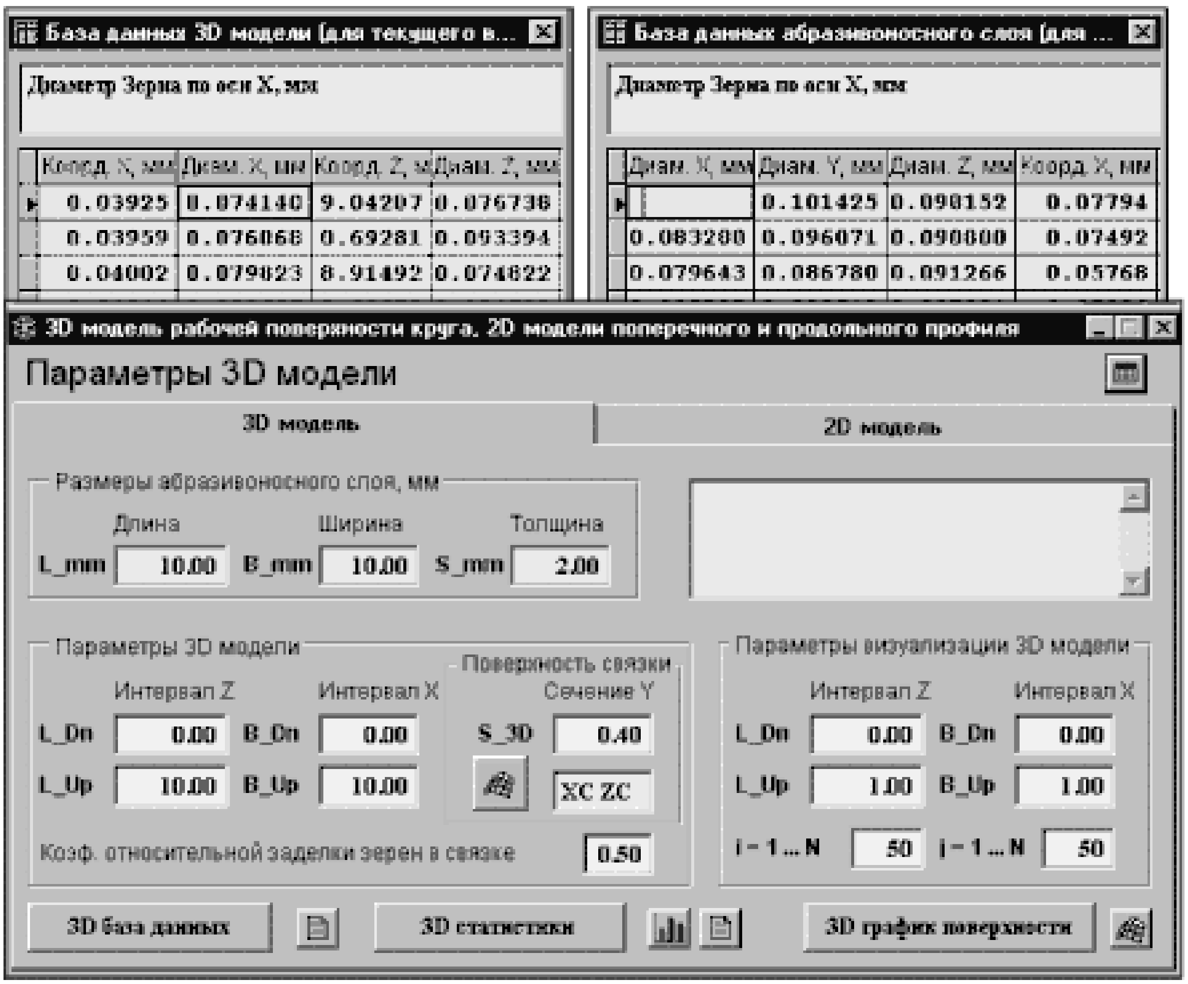


Рисунок 3.24 – Базы данных и форма 3D модели рабочей поверхности шлифовальных кругов

При переходе от полей типа Integer к натуральным размерам использовались следующие дополнительные коэффициенты:

nCoefCoord_ = 1 / nCoefCoord;
nCoefZero_ = 1 / CoefZero/1000;
nCoefRadius_ = nCoefZero_ / 2.

Поверхность связки в общем виде определяется аддитивным соотношением (см. рис. 3.23), (рис. 3.25):

$$Yc = nS3D – YcX – YcZ, \quad (3.37)$$

где nS3D – исходный уровень поверхности связки по оси *Y* (по глубине алмазосодержащего слоя); YcX, YcZ – неравномерность поперечного (по оси *X*) и продольного (по оси *Z*) профилей поверхности связки.

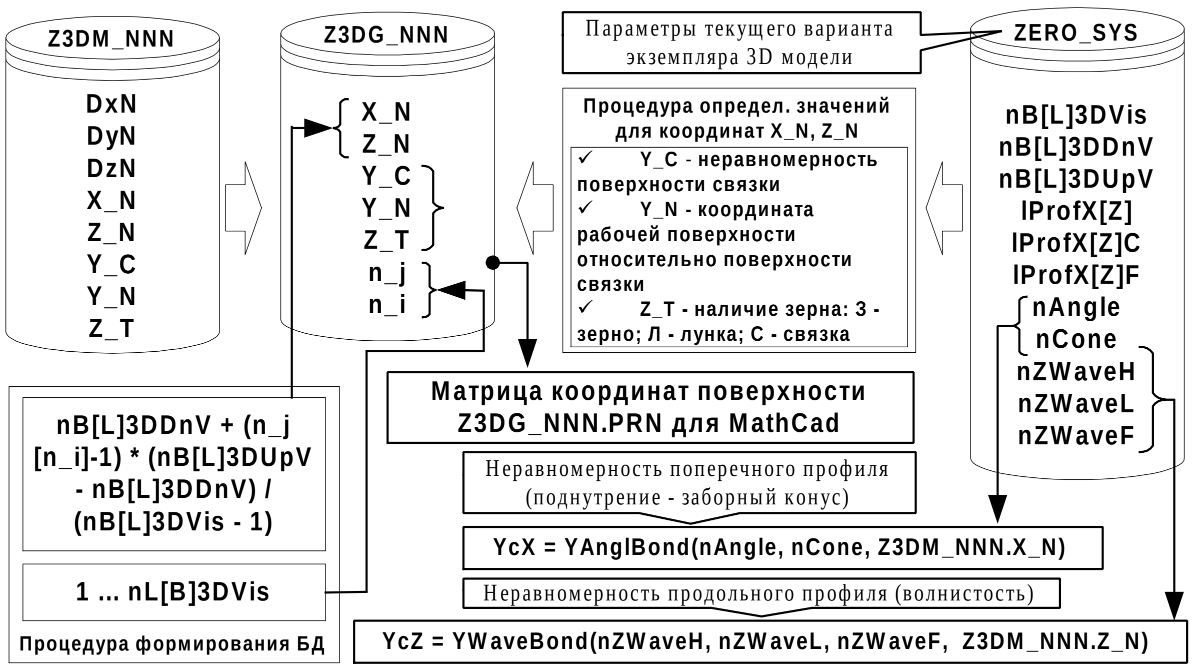


Рисунок 3.25 – Схема перехода от 3D модели рабочей поверхности (Z3DM_NNN) к координатам поверхности (Z3DG_NNN)

Основные параметры 3D модели рабочей поверхности (рис. 3.26): nL3DDn, nL3DUp – координаты начала и конца интервала по оси *Z* (по длине алмазосодержащего слоя); nB3DDn, nB3DUp – координаты начала и конца интервала по оси *X* (по ширине алмазосодержащего слоя); nS3D – исходный уровень поверхности связки по оси *Y* (по глубине алмазосодержащего слоя); nCoefZer – коэффициент относительной критической заделки зерен в связке (отношение величины заделки к размеру зерна по оси *Y*, при котором зерно удерживается в связке), диапазон значений 0,001 ... 0,999.

Дополнительные параметры неравномерности поверхности связки (рис. 3.26, 3.27):

– поперечный профиль: lProfX – логический переключатель учета поперечного профиля связки в 3D модели рабочей поверхности круга; lProfXC – логический переключатель задания неравномерности поперечного профиля связки кусочно-линейной функцией поднутрения Yc = nS3D + YAnglBond (nAngle, nCone, nX), где nAngle – угол поднутрения связки (9 ... –9), град; nCone (nConeInteg = nCone * nCoefCoord) – длина участка поднутрения связки, мм (nAngle > 0) или заборного конуса (nAngle < 0); Nx – координата *X* в системе координат алмазосодержащего слоя (по ширине); lProfXF – логический переключатель задания неравномерности поперечного профиля связки редактируемой функцией пользователя YcX = YUserBond (nX); cYUserBond – текст программного кода функции пользователя для задания специального поперечного профиля связки;

– продольный профиль: lProfZ – логический переключатель учета продольного профиля связки в 3D модели рабочей поверхности круга; lProfZC – логический переключатель задания неравномерности продольного профиля связки гармонической функцией волнистости YcZ = YWaveBond(nZWaveH, nZWaveL, nZWaveF, nZ), где nZWaveH (nZWaveHInteg = nZWaveH / 1000 * nCoefCoord) – высота волнистости (0 ... 9999), мкм; nZWaveL (nZWaveLInteg = nZWaveL * nCoefCoord) – шаг волнистости (0...9999), мм; nZWaveF – сдвиг фазы волнистости ±(0...100), %; nZ – координата *Z* в системе координат алмазосодержащего слоя (по длине); lProfZF – логический переключатель задания неравномерности продольного профиля связки, редактируемой функцией пользователя YcZ = YUserWave (nZ); cYUserWave – текст программного кода функции пользователя для задания специального продольного профиля связки.

Формирование экземпляра (для текущего варианта) 3D модели рабочей поверхности круга производилось с использованием команды SELECT языка структурированных запросов SQL (Structured Query Language) в среде объектно-ориентированного управления базами данных Visual FoxPro. Одна SELECT-SQL команда позволяет заменить группу команд FoxPro.

Структура команды SELECT-SQL в упрощенном варианте (применительно к решению рассматриваемой задачи) имеет следующий вид:

```
SELECT
      <искомый_элемент> AS
<имя_поля_результата>]

..........................................
      <искомый_элемент> AS
<имя_поля_результата>]
   FROM <таблица_базы_данных_источника_данных>
   INTO TABLE <таблица_базы_данных_результатов>
   WHERE <условие_фильтрации_записей_источника>
   ORDER BY <элементы_упорядочения_результатов>
```

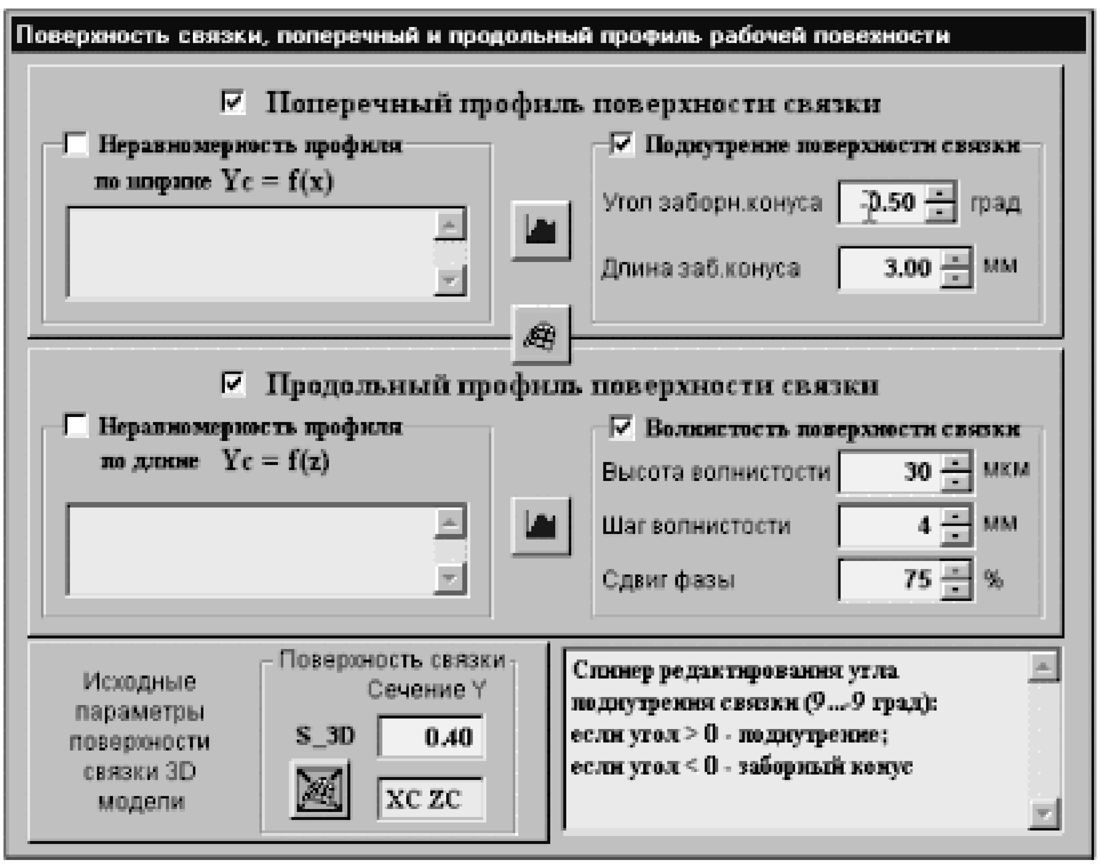


Рисунок 3.26 – Форма регулирования параметров поверхности связки

Структура результирующей таблицы базы данных Z3DM_NNN (см. рис. 3.24), имеющей 8 полей: DxN, DyN, DzN, X_N, Z_N, Y_C, Y_N, Z_N; где DxN, DyN, DzN – размеры трехосного эллипсоида; X_N, Z_N – координаты центров эллипсоида по осям *X*, *Z*, *Y*;_C – координата *Y* уровня связки, соответствующая центру зерна в системе координат 3D модели; Y_N – координаты *Y* центров зерен в системе координат 3D модели (относительно поверхности связки: [+] – выше поверхности связки; [–] – ниже); Z_N – наличие зерна на поверхности связки 3D модели («З» – зерно; «Л» – лунка на поверхности связки от выпавшего зерна).

Визуализация продольного и поперечного профиля связки (рис. 3.27) производится с использованием встроенных в формы Visual FoxPro графиков Microsoft Graph. Схема перехода от 3D модели рабочей поверхности (Z3DM_NNN) к 2D моделям поперечного (Z2XM_NNN) и продольного (Z2ZM_NNN) профилей представлена на рис 3.28. Схема перехода от 2D моделей профиля (Z2X[Z]M_NNN) к базам данных графиков (Z2X[Z]G_NNN) – рис. 3.29.

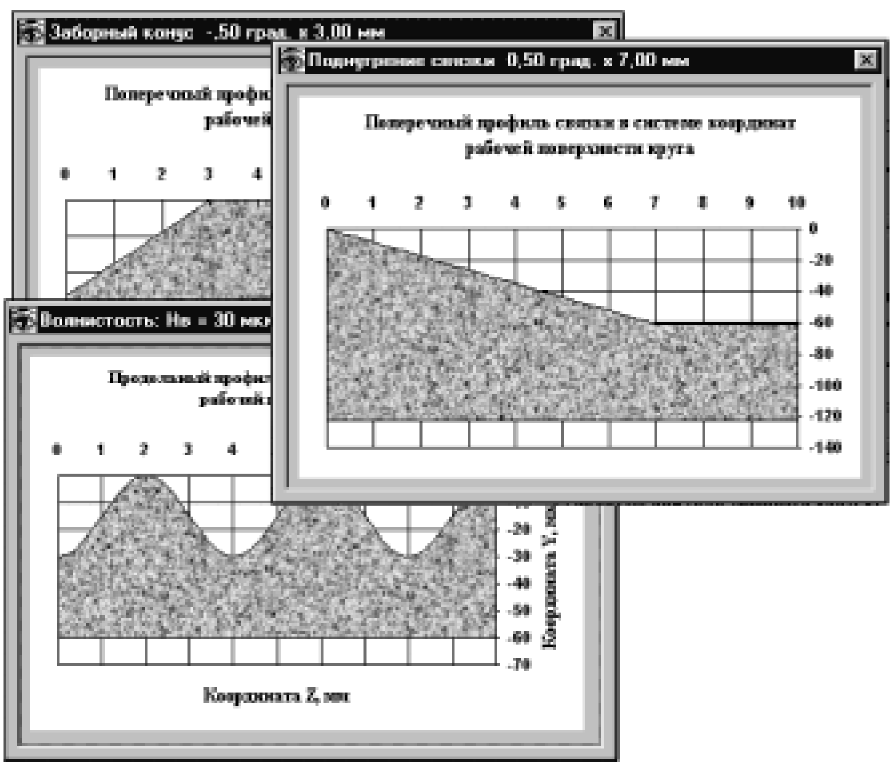


Рисунок 3.27 – Примеры визуализации поперечного и продольного профиля связки шлифовального круга

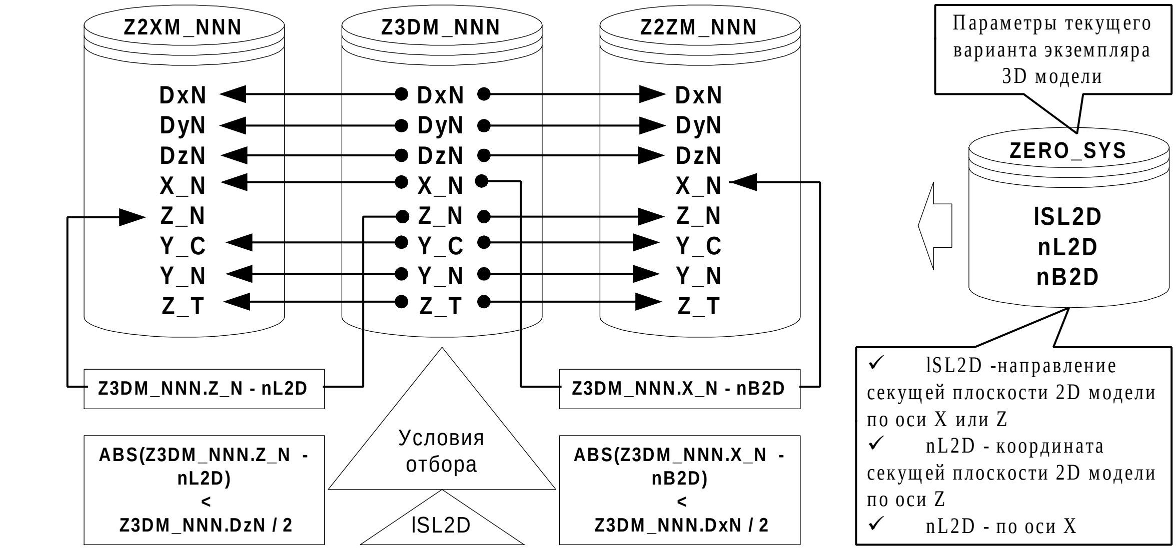


Рисунок 3.28 – Схема перехода от 3D модели рабочей поверхности (Z3DM_NNN) к 2D моделям поперечного (Z2XM_NNN) и продольного (Z2ZM_NNN) профилей

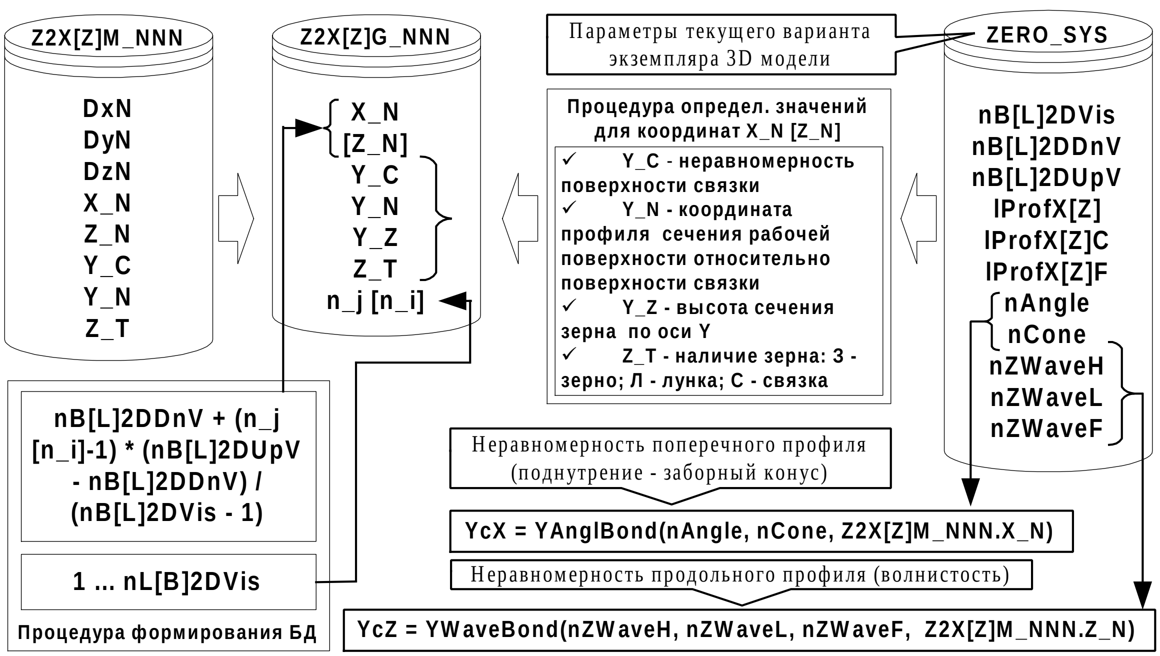


Рисунок 3.29 – Схема перехода от 2D модели профиля (Z2X[Z]M_NNN) к базам данных графиков (Z2X[Z]G_NNN)

Формирование 2D моделей поперечного и продольного профиля включает следующие этапы:

– задание направления профиля («поперечный» – по ширине рабочей поверхности; «продольный» – по длине (рис. 3.30);

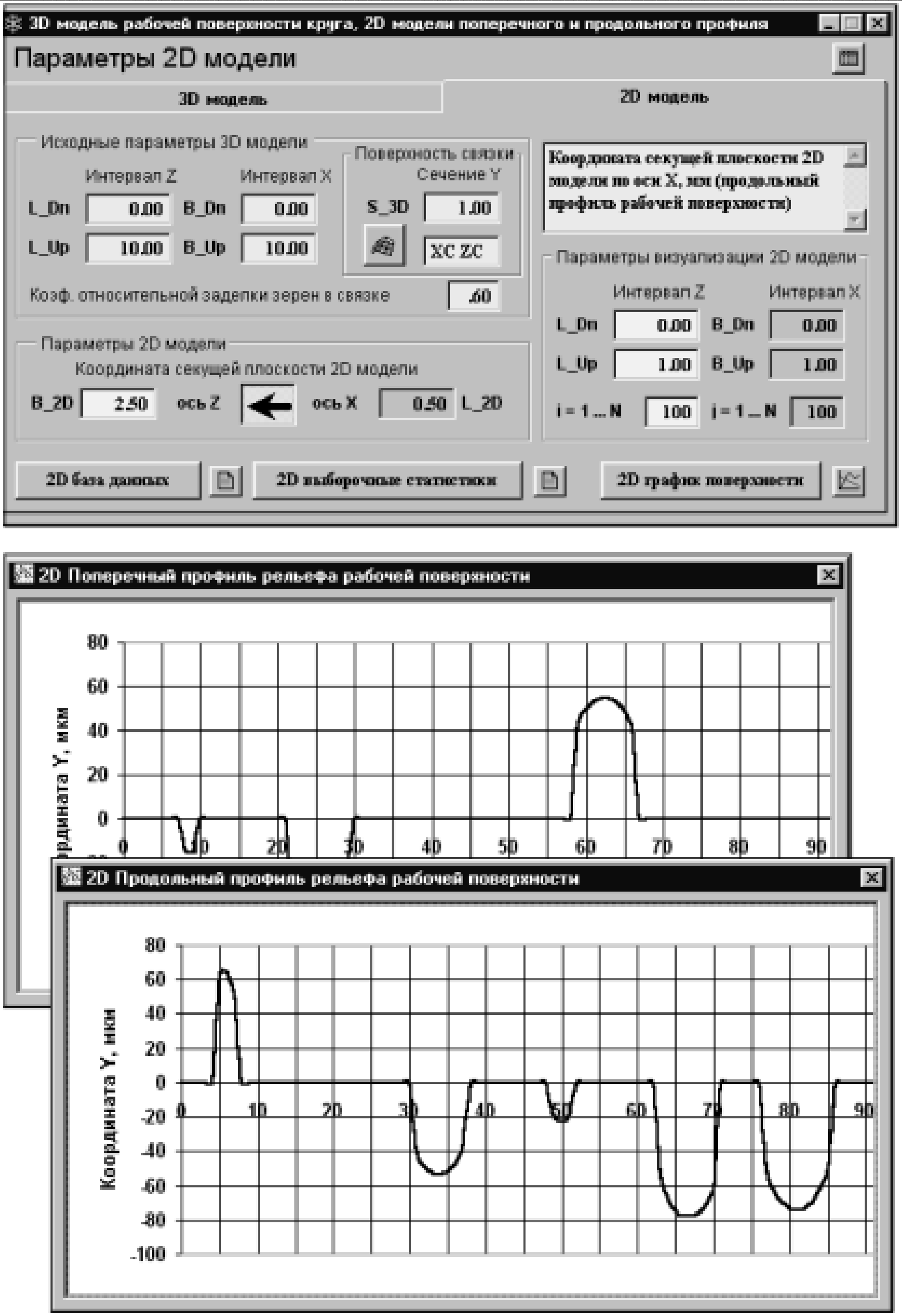


Рисунок 3.30 – 2D модели поперечного и продольного профилей рабочей поверхности

– формирование 2D поперечного профиля (см. рис. 3.30): задание расположения поперечного сечения профиля по длине рабочей поверхности (координата *Z*); задание границ модели; формирование базы данных 2D модели поперечного профиля рабочей поверхности по исходным данным базы данных 3D модели рабочей поверхности в соответствии с заданными параметрами;

– формирование 2D модели продольного профиля (см. рис. 3.30): задание расположения продольного сечения профиля по ширине рабочей поверхности (координата *X*); задание границ модели; формирование базы данных 2D модели продольного профиля рабочей поверхности по исходным данным базы данных 3D модели рабочей поверхности в соответствии с заданными параметрами.

Визуализация 3D рабочей поверхности кругов (рис. 3.31) обеспечивается графиками математического пакета MathCad или Microsoft Graph. Схема перехода от 3D модели рабочей поверхности (Z3DM_NNN) к координатам поверхности (Z3DG_NNN) приведена на рис. 3.25.

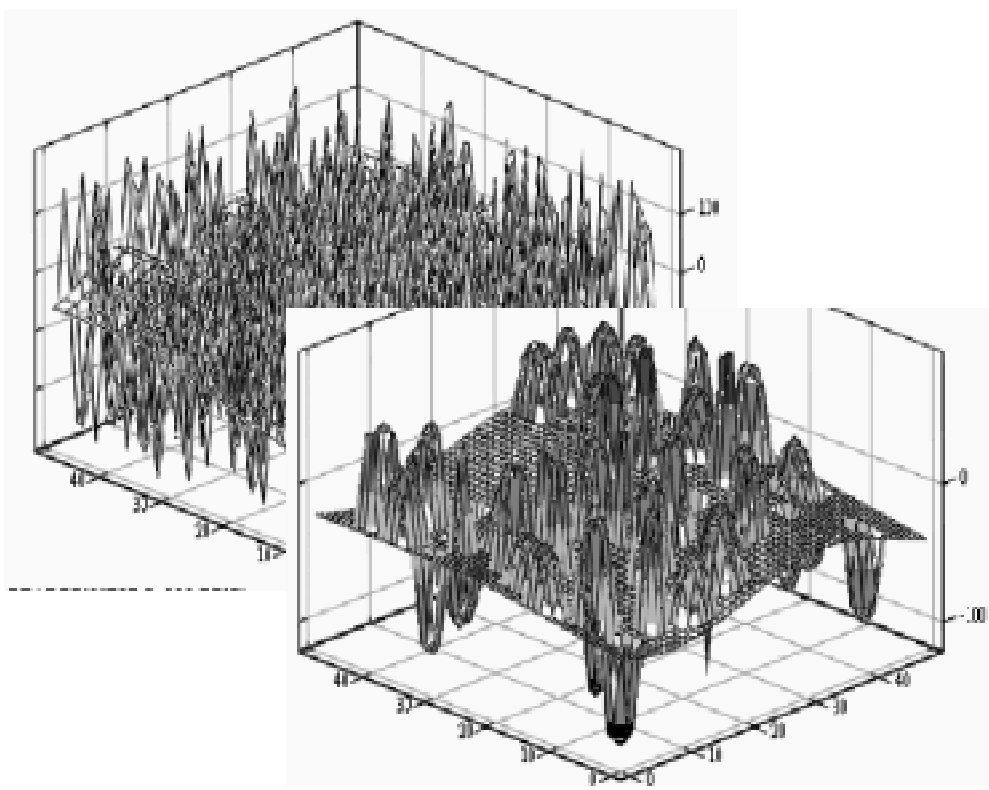


Рисунок 3.31 – Примеры визуализации рабочей поверхности круга

3.5. Визуализация результатов 3D моделирования алмазно-абразивных инструментов

Вопросы визуализации результатов моделирования имеют принципиальное значение. Достаточно проработанная методология визуализации данных необходима как на этапе разработки системы моделирования, так и при ее использовании. Принятие объективных решений при анализе результатов модельных исследований затруднительно, а порою и просто невозможно без наглядной визуализации данных и результатов. Поэтому практически все современные статистические пакеты обеспечивают достаточно широкий набор средств визуализации данных: построение графиков различных типов, двух- и трехмерных диаграмм. Все это помогает лучше представить исходные и результирующие данные, получить общее представление об их особенностях и закономерностях.

Рассмотрим вопрос использования системы построения графиков Microsoft Graph, являющейся компонентом широко распространенного пакета Microsoft Office при разработке 3D модели абразивоносного слоя и рабочей поверхности шлифовальных кругов в объектно-ориентированной среде управления базами данных Microsoft Visual FoxPro.

Начиная с 6-й версии Visual FoxPro, фирма Microsoft радикально усовершенствовала поддержку модели COM. Аббревиатура COM расшифровывается как Component Objects Model – модель объектных компонентов. Это стандарт Microsoft, регламентирующий обмен информацией между приложениями. COM представляет собой стандарт, регламентирующий взаимодействие между объектами. Стандартизация распространяется на передачу и прием сообщений, что позволяет объектам, построенным различными языковыми средствами, взаимодействовать друг с другом таким образом, как в случае, если бы они были написаны на одном и том же языке программирования. Основная идея стандарта COM состоит в том, что любой COM-объект может взаимодействовать с другим COM-объектом независимо от того, разработан ли он в Visual FoxPro, Visual Basic или Visual C++.

Система построения и визуализации графиков Microsoft Graph разработана с учетом требований модели COM и предоставляет множество своих функций приложениям-клиентам, которые могут с ним взаимодействовать.

Теперь в приложении-клиенте (в рассматриваемом случае 3D модели алмазно-абразивного инструмента) необходимо разрабатывать только пользовательский интерфейс и специализированные функции, специфичные для данной предметной области, а за остальными функциями обращаться непосредственно к MS Graph. На основе MS Graph можно построить множество специализированных графиков и диаграмм.

Для взаимодействия Visual FoxPro с MS Graph используются инструменты связывания и внедрения объектов (Object Linking and Embedding – OLE). OLE – это способ обмена информацией между приложениями, соответствующими стандарту COM. С помощью OLE одно приложение-клиент может вызывать инструменты другого приложения-сервера согласно некоторому стандарту пересылки / получения сообщений и совместного использования данных. Данные или объект могут располагаться как внутри документа (внедрение), который их использует, так и вне него (связывание). При связывании в составе документа сохраняется только указатель на внешние данные или объект, а при внедрении – все данные или объект целиком. Информация о типе данных или объекта сохраняется в файле регистрации вместе с информацией о том, каким приложением можно редактировать или просматривать эти данные или документ, размещенные в приложении-контейнере. В последних версиях OLE-стандарта предусматривается автоматическое размещение в приложениях-контейнерах соответствующих команд меню и панелей OLE-инструментов. В Visual FoxPro можно создавать приложения-контейнеры для OLE-объектов на основе двух типов элементов управления: поля общего назначения (OLE Bound Control) для связанных OLE-объектов и поля OLE-контейнера (OLE Container Control) для несвязанных OLE-объектов.

На основе элементов управления типа OLE можно создавать классы и подклассы, устанавливая свойства, методы и код обработки событий. Обычно OLE-объекты добавляются в формы для управления некоторыми объектами или создания каких-либо инструментов, а размещаются в полях типа General таблиц Visual FoxPro.

На рис. 3.32 представлена структурная схема формы Visual FoxPro для визуализации данных с использованием MS Graph. Представленная форма является дочерним объектом родительского класса Graph_NN.vsx, разработанного применительно к решению данного класса задач визуализации, и построена на базе базового класса Visual FoxPro – Form. Рассмотрим основные изменения и дополнения, внесенные в класс Graph_NN.vsx (см. рис. 3.32) для обеспечения требуемых функциональных возможностей:

– дополнительные объекты: Txt_Grapht (базовый класс TextBox); OleBoundControl1 (базовый класс OleBoundControl);

– добавленные свойства формы: c_Graph_Dbf – имя ТБ с образом графика; c_Path – маршрут к системе; c_Path_Tmp – маршрут к временным файлам; c_Path_Work – маршрут к рабочим файлам; n_Row_Graph – номер записи в таблице c_Graph_Dbf;

– добавленные методы: m_Graph_Size – установка соотношений размеров формы с размерами дополнительных объектов (служебный программный код – находится только в родительском классе); m_Graph_Data – подготовка данных для графика и присвоение значения глобальной переменной cData для передачи в MS Graph (программный код, находящийся в каждой дочерней форме и учитывающий индивидуальные особенности подготовки данных к конкретному графику или группе графиков).

Особенностью взаимодействия приложений с MS Graph является необходимость передачи данных в виде единой символьной переменной. Для организации рядов данных (по терминологии MS Graph – группа связанных между собой точек, построенных по строкам или столбцам отдельной таблицы данных) в передаваемой символьной переменной необходимо пометить строки и столбцы с помощью специальных главителей. Для этого в разработанном классе форм введены глобальные переменные: TAB = CHR(9) – главение строки на столбцы; CRLF = CHR(13) + CHR(10) – конец строки. Функция CHR(*n*) возвращает символ, у которого код ANSI соответствует числу *n*.

Рассмотрим возможности форм с графиками MS Graph на примерах их использования. На рис. 3.33, 3.34 представлены графики в режиме настройки их свойств. Такой режим выбран для возможности просмотра таблиц данных, которые в режиме обычной работы скрыты от пользователя. Вход в режим редактирования графика средствами MS Graph осуществляется путем двойного нажатия левой клавиши мыши или вызовом контекстного меню при нажатии правой клавиши мыши.

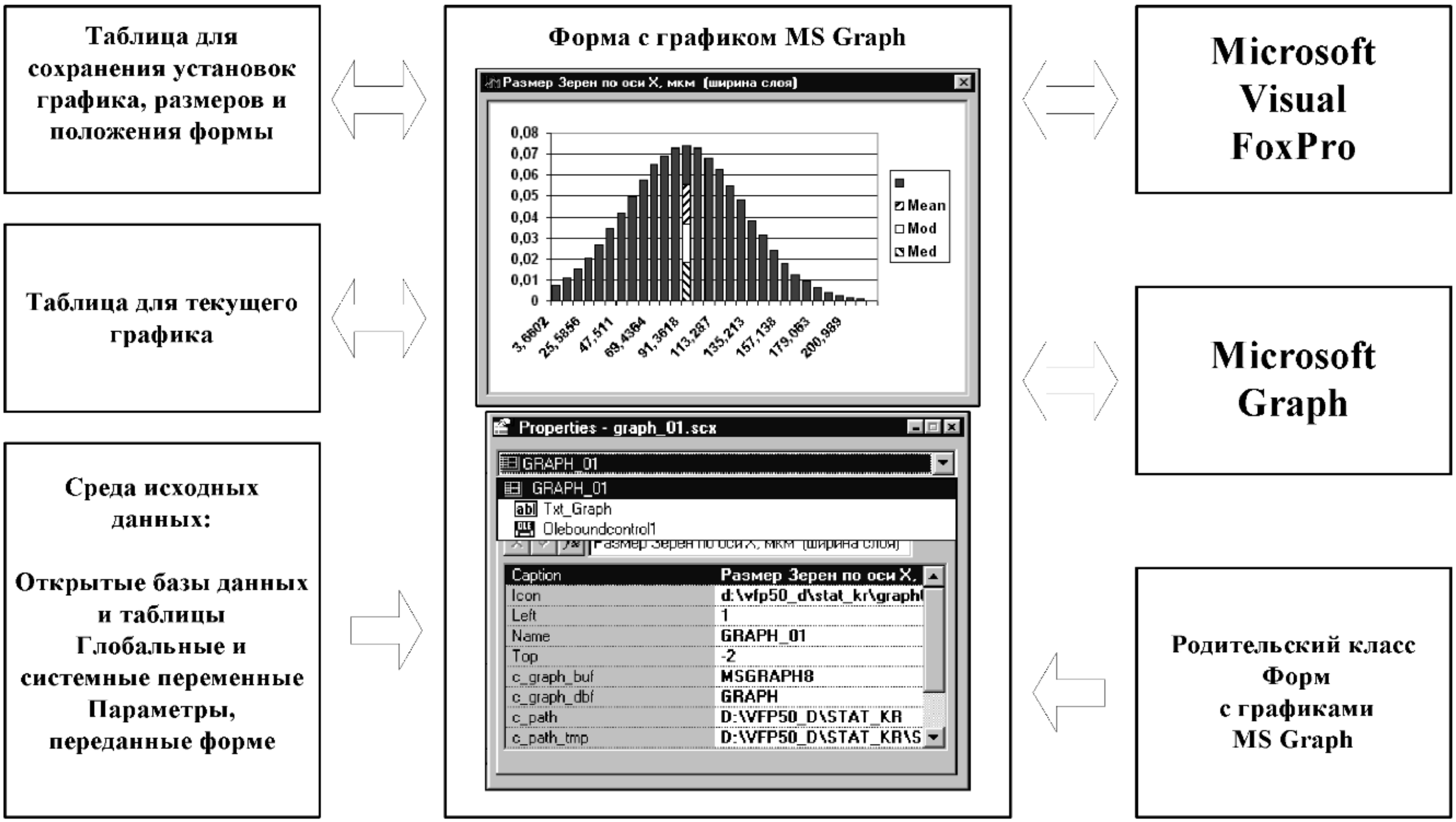


Рисунок 3.32 – Структурная схема формы Visual FoxPro для визуализации данных с использованием MS Graph

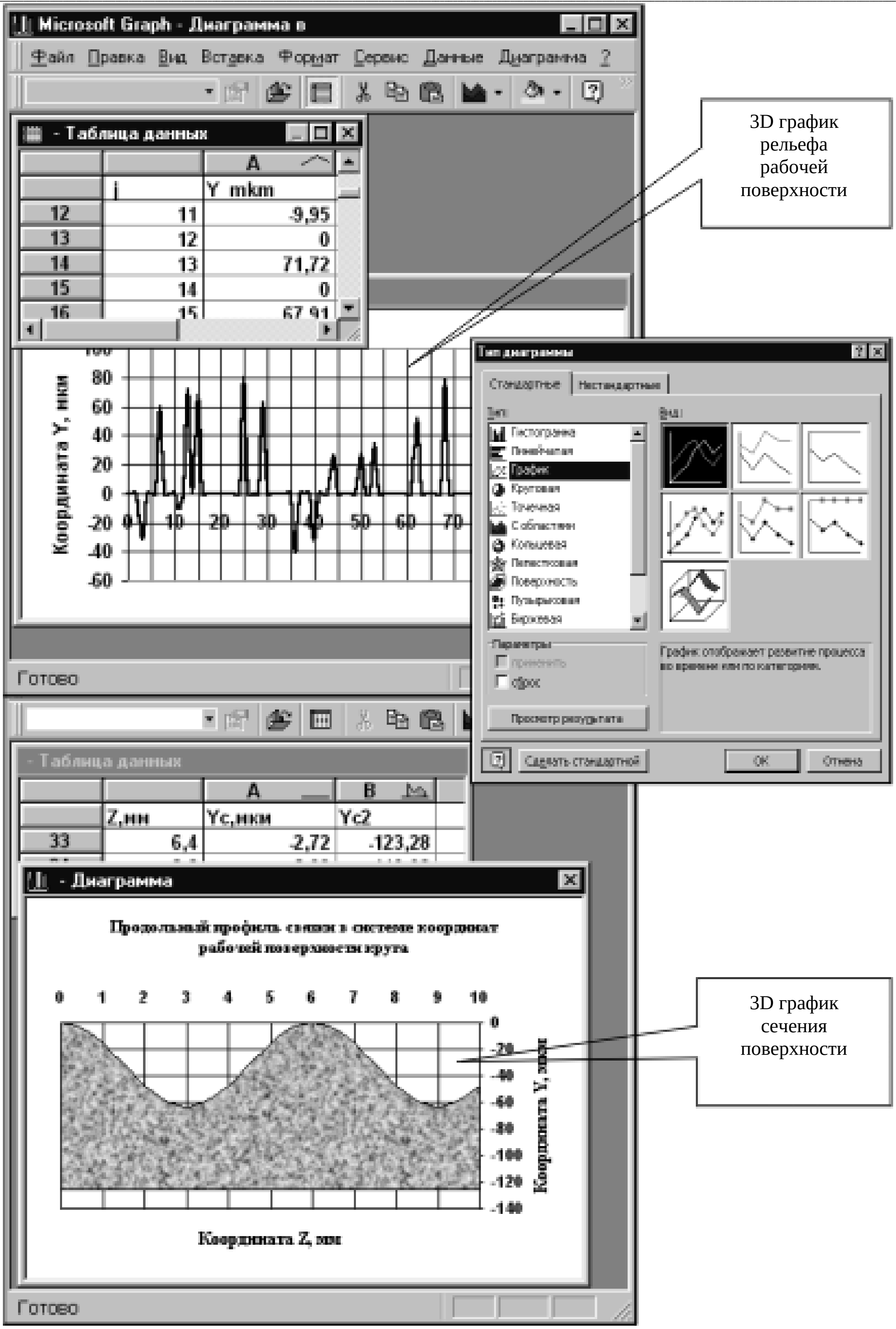


Рисунок 3.33 – Примеры форм с графиками MS Graph

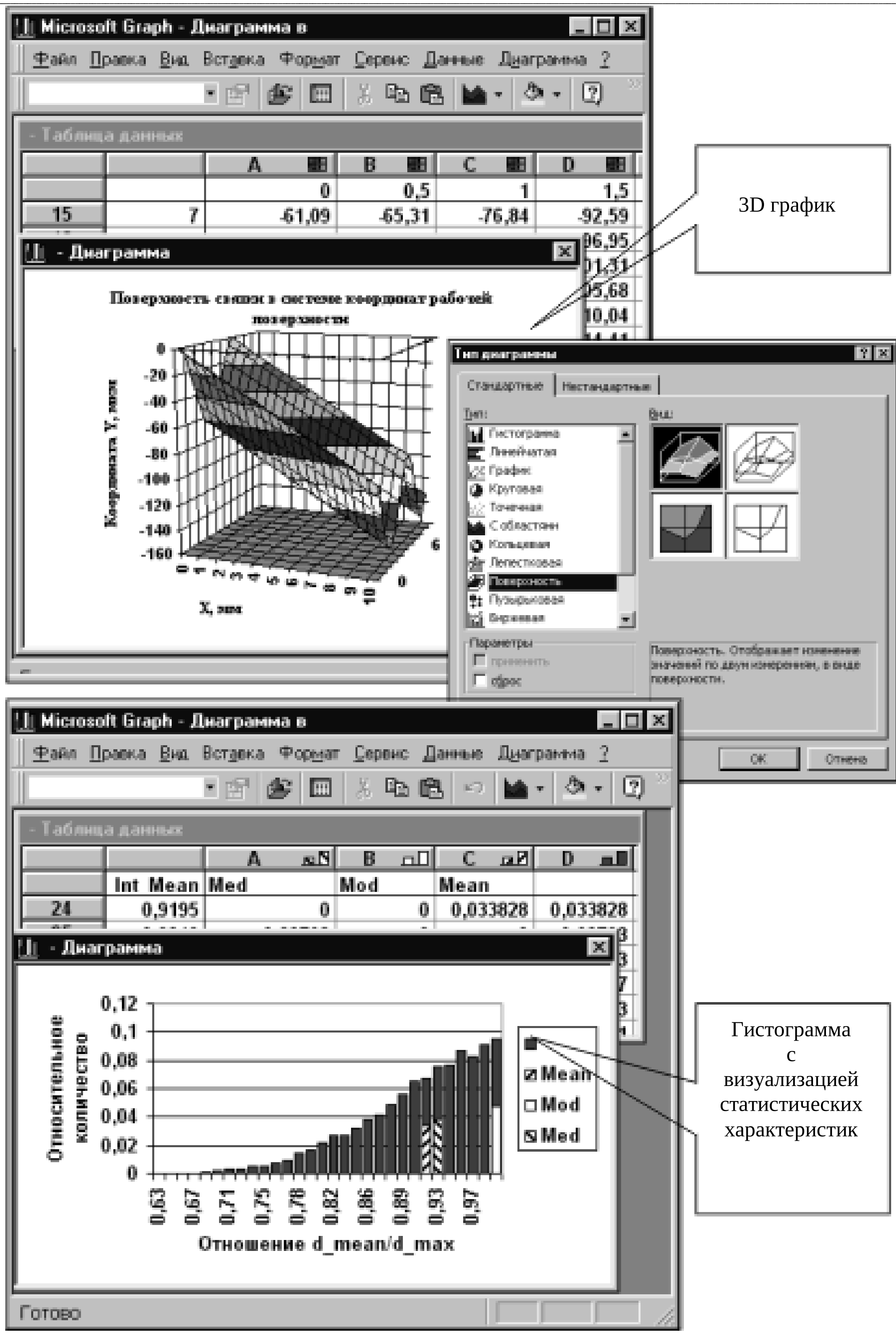


Рисунок 3.34 – Примеры форм с графиками MS Graph

2D график рельефа рабочей поверхности круга (см. рис. 3.33) имеет таблицу данных, состоящую из двух столбцов. Представляет методический интерес 2D график сечения поверхности (см. рис. 3.33), представляющий продольный профиль связки рабочей поверхности круга. Для повышения наглядности он состоит из двух областей, одна из которых прозрачна. 3D график поверхности (см. рис. 3.34) имеет достаточное число настроек MS Graph, что позволяет его эффективно использовать для решения задач визуализации результатов моделирования. Одним из примеров широких возможностей разработанного класса и типовых форм с графиками является гистограмма (см. рис. 3.34) с визуализацией статистических характеристик.

3.6. Статистический анализ законов распределения исследуемых признаков при 3D моделировании алмазно-абразивного инструмента

Основные положения при объектно-ориентированном подходе к 3D моделированию алмазно-абразивных инструментов изложены в 3.1, 3.2. Адекватность при моделировании обеспечивается имитационным контролем зернового состава абразивных порошков из сверхтвердых материалов 3.3.2, позволяющим подбирать и контролировать параметры исходной навески. Вопросы визуализации результатов моделирования рассмотрены в 3.5. *Представляет практический и методический интерес статистическая обработка результатов модельных экспериментов, проводимая в единой среде моделирования – системе программных средств, включающих все необходимые пользователю средства и обеспечивающей единообразное взаимодействие с ними*.

Структурная схема статистического анализа исследуемых признаков представлена на рис. 3.35. *Под исследуемыми признаками понимаются случайные величины, получаемые в результате модельных экспериментов при статистическом моделировании*. Исходными данными являются значения исследуемых признаков, находящиеся в базе данных (БД) ZERO_NNN (алмазосодержащий слой) или Z3DM_NNN (рабочая поверхность), где NNN – номер текущего варианта модели. Статистический анализ проводится в два этапа:

– предварительный анализ всех признаков для получения общих статистических характеристик: БД STAT_NNN (алмазосодержащий слой) или ST3D_NNN (рабочая поверхность) и формирование БД GIST_NNN (алмазосодержащий слой) или GI3D_NNN (рабочая поверхность), где NNN – номер текущего варианта модели;

– анализ законов распределения применительно к заданному отдельному исследуемому признаку.

Формирование базы данных (STAT_NNN) статистических характеристик (выборочных статистик) исследуемых признаков производится следующим образом. Для каждого из исследуемых признаков x_i (i = 1, ..., n) определяются статистики:

$x_{\min}$, $x_{\max}$ – минимальное и максимальное значение;

m_1, m_2, m_3, m_4 – начальные моменты 1, 2, 3, 4-го порядка;

$m_4^{(0)}, m_2^{(0)}, m_3^{(0)}, m_4^{(0)}$ – центральные моменты 2, 3, 4-го порядка;

E – среднее арифметическое ($E = m_1$);

D – дисперсия ($D = m_2^{(0)}$);

s – среднеквадратическое отклонение;

k_v – коэффициент вариации;

β – коэффициент асимметрии;

γ – коэффициент эксцесса;

Δx – значение интервала группирования (при создании гистограмм).

Расчетные зависимости для определения статистик представлены на рис. 3.36. Полученные значения записываются в базу данных (STAT_NNN или ST3D_NNN) статистик текущего варианта экземпляра модели, имеющую одну запись. Определение характеристик центра группирования выборочных значений исследуемого признака по данным гистограмм производится после их формирования.

Формирование базы данных гистограмм (GIST_NNN или GI3D_NNN) выполняется одновременно (при выполнении единой программной процедуры) с определением выборочных статистик. *Более наглядное описание данных достигается путем группирования исследуемого признака в классы*. *Под* *группировкой или классификацией понимается разбиение интервала, содержащего все n значения x_i (x_1, ..., x_n), на N интервалов, которые называются интервалами группировки*.

Выбор числа интервалов N является важным этапом при статистическом анализе исследуемого признака, так как от этого зависит степень наглядности опытных данных при построении графиков распределений. При выборе числа интервалов следует учитывать, что при большом числе интервалов картина распределения искажается случайными выбросами частот, а при малом – характерные особенности распределения усредняются (сглаживаются). Зависимости для приближенной оценки при выборе числа интервалов приведены в [2, 18]:

$$N = \log_2(n) + 1, \tag{3.38}$$

$$N = 1 + 3{,}322\lg n (n \le 100),\ N = 5\lg n (n > 100); \tag{3.39}$$

Расчеты по зависимостям (3.38) [2], (3.39) [18] дают следующие результаты: $n = 10 \Rightarrow N = 4$; $n = 10^2 \Rightarrow N = 8 – 10$; $n = 10^3 \Rightarrow N = 11 – 15$; $n = 10^4 \Rightarrow N = 14 – 20$; $n = 10^5 \Rightarrow N = 18 – 25$; $n = 10^6 \Rightarrow N = 21 – 30$; $n = 10^7 \Rightarrow N = 24 – 35$.

Формирование данных гистограммы для одного исследуемого признака производится в следующем порядке:

– определение предельных значений: $x_{min} = \mathrm{MIN}(x_i)$; $x_{max} = \mathrm{MAX}(x_i)$;

– вычисление величины интервала группировки $\Delta x = (x_{max} – x_{min}) / N$;

– определение начала, середины и конца каждого j-го интервала ($j = 1, ..., N$): $\mathrm{x}_{home(j)} = \mathrm{x}_{min} + \Delta x\cdot(\mathrm{j} – 1)$; $\mathrm{x}_{mean(j)} = \mathrm{x}_{home} + 0{,}5\Delta x$; $\mathrm{x}_{end(j)} = \mathrm{x}_{home} + \Delta x$;

– определение числа значений n_j в каждом j-м интервале группировки, равное количеству x_i ($i = 1, ..., n$), удовлетворяющих условиям: $\mathrm{x}_{home(j)} \le x_i < \mathrm{x}_{end(j)}$ ($x_i < x_{max}$), $j = N(x_i = x_{max})$. При выполнении практических расчетов для определения номера интервала j использовалась следующая зависимость: $j = \mathrm{INT}((x_i - x_{min}) / \Delta x) + 1$ ($x_i < x_{max}$), где INT(z) – функция, возвращающая целую часть z;

– вычисление относительной частоты попаданий наблюдаемой переменной в каждый интервал $p_j = n_j / n$;

– полученные значения $x_{home(j)}$, $x_{mean(j)}$, $x_{end(j)}$, n_j, p_j записываются в базу данных гистограмм текущего варианта экземпляра модели, имеющую число записей, соответствующее заданному количеству интервалов N.

Определение характеристик центра группирования выборочных значений исследуемого признака по данным гистограмм (см. рис. 3.36) *завершает первый этап предварительного статистического анализа. Обычно в качестве таких характеристик используют среднее арифметическое* x_{mean}, *моду* x_{mod} *и медиану* x_{med}. *Необходимость определения этих характеристик диктуется целесообразностью их выделения при визуализации гистограмм. В случае симметричной плотности распределения среднее значение* x_{mean}, *мода* x_{mod} *и медиана* x_{med} *совпадают между собой. Для асимметричных распределений совпадение отсутствует*.

При определении выборочных значений x_{mean}, x_{mod}, x_{med} *задача сводится к определению номера интервала расположения соответствующего признака и присвоения ему значения середины интервала группировки. В таком случае абсолютная погрешность определения* x_{mean}, x_{mod}, x_{med} *будет зависеть от величины интервала* Δx *и не будет превышать половины его величины.*

Выборочное среднее арифметическое x_{mean} с учетом того, что его точное значение E вычислялось ранее, определяется следующим образом:

– определяется номер интервала группировки по условию $x_{home(j)} \le E < x_{end(j)}$:

$$j_{mean} = \mathrm{INT}((E - x_{min}) / \Delta x) + 1; \qquad (3.40)$$

– присваивается значение середины интервала j_{mean}: $x_{mean} = x_j$, где $j = j_{mean}$.

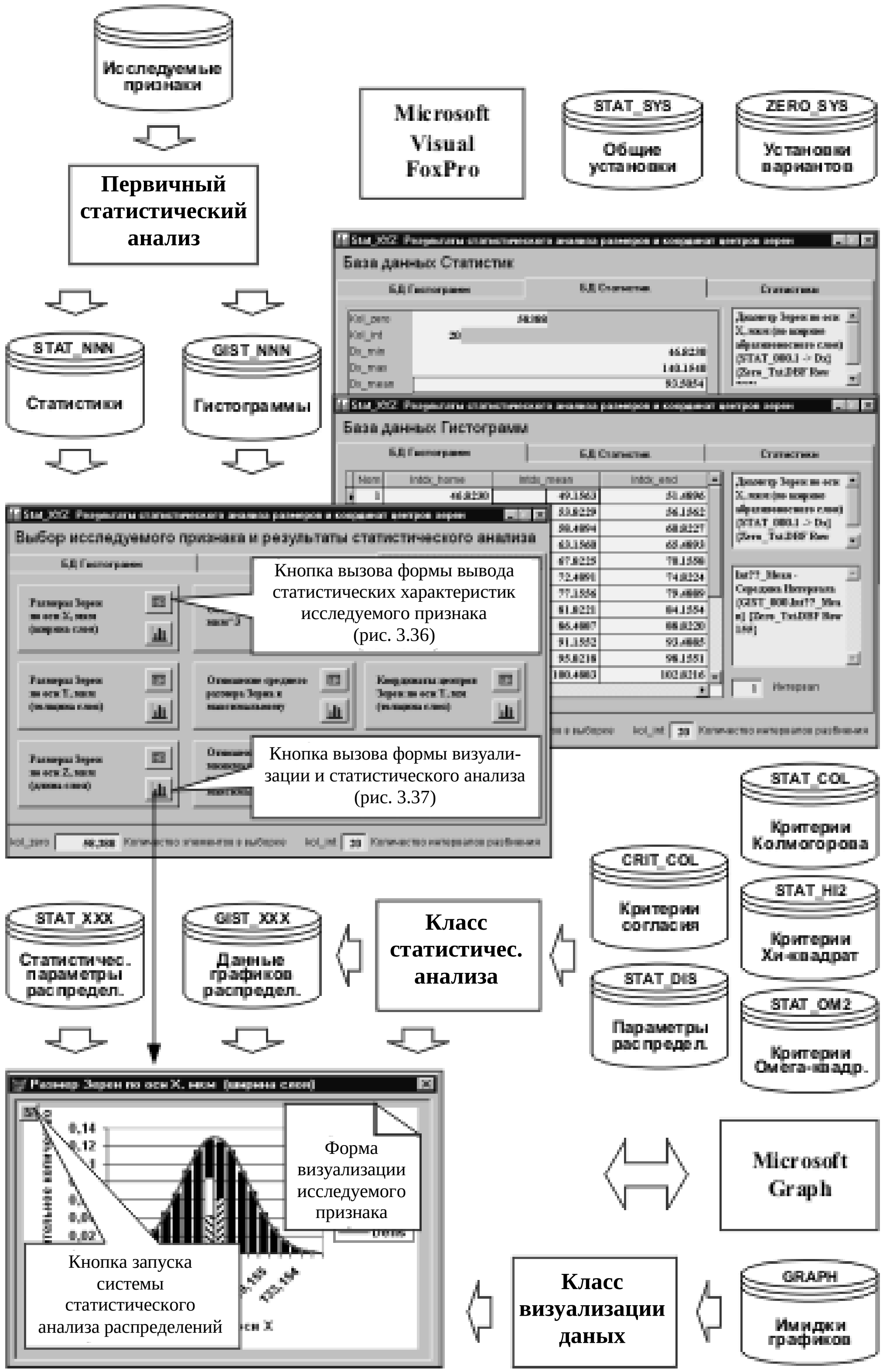


Рисунок 3.35 – Структурная схема статистического анализа исследуемых признаков

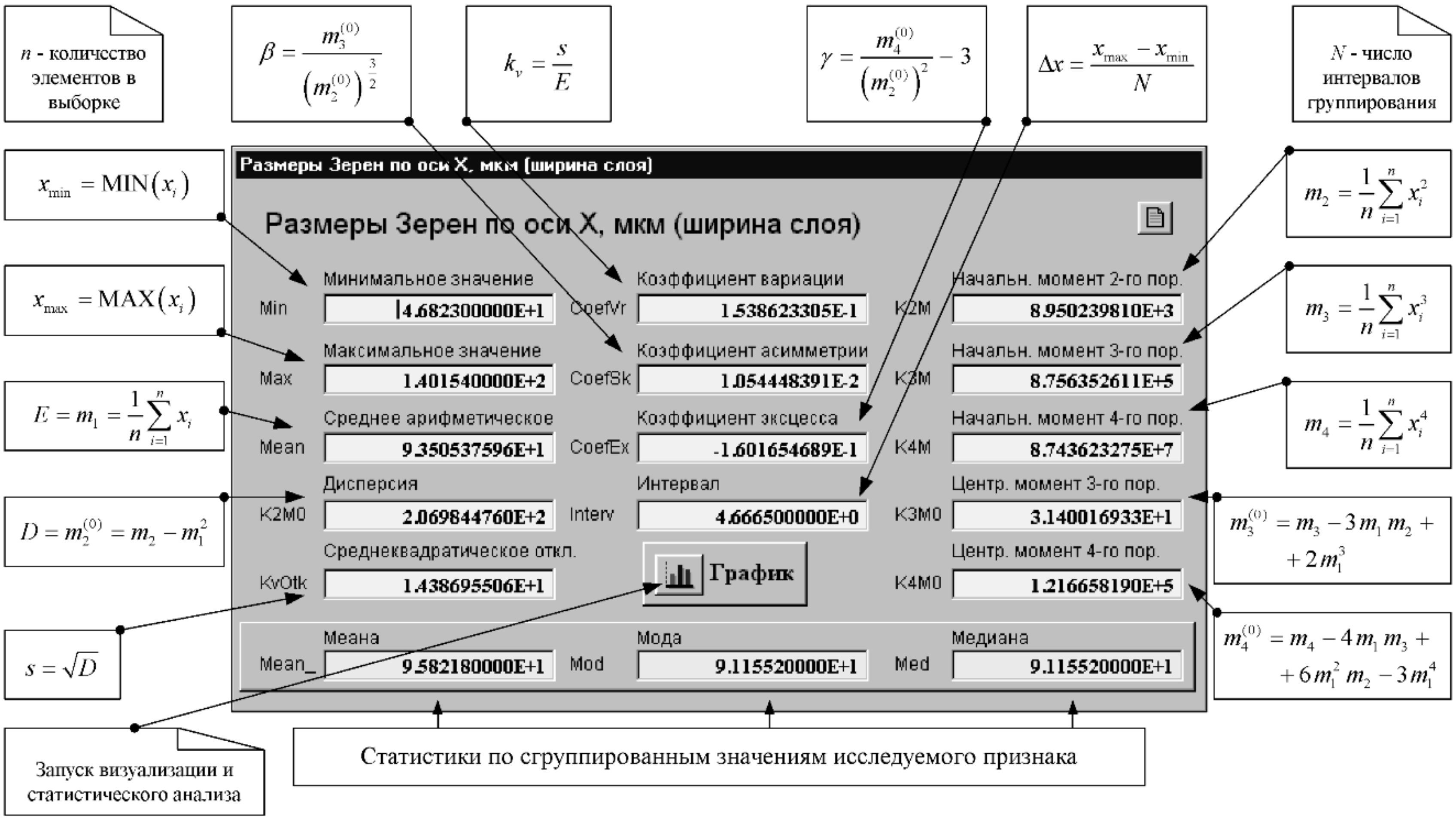


Рисунок 3.36 – Форма вывода статистических характеристик исследуемого признака (пример для размера зерен) и расчетные зависимости

Выборочное модальное значение (или мода) x_{mod} *случайной величины определяется как такое возможное значение исследуемого признака, при котором плотность вероятности* p_j *достигает своего максимума. Таким образом, мода представляет собой как бы наиболее часто осуществляющееся значение исследуемого признака*. Определение приближенного значения моды по выборочным данным гистограмм производится следующим образом: находится максимальное значение $p_{mode} = p_{max} = MAX(p_j)$ и интервал $j = j_{mod}$; присваивается значение середины интервала j_{mod}: $x_{mod} = x_j$, где $j = j_{mod}$.

Выборочная медиана x_{med} исследуемого признака определяется как его средневероятное значение, т. е. вероятность того, что анализируемая случайная величина окажется больше x_{med}, равна вероятности того, что она окажется меньше x_{med}. Выборочная медиана по данным гистограмм определяется следующим образом: производится последовательное суммирование значений плотности вероятности p_j до получения значения $SUM(p_j) > 0{,}5$, и принимается интервал $j = j_{med}$; присваивается значение середины интервала j_{med}: $x_{med} = x_j$, где $j = j_{med}$.

Полученные значения x_{mean}, x_{mod}, x_{med} записываются в базу данных (STAT_NNN или ST3D_NNN) статистик текущего варианта экземпляра модели (см. рис. 3.35).

Полученная система статистических характеристик может изучаться при активизации формы просмотра данных (см. рис. 3.35): страничные блоки – «База данных Статистик», «База данных Гистограмм». Выбор исследуемого признака для более детального изучения производится в страничном блоке – «Выбор исследуемого признака и результаты статистического анализа»: кнопка вызова формы вывода статистических характеристик исследуемого признака (см. рис. 3.36); кнопка вызова формы визуализации и статистического анализа (рис. 3.37).

Форма визуализации результатов моделирования (см. рис. 3.37) построена на базе интеграции с MS Graph на основе специального пользовательского класса визуализации данных. На форме имеется кнопка запуска статистического анализа распределений. Нажатие на кнопку активизирует работу специального пользовательского класса (для анализа распределений), функции работы которого определяются опциями выпадающего меню (см. рис. 3.37).

Рассмотрим возможности анализа в соответствии с позициями меню. Первые две позиции («Распределение» и «Критерии согласия») активизируют дополнительные подменю и будут рассмотрены ниже.

Вторая группа опций меню («Переход к характеристическим параметрам» и «Возврат натуральных параметров») определяют возможность перехода к относительным значениям исследуемого признака и возврата к натуральным. В качестве характеристического размера (при решении задач статистического моделирования алмазно-абразивного инструмента) принимается величина, связанная с исходной характеристикой абразивного порошка – первая величина в обозначении зернистости (или производная от нее). При переходе к характеристической шкале выполняются следующие преобразования значений исследуемого признака x_j выборочного среднеарифметического E и дисперсии D:

$$\widehat{x}_j = \frac{x_j}{a_0};\ \widehat{E} = \frac{E}{a_0};\ \widehat{D} = \frac{D}{a_0^2}, \tag{3.41}$$

где $\widehat{x}_j$, $\widehat{E}$, $\widehat{D}$ – преобразованные значения; a_0 – характеристический размер.

Третья группа опций меню выводит формы с данными (см. рис. 3.37): «Таблица данных графиков» – просмотр данных, по которым строятся графики (база данных GIST_XXX); «Таблица статистических параметров» – просмотр статистических параметров текущего распределения (база данных STAT_XXX); «Параметры текущего распределения» – справка по параметрам и характеристикам текущего распределения; «Погрешности текущего распределения» – выводится форма с графиками абсолютной и относительной ошибки замены модельного выборочного распределения текущей функцией распределения.

Четвертая группа опций меню – «График плотности вероятности» и «График интегральной функции». Переход от данных исходного графика плотности вероятности p_j (j = 1, ..., N) к графику интегральной (кумулятивной) функции распределения P_j производится по зависимости $P_j = \sum_{j=1}^{j} p_j$.

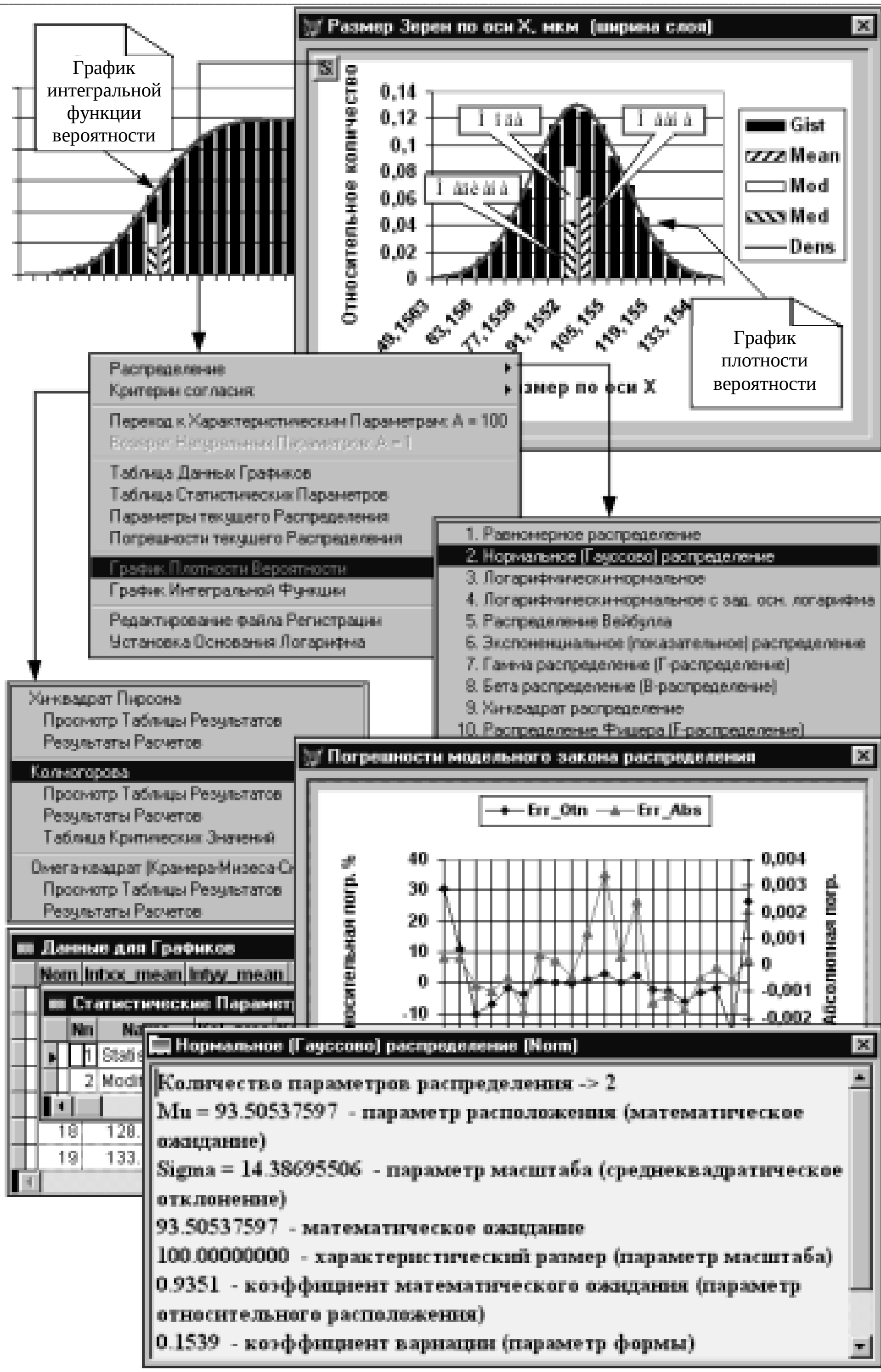


Рисунок 3.37 – Форма визуализации и статистического анализа

Пятая группа опций меню: «Редактирование файла регистрации» – позволяет производить просмотр и редактирование накопительного текстового файла регистрации работы пользователя; «Установка основания логарифма»

– может использоваться для случая логарифмически-нормального распределения с заданным основанием логарифма (по умолчанию – 10).

Первая опция меню – «Распределение» активизирует подменю, обеспечивающее выбор одного из 17 непрерывных распределений, наиболее часто используемых в практике статистических исследований (рис. 3.38): 1 – равномерное, 2 – нормальное, 3 – логарифмически-нормальное, 4 – логарифмически нормальное с заданным основанием логарифма, 5 – Вейбулла; 6 – экспоненциальное (показательное); 7 – гамма (Г-распределение); 8 – бета (В-распределение); 9 – хи-квадрат (χ^2-распределение); 10 – Фишера (F-распределение); 11 – распределение по закону арксинуса; 12 – треугольное распределение Симпсона; 13 – Релея; 14 – Максвелла; 15 – логистическое; 16 – Парето; 17 – трапециидальное распределение Симпсона.

Определение параметров модельных законов распределения производится методом моментов с использованием модификации параметров распределений (2.2).

Вторая опция меню – «Критерии согласия» активизирует подменю, обеспечивающее выполнение расчетов по оценке согласия модельной выборки с текущим теоретическим законом распределения. Используются следующие критерии согласия: χ^2, Колмогорова, ω^2.

Рассмотренный подход позволяет решать задачи статистического анализа законов распределения исследуемых признаков при 3D моделировании алмазно-абразивных инструментов в единой среде данных.

3.7. Взаимосвязь зернового состава навески с параметрами распределения размеров зерен

Использование 3D моделей при изучении рабочих процессов алмазно-абразивной обработки позволяет повысить содержательность и уровень визуализации при моделировании.

При создании 3D модели рабочей поверхности шлифовального круга (для обеспечения адекватности) необходимо учитывать свойства исходного абразивного слоя. Поэтому вначале создается 3D модель абразивного слоя на базе навески зерен с последующим переходом к 3D модели рабочей поверхности.

1. Равномерное

$$f_{Rand} = 1/(x_{max} - x_{min})$$

2. Нормальное распределение

$$f_{Norm} = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$$

3. Логарифмически-нормальное

$$f_{lnNorm} = \frac{1}{x \cdot \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$$

4. Логнормальное с зад. осн. логарифма

$$f_{log\,Norm} = \frac{1}{x \cdot \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{1}{\sigma}\left(\frac{ln(x)}{ln(b)} - \mu\right)\right]^2\right\}$$

5. Распределение Вейбулла

$$f_{Weibull} = \frac{\delta}{\eta} \cdot \left(\frac{x}{\eta}\right)^{(\delta-1)} exp\left[-\left(\frac{x}{\eta}\right)^{\delta}\right]$$

7. Гамма распределение

$$f_{Gamma} = \frac{\left(\frac{x}{b}\right)^{(c-1)} \cdot exp\left(-\frac{x}{b}\right)}{b \cdot \Gamma(c)}$$

17. Трапециидальное распределение Симпсона

$$f_{Simpson2} = \begin{cases} (x-a+l)/(l^2-b^2), \\ 1/(1+b), \\ (a+l-x)/(l^2-b^2) \end{cases}$$

Исходные выборочные статистические характеристики исследуемого признака

$$x_{min} = MIN(x_i)$$
$$x_{max} = MAX(x_i)$$
$$E = m_1 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$
$$D = m_2^{(0)} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - m_1^2$$
$$k_v = \frac{\sqrt{D}}{E}$$

9. Хи-квадрат

$$f_{Hi^2} = \frac{x^{\frac{v}{2}-1} \cdot exp\left(-\frac{x}{2}\right)}{2^{\frac{v}{2}} \cdot \Gamma\left(\frac{v}{2}\right)}$$

6. Экспоненциальное

$$f_{Exp} = \frac{1}{b} \cdot exp\left(-\frac{x}{b}\right)$$

8. Бета

$$f_{Beta} = \frac{\Gamma(v+w)}{\Gamma(v) \cdot \Gamma(w)} \cdot \left(\frac{x}{b}\right)^{v-1} \cdot \left(1-\frac{x}{b}\right)^{w-1}$$

10. F-распределение

$$f_F = \frac{\Gamma\left(\frac{v+w}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{v}{2}\right) \cdot \Gamma\left(\frac{w}{2}\right)} \cdot \frac{v^{\frac{v}{2}} \cdot w^{\frac{w}{2}} \cdot x^{\frac{v}{2}-1}}{(v \cdot x + w)^{\frac{v+w}{2}}}$$

11. По закону арккосинуса

$$f_{ArcSin} = \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{l^2 - (x-a)^2}}$$

12. Треугольное распределение Симпсона

$$f_{Simpson} = \begin{cases} (l+x-a)/l^2, \\ (l-x+a)/l^2 \end{cases}$$

13. Релея

$$f_{Relay} = \frac{x}{\sigma^2} exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}\right)$$

14. Максвелла

$$f_{Maxwell} = \frac{x^2}{\sigma^3}\sqrt{\frac{2}{\pi}}\, exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}\right)$$

15. Логистическое

$$f_{Logistic} = \frac{exp[(x-a)/k]}{k\{1+exp[(x-a)/k]\}^2}$$

16. Парето

$$f_{Pareto} = c \cdot x^{-c-1}$$

Рисунок 3.38 – Плотности основных законов распределения, используемых при статистическом анализе исследуемых признаков

Как объект абразивный слой шлифовального круга представляет собой связку с определенным количеством зерен, равновероятно распределенных по объему абразивного слоя. Распределение размеров зерен и их относительное положение характеризуется параметрами законов распределения. В качестве исходных примем следующие допущения: размеры зерен подчиняются нормальному или логарифмически-нормальному закону распределения; форма зерен описывается формой трехосного эллипсоида.

При создании экземпляра 3D объектной модели навески зерен, база данных размеров зерен, содержащая DxN, DyN, DzN – диаметры зерен, формируется (для заданной формы зерен) в соответствии с заданными параметрами закона распределения. Для нормального закона распределения – математическое ожидание E и среднеквадратическое отклонение $\sqrt{D}$, где D – дисперсия. При задании параметров закона распределения размеров зерен возникает проблема выбора значений, обеспечивающих выполнение требований ГОСТ по относительному содержанию зерновых фракций.

Одним из путей ее решения является определение взаимосвязи между параметрами распределения размеров зерен и процентным содержанием фракций. Общая схема модельного исследования[1], направленного на определение такой взаимосвязи, представлена на рис. 3.39.

3.7.1. Регрессионный анализ взаимосвязи между параметрами распределения размеров зерен и процентным содержанием фракций

Связь зернового состава навески по массе (или объему) с параметрами законов распределения размеров зерен, моделируемых трехосным эллипсоидом, не имеет аналитического описания в явном виде. Проведенные 3D модельные исследования показали, что закон распределения объемов зерен не соответствует закону распределения их размеров (кроме случая логарифмически-нормального распределения). В качестве примера рассмотрим экземпляр модельной навески шлифпорошка, характеризующийся следующими параметрами: зернистость 100/80; количество зерен в навеске 100

[1] Модельные исследования выполнены с участием асп. Я.Н. Гаращенко.

тыс. шт.; форма зерен – трехосный эллипсоид; законы распределения размеров осей эллипсоида одинаковы и соответствуют нормальному; характеристический размер a_0 = 100 мкм; коэффициент относительного математического ожидания k_m = 0,95; математическое ожидание $E = \mu = a_0 k_m$ = 95 мкм; среднеквадратическое отклонение $\sigma = E \cdot k_v = a_0 \cdot k_m \cdot k_v$ = 14,25 мкм, коэффициент вариации k_v = 0,15. Гистограммы распределения размеров зерен представлены на рис. 3.40. Статистический анализ законов распределения выборочных характеристик обеспечивается с помощью специальной подсистемы (рис. 3.41). Анализ распределения относительных объемов зерен (рис. 3.42) показывает, что закон их распределения асимметричный. Статистические расчеты выявили соответствие модельных данных гамма распределению со следующими параметрами: b = 0,68 (параметр масштаба); c = 14,709 (параметр формы).

Рисунок 3.39 – Схема модельного исследования

Невозможность использования непрерывных математических функций определяется механизмом главения зерен по фракциям при контрольном рассеве шлифпорошков. Поэтому отношения параметров распределения размеров зерен к процентному содержанию фракций необходимо определять путем имитационного моделирования (см. рис. 3.39): создание экземпляров навесок зерен с определенными E, $\sqrt{D}$; имитационный контроль зернового состава для определения содержания фракций; корреляционный и регрессионный анализ полученных отношений; определение функций, корректно описывающих эти взаимосвязи (рис. 3.40).

Модельное исследование проводилось для алмазных шлифпорошков узкого и широкого диапазонов зернистостей. При исследовании определяли процентное содержание фракций P в зависимости от коэффициента относительного математического ожидания k_m и коэффициента вариации k_v. Выбор относительных значений исходных параметров позволяет обобщить результаты статистического моделирования параметров, связанных с исходными характеристиками шлифпорошков.

Выбор коэффициентов k_m, k_v определился тем, что данные, полученные при исследовании одной зернистости, можно перенести и на другие зернистости с таким же знаменателем геометрической прогрессии φ. Это связано с тем, что для просева алмазных порошков используются проволочные сита, размеры которых построены на основе ряда предпочтительных чисел. Для шлифпорошков узкого и широкого диапазонов зернистостей знаменатели геометрической прогрессии соответственно равны $\varphi_{узк} = \sqrt[10]{10} = 1{,}259$ и $\varphi_{шир} = \sqrt[5]{10} = 1{,}585$.

Значения k_m выбирали в интервале от $1/\varphi$ до 1. Для узкого диапазона зернистостей это соответствовало диапазону значений 0,8 ... 1 с интервалом 0,05; широкого – 0,63 ... 1 с интервалом 0,0925. Значения k_v выбирали в диапазоне, обеспечивающем требования ГОСТ по содержанию фракций: для узкого диапазона зернистостей – 0,05 ... 0,15; широкого – 0,05 ... 0,25. Интервал изменения значений составлял 0,05. Максимальные значения k_v были выбраны с учетом рекомендаций [1].

В соответствии с выбранным коэффициентом относительного математического ожидания k_m и коэффициентом формы k_v значения математического ожидания E и среднеквадратического отклонения σ, являющиеся промежуточными параметрами при создании навески зерен, определяли из ранее рассмотренных соотношений: $E = \mu = a_0 k_m$; $\sigma = a_0 k_m k_v$, где a_0 – характеристический размер; k_m – коэффициент смещения математического ожидания относительно характеристического размера; k_v – коэффициент вариации.

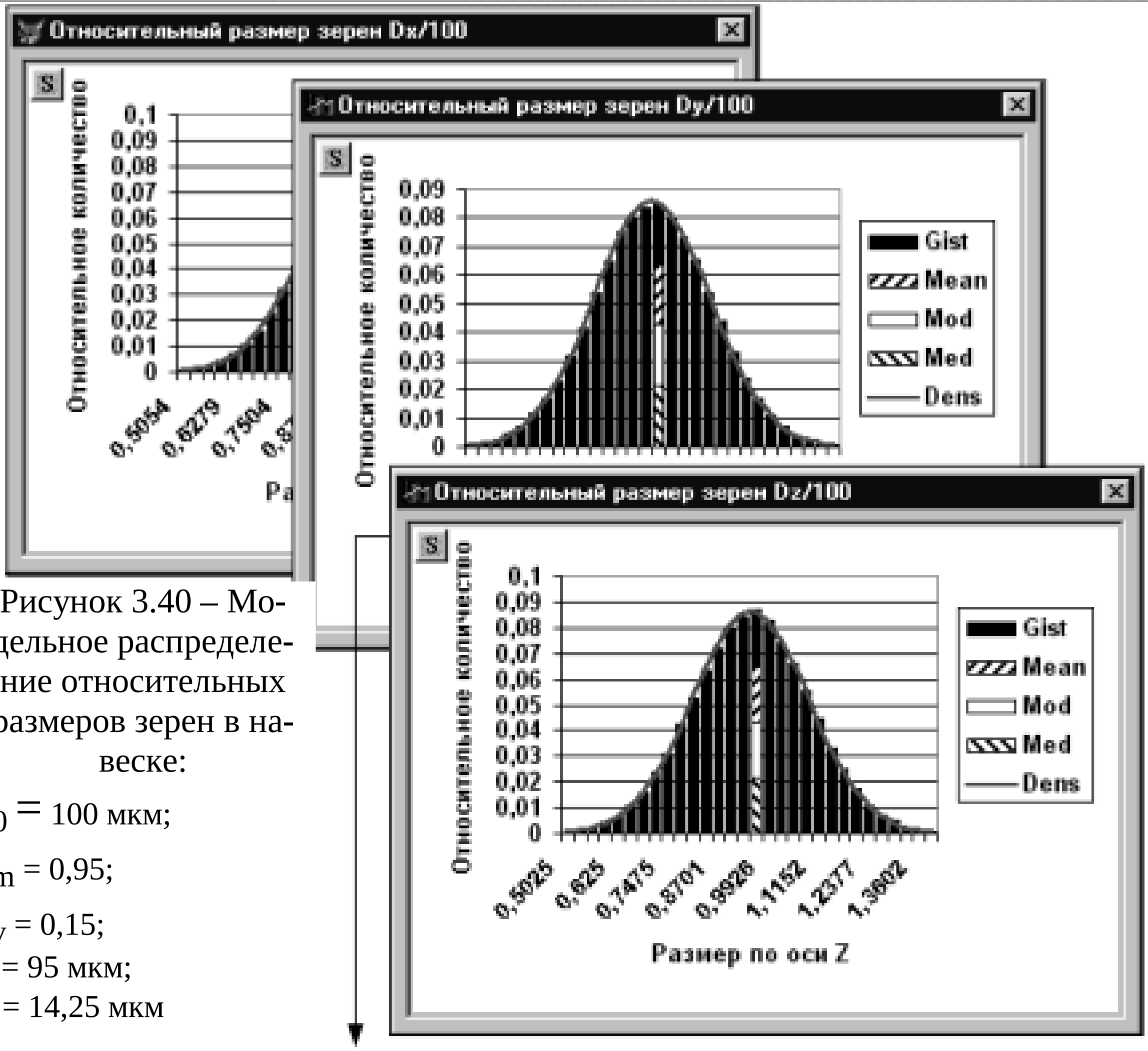


Рисунок 3.40 – Модельное распределение относительных размеров зерен в навеске:

$a_0 = 100$ мкм;

$k_m = 0{,}95$;

$k_v = 0{,}15$;

$\mu = 95$ мкм;

$\sigma = 14{,}25$ мкм

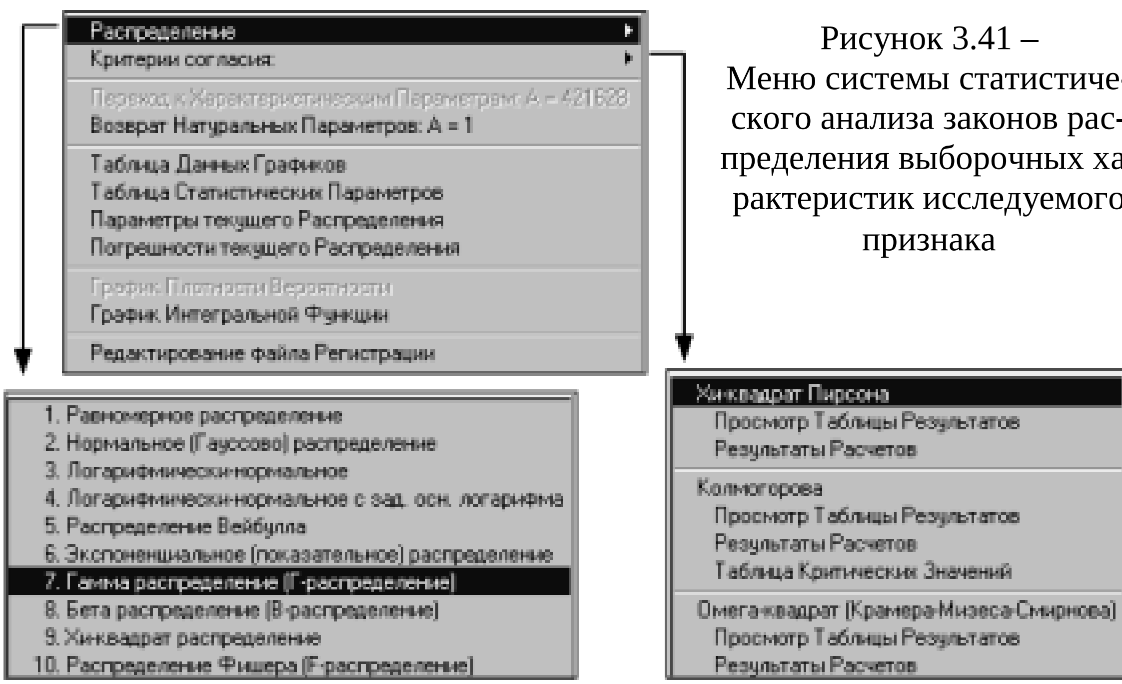


Рисунок 3.41 – Меню системы статистического анализа законов распределения выборочных характеристик исследуемого признака

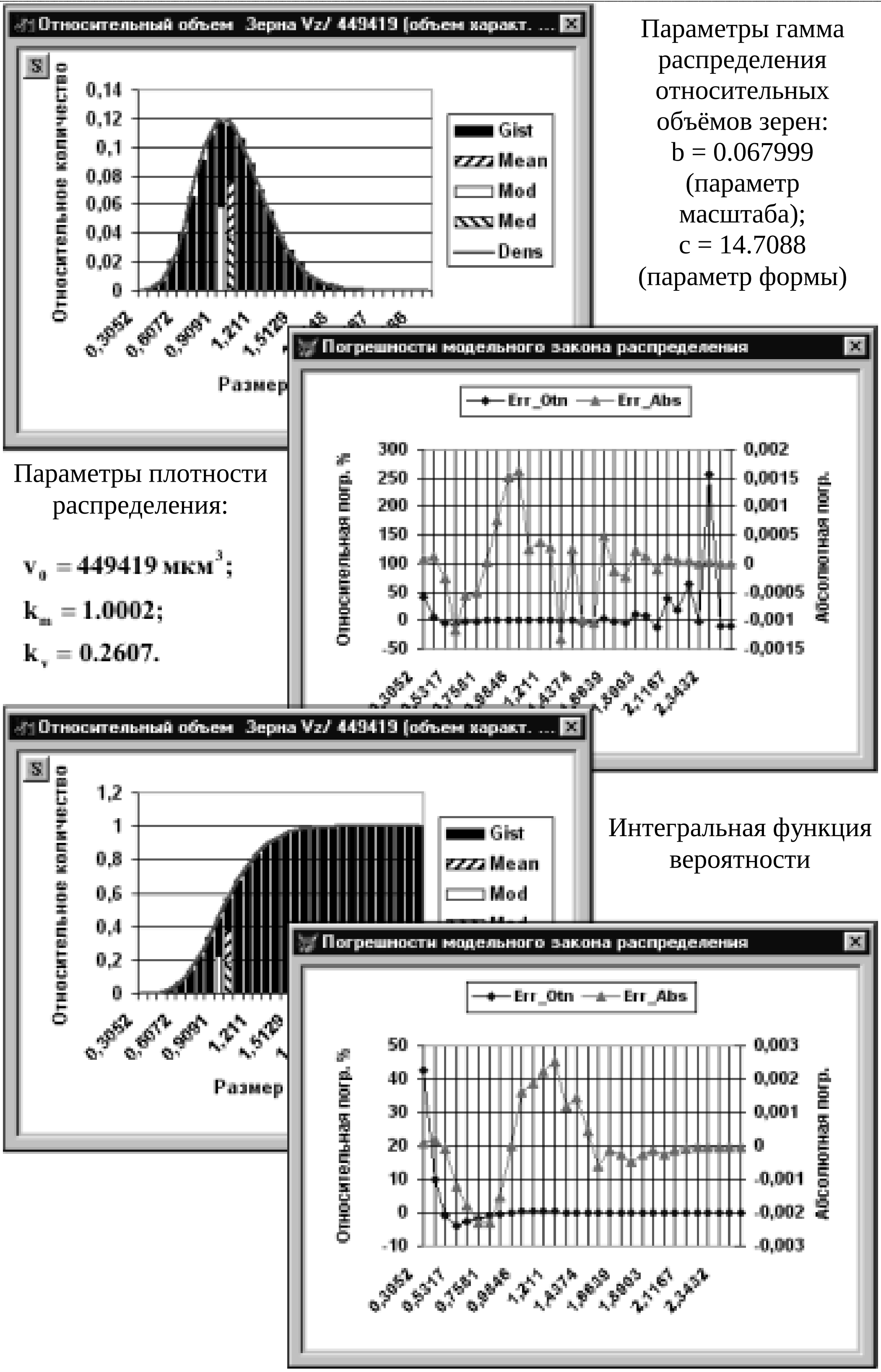


Рисунок 3.42 – Распределение относительных объемов зерен

Количество зерен, создаваемое в каждом экземпляре модельной навески, соответствовало ≅ 100 тыс. шт. Такое количество зерен в навеске обеспечивало достаточную устойчивость статистических выводов. Как показали проведенные испытания, дальнейшее увеличение количества зерен (до 10 млн. шт.) приводит к относительному изменению содержания фракций в пределах 1 %.

Корреляционный и регрессионный анализ зависимостей производился с использованием специальной подсистемы функционального регрессионного анализа. Подсистема является составной частью программного комплекса для 3D моделирования алмазно-абразивного инструмента в среде управления базами данных Visual FoxPro. Для повышения достоверности результатов контрольные расчеты производились в среде статистического пакета Statistica с использованием модуля Nonlinear Estimation.

Исследование функциональных зависимостей выполняли в следующей последовательности:

– определение функции взаимосвязи между содержанием фракций и коэффициентом k_m, $P = f(k_m)$;

– определение функций взаимосвязи между коэффициентами уравнения регрессии $P = f(k_m)$ и коэффициентом k_v;

– определение функции взаимосвязи между содержанием фракций и коэффициентами k_m и k_v, $P = f(k_m, k_v)$;

– определение коэффициентов уравнений регрессии $P = f(k_m, k_v)$.

Выбор функции, описывающей взаимосвязь, производили по следующим характеристикам аппроксимации: абсолютное значение коэффициента корреляции, максимальные значения абсолютной и средней относительной ошибок аппроксимации. Определяющим условием выбора вида функции являлось значение средней относительной ошибки аппроксимации, не превышающей 5 %. В качестве базовых использовались функции, представленные на рис. 3.43.

Полученные функции взаимосвязи между процентным содержанием фракции и коэффициентом k_m, имеют следующий вид:

для основной фракции

$$P(k_m) = Ak_m^2 + Bk_m + C; \tag{3.42}$$

для предельной, крупной, дополнительной и мелкой фракций

$$P(k_m) = \exp(Ak_m^2 + Bk_m + C), \tag{3.43}$$

где A, B, C – коэффициенты уравнений регрессии $P = f(k_m)$;

Функции взаимосвязи между коэффициентами уравнения регрессии $P = f(k_m)$ и коэффициентом k_v имеют следующий вид:

$$A(k_v) = a_A k_v^{b_A} + c_A; \quad B(k_v) = a_B k_v^{b_B} + c_B; \quad C(k_v) = a_C k_v^{b_C} + c_C, \tag{3.44}$$

где a_A, b_A, … c_C – коэффициенты уравнений регрессии.

Обобщенные уравнения регрессии были получены подстановкой зависимостей (3.44) в уравнения (3.42), (3.43). После выполнения преобразований имеем:

для основной фракции

$$P(k_v, k_m) = a_1(k_v^b + c_1)k_m^2 + a_2(k_v^b + c_2)k_m + a_3(k_v^b + c_3); \tag{3.45}$$

для предельной, крупной, дополнительной и мелкой фракции

$$P(k_v, k_m) = \exp\left[a_1(k_v^b + c_1)k_m^2 + a_2(k_v^b + c_2)k_m + a_3(k_v^b + c_3)\right], \tag{3.46}$$

где a_1, a_2, a_3, b, c_1, c_2, c_3 – коэффициенты уравнений регрессии.

Значения коэффициентов уравнений регрессии $P = f(k_m, k_v)$ для алмазных шлифпорошков при нормальном законе распределения размеров зерен и форме зерен – трехосный эллипсоид представлены в табл. 3.1, 3.2.

Полученные зависимости обеспечивают относительную ошибку аппроксимации в пределах 4 ... 6 % для всех зернистостей шлифпорошков микропорошков (кроме зернистостей 2/1 и 1/0). Это позволяет определять процентное содержание фракций P от коэффициентов k_m, k_v, задающих параметры распределения размеров зерен.

$$y_1 = ax + b$$

$$y_2 = ax^2 + bx + c$$

$$y_3 = \frac{a}{x} + b$$

$$y_4 = a\exp(-x) + b$$

$$y_5 = a\lg x + b$$

$$y_6 = \frac{a}{1/x + b}$$

$$y_7 = \frac{1}{a\exp(-x) + b}$$

$$y_8 = bx^a$$

$$y_9 = b\exp(ax)$$

$$y_{10} = b\exp\left(\frac{a}{x}\right)$$

$$y_{11} = cx^b \exp(ax)$$

$$y_{12} = c\exp(ax^2 + bx)$$

$$y_{13} = \frac{1}{ax + b}$$

$$y_{14} = \frac{x}{ax + b}$$

$$y_{15} = \sqrt{ax^2 + bx + c}$$

$$y_{16} = \frac{1}{\sqrt{ax^2 + bx + c}}$$

$$y_{17} = \frac{x}{\sqrt{ax^2 + bx + c}}$$

$$y_{18} = \frac{a}{x^2} + \frac{b}{x} + c$$

$$y_{19} = a\ln^2 x + b\ln x + c$$

$$y_{20} = \exp\left(ax^2 + bx + c\right)$$

$$y_n = f\left(x, a, b\,[, c]\right)$$

Рисунок 3.43 – Функции, использованные при регрессионном анализе

3.7.2. Определение параметров распределений размеров зерен в соответствии с ГОСТ

В требованиях ГОСТ *для шлифпорошков заданы условия по процентному содержанию предельной, крупной, основной и мелкой фракций*. Подставив эти условия в уравнения (3.45) и (3.46), получим систему уравнений, определяющих значения параметров распределения размеров зерен, обеспечивающих заданные требования:

$$\begin{cases} P_{\text{п}} < \exp[a_{\text{п}1}(k_v{}^{b_{\text{п}}} + c_{\text{п}1})k_m{}^2 + a_{\text{п}2}(k_v{}^{b_{\text{п}}} + c_{\text{п}2})k_m + a_{\text{п}3}(k_v{}^{b_{\text{п}}} + c_{\text{п}3})] \\ P_{\text{к}} < \exp[a_{\text{к}1}(k_v{}^{b_{\text{к}}} + c_{\text{к}1})k_m{}^2 + a_{\text{к}2}(k_v{}^{b_{\text{к}}} + c_{\text{к}2})k_m + a_{\text{к}3}(k_v{}^{b_{\text{к}}} + c_{\text{к}3})] \\ P_{\text{о}} \geq a_{\text{о}1}(k_v{}^{b_{\text{о}}} + c_{\text{о}1})k_m{}^2 + a_{\text{о}2}(k_v{}^{b_{\text{о}}} + c_{\text{о}2})k_m + a_{\text{о}3}(k_v{}^{b_{\text{о}}} + c_{\text{о}3}) \\ P_{\text{м}} < \exp[a_{\text{м}1}(\text{k}_v{}^{b_{\text{м}}} + c_{\text{м}1})\text{k}_m{}^2 + a_{\text{м}2}(\text{k}_v{}^{b_{\text{м}}} + c_{\text{м}2})\text{k}_m + a_{\text{м}3}(\text{k}_v{}^{b_{\text{м}}} + c_{\text{м}3})], \end{cases} \tag{3.47}$$

где $P_{\text{п}}$, $P_{\text{к}}$, $P_{\text{о}}$, $P_{\text{м}}$ – заданные условия по процентному содержанию предельной, крупной, основной и мелкой фракций; $a_{\text{п}1}$, $b_{\text{п}}$ …, $c_{\text{м}3}$ – коэффициенты уравнений регрессии.

Анализ зависимостей (3.45) и (3.46) показывает, что для шлифпорошков границы областей допустимых значений коэффициентов k_m и k_v, определяемых условиями по крупной и основной фракциям, пересекаются (рис. 3.44). Общая область для этих фракций включает области предельной и мелкой фракций. Данное соответствие выполняется для шлифпорошков всех зернистостей. С учетом рассмотренных особенностей система уравнений (3.47) примет следующий вид:

$$\begin{cases} P_{\text{о}} \geq a_{\text{о}1}(k_v{}^{b_{\text{о}}} + c_{\text{о}1})k_m{}^2 + a_{\text{о}2}(k_v{}^{b_{\text{о}}} + c_{\text{о}2})k_m + a_{\text{о}3}(k_v{}^{b_{\text{о}}} + c_{\text{о}3}) \\ P_{\text{к}} < \exp(a_{\text{k}1}(k_v{}^{b_{\text{k}}} + c_{\text{k}1})k_m{}^2 + a_{\text{k}2}(k_v{}^{b_{\text{k}}} + c_{\text{k}2})k_m + a_{\text{k}3}(k_v{}^{b_{\text{k}}} + c_{\text{k}3})). \end{cases} \tag{3.48}$$

На рис. 3.44 представлена характерная область для шлифпорошков, полученная из системы уравнений (3.48), на примере зернистости 250/200. Границы области $a-b-c$ имеют три участка. Участки $a-b$ и $b-c$ определены условиями по основной и крупной фракциям. Участок $a-c$ зависит от минимального значения коэффициента k_v.

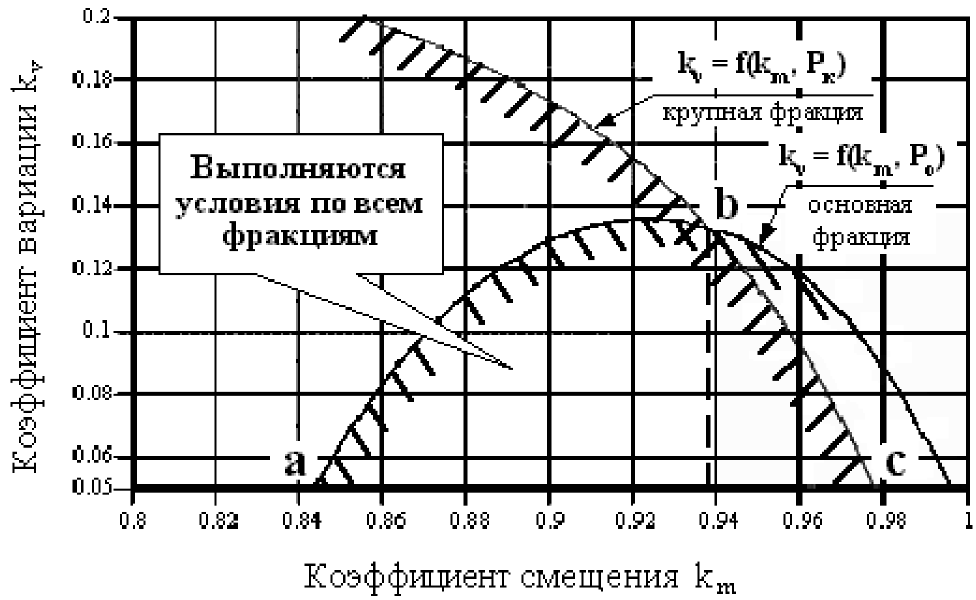


Рисунок 3.44 – Область значений коэффициентов k_m и k_v, обеспечивающих требования ГОСТ по содержанию фракций

Первый участок границы области зависит от максимальных значений k_v на интервале k_m (a, b). Значения коэффициента вариации k_v определяются решением первого уравнения системы (3.48):

$$k_v = f(k_m, P_о) = \left[\frac{P_о - a_{о1}c_{о1}k_m^{\;2} - a_{о2}c_{о2}k_m - a_{о3}c_{о3}}{a_{о1}k_m^{\;2} + a_{о2}k_m + a_{о3}} \right]^{\frac{1}{b_о}}. \qquad (3.49)$$

Второй участок границы области обусловлен максимальными значениями k_v на интервале k_m (b, c). Значения k_v определяются решением второго уравнения системы (3.48):

$$k_v = f(k_m, P_к) = \left[\frac{\ln(P_к) - a_{к1}c_{к1}k_m^{\;2} - a_{к2}c_{к2}k_m - a_{к3}c_{к3}}{a_{к1}k_m^{\;2} + a_{к2}k_m + a_{к3}} \right]^{\frac{1}{b_к}}. \qquad (3.50)$$

пазона
зернистостей

Фракция	Коэффициенты уравнений регрессии процентного содержания фракций в навеске зерен						
	a_1	a_2	a_3	b	c_1	c_2	c_3
Предельная	0,338978	0,329152	-0,726992	-0,13158	-6,26542	-6,26542	-6,26542
Крупная	25,29969	-1170,90	1156,000	0,024049	-0,819016	-0,964135	-0,964135
Основная	-14577,5	26683,58	-12043,8	-0,150038	-1,13832	-1,13650	-1,13832
Дополнит.	-1,11152	1,492705	-0,481025	-1,53694	22,82648	25,96829	22,09619
Мелкая	-0,619358	0,293392	0,114161	-2,02502	-7,87232	2,873374	-4,78872

диапазона
зернистостей

Фракция	Коэффициенты уравнений регрессии процентного содержания фракций в навеске зерен						
	a_1	a_2	a_3	b	c_1	c_2	c_3
Предельная	1,513854	-0,850623	-0,785667	-2,065039	-3,66619	-3,95389	-6,84056
Крупная	-80,0392	-1,44710	83,16444	0,190398	-0,091059	-77,5830	-1,40897
Основная	-134,618	222,6682	-87,3972	-1,11507	3,138588	3,259210	2,826839
Дополнит,	-76,3200	17,61101	20,28459	-0,151003	-1,00768	-0,352155	-1,18374
Мелкая	1,795918	-3,25852	1,277851	-1,84513	-8,79984	-5,40053	-1,20326

Определение областей значений коэффициентов k_m, k_v для микропорошков производится аналогично шлифпорошкам.

В реальных навесках коэффициент вариации размеров зерен k_v имеет максимальные значения с ограничением по требованиям на содержание фракций. Следовательно, представляет практический интерес получение параметров распределения размеров зерен в навеске при максимально допустимых значениях k_v при одновременном соответствии требованию ГОСТ по содержанию фракций.

Для получения значений параметров модифицированных законов распределения размеров зерен был проведен их подбор с использованием имитационного контроля по фракциям зернистости. Подбор производился методом пошаговой оптимизации параметров k_m, k_v с шагом 0,005 и ограничениями по зерновому составу навески в соответствии с ГОСТ. В качестве целевой функции принималось максимальное значение коэффициента вариации k_v. Начальные приближения значений параметров определялись по уравнениям (3.49) и (3.50). Значения параметров для шлифпорошков широкого и узкого диапазонов зернистостей и микропорошков приведены в табл. В (приложение В). Моделирование производилось для формы зерен, соответствующей трехосному эллипсоиду, для нормального и логарифмически нормального законов распределений.

Примеры плотности вероятности размеров зерен для отдельных вариантов, типов, зернистостей и законов распределения представлены на рис. 3.45–3.48. *Сравнение вида плотностей распределений для шлифпорошков и микропорошков* (см. рис. 3.48) *показывает их существенное отличие*. Для нормального закона распределения шлифпорошки узкого диапазона зернистости имеют значения коэффициента вариации k_v в интервале 0,105 – 0,160 (k_m = 0,915 – 0,925). Для широкого диапазона зернистости значения k_v соответствуют 0,215 – 0,345 (k_m = 0,800 – 0,840). Значения k_v для микропорошков находятся в пределах 0,245 – 0,800 (k_m = 0,450 – 0,735). Зернистости с одинаковым отношением $\varphi_{факт} = a_в / a_н$ размеров в обозначении зернистости (табл. В) имеют одинаковые параметры закона распределения размеров зерен (в случае совпадения требований по зерновому составу). Широкий диапазон значений коэффициентов для микропорошков определяется повышенным диапазоном значений $\varphi_{факт}$ (в пределах 1,4 – 2). Влияние закона распределения на шлифпорошки узкого диапазона зернистостей (см. рис. 3.48) при $k_v \le 0,16$ несущественно. *Существенное отличие нормального от логарифмически-нормального закона распределения имеет место для микропорошков и шлифпорошков широкого диапазона зернистостей*. При логарифмически-нормальном законе распределения шлифпорошки имеют k_v больше на +7 ÷ –15 %; микропорошки – 4 ÷ –95 %. В целом можно сделать вывод, что влияние закона распределения является существенным в случае достаточно больших коэффициентов вариации $k_v > 0,16$ (см. рис. 3.45 – 3.48). Требования по зерновому составу фракций в первую очередь определяют значения коэффициента смещения k_m математического ожидания относительно характеристического размера a_0.

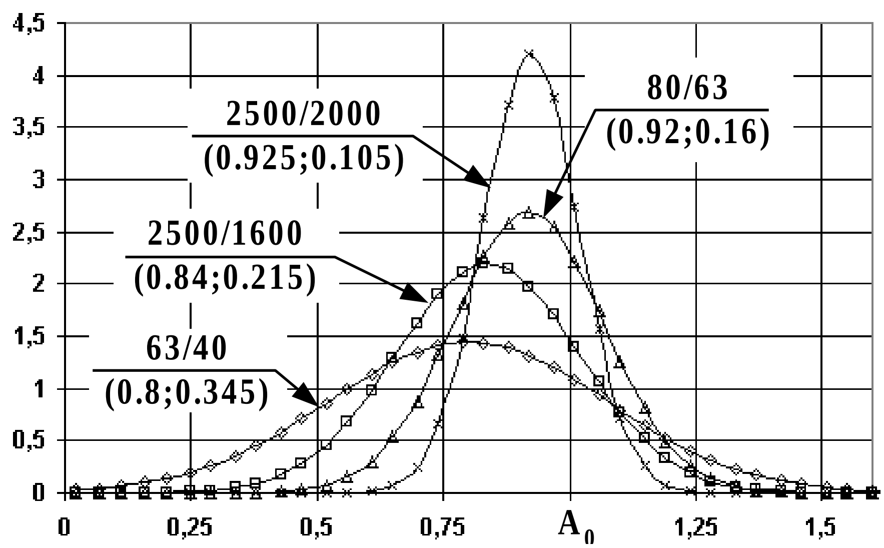


Рисунок 3.45 – Плотности распределений размеров зерен шлифпорошков при нормальном законе распределения

Полученные параметры законов распределений (табл. В), обеспечивающие зерновой состав в соответствии с ГОСТ, были занесены в специальную базу данных. В разработанной системе моделирования алмазно-абразивного инструмента предусмотрен выбор и установка этих параметров в зависимости от типа абразивного порошка (шлифпорошки широкого и узкого диапазонов зернистости, микропорошки) и его зернистости. В дальнейшем при реалистическом моделировании использовались полученные значения параметров законов распределения размеров зерен.

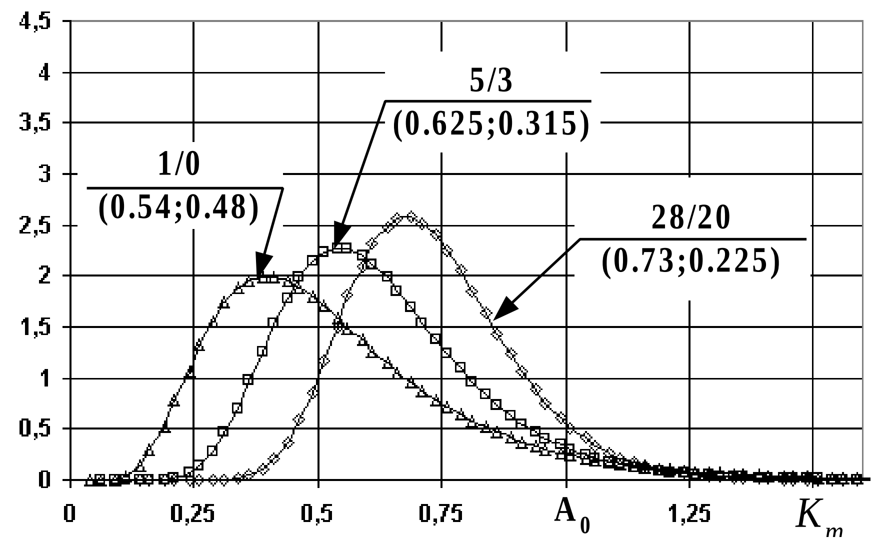


Рисунок 3.46 – Плотности распределений размеров зерен в микропорошкопри логарифмически-нормальном законе

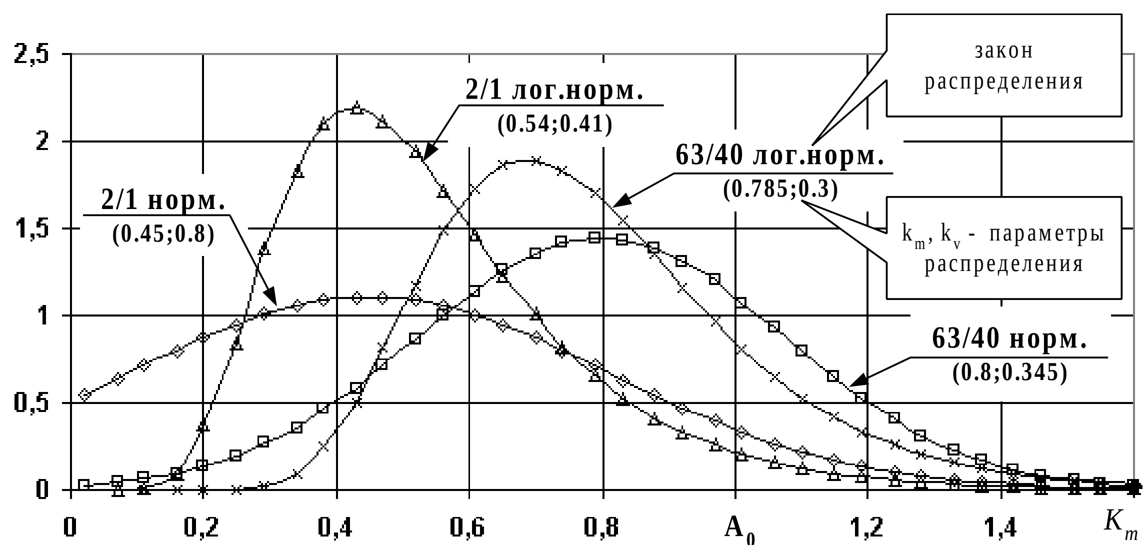
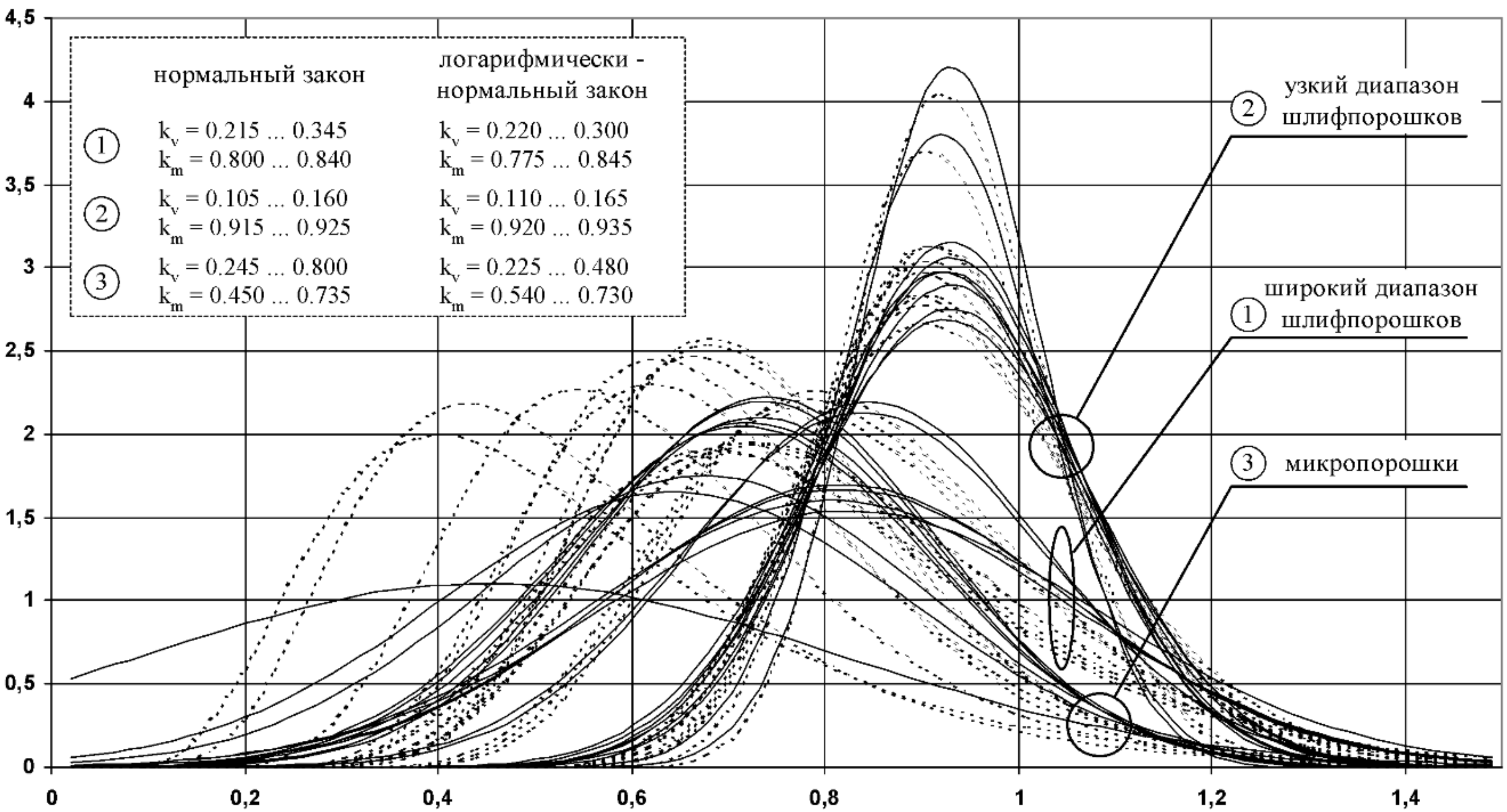


Рисунок 3.47 – Плотности распределений размеров зерен навески при нормальном и логарифмически-нормальном законах распределения



нормальном законах распределения:

– нормальный закон; – логарифмически-нормальный закон

3.8. Вопросы для самостоятельной подготовки

1. В чем состоит сущность концепция 3D моделирования алмазно-абра-зивных инструментов на базе объектно-статистической методологии?

2. Охарактеризуйте структуру и назовите основные элементы системы 3D моделирования.

3. Перечислите основные этапы создания экземпляра 3D модели алмазно-абразивного инструмента.

4. Назовите основные элементы статистического анализа модельных характеристик экземпляра 3D модели.

5. Охарактеризуйте технологию и достоинства использования баз данных для сохранения исходные данных и результатов моделирования.

6. Сущность системы подобий, используемых при 3D моделировании алмазно-абразивных инструментов.

7. Дайте характеристику концепции моделирования алмазно-абразивного инструмента на базе системного объектно-ориентированного подхода.

8. Что представляет собою объект с позиций компьютерного моделирования?

9. Как можно охарактеризовать следующие элементы алмазно-абразивного инструмента: алмазосодержащий слой, навеска зерен, поверхность связки, рабочая поверхность?

10. Оцените роль и место детерминированного и стохастического подходов при 3D моделировании алмазно-абразивных инструментов.

11. Назовите основные этапы методики создания и исследования варианта экземпляра 3D модели алмазосодержащего слоя и рабочей поверхности круга.

12. Охарактеризуйте механизм формирования навески зерен с заданным законом распределения размеров.

13. Дайте характеристику имитационному контролю зернового состава навески ситовым и оптическим методами.

14. На основе каких принципов реализуются распределения зерен в пространстве алмазосодержащего слоя?

15. Какие исследуемые признаки рассматриваются при статистическом анализе элементов алмазосодержащего слоя?

16. Как производится корреляционный анализ исследуемых признаков?

17. Назовите основные этапы формирования 3D модели рабочей поверхности шлифовальных кругов и особенности их реализации.

18. Какова роль визуализация результатов 3D моделирования алмазно-абразивных инструментов?

19. Какова методология визуализации результатов моделирования с использованием инструментов связывания и внедрения объектов (Object Linking and Embedding – OLE)?

20. Что понимается под исследуемыми признаками при статистическом моделировании?

21. Опишите структурную схему статистического анализа исследуемых признаков и охарактеризуйте два основных этапа его проведения

22. Дайте характеристику методике построения гистограмм при статистическом анализе и укажите области их применения.

23. Какова роль числа интервалов в степени наглядности опытных данных при построении графиков распределений?

24. Дайте характеристику выборочным статистикам, характеризующим центр группирования и меру рассеивания значений исследуемых признаков.

25. Каковы возможности статистического анализа в системе 3D моделирования и их соответствие потребностям исследователя?

26. Дайте общую характеристику методике регрессионного анализа взаимосвязи между параметрами распределения размеров зерен и процентным содержанием фракций.

27. Каковы особенности определения параметров распределений размеров зерен в соответствии с нормами по зерновому составу?

28. Проведите сравнительную оценку вида плотностей распределений для шлифпорошков и микропорошков, соответствующих ГОСТ.

ГЛАВА 4. 3D МЕТОДОЛОГИЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Panlatin summa petuntur –
Вершины достигаются постепенно.

Разум должен отвергнуть всё, что лишено точных физических и математических обоснований.
Наполеон I

В разделе рассмотрена методология комплексного исследования шлифования как функционирования 3D единой системы «обрабатываемый материал–зерно–связка», включающей 3D моделирование и экспериментальное изучение 3D параметров взаимодействующих поверхностей, и изучение 3D напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны шлифования. Проведен анализ процесса алмазного шлифования с позиций приспосабливаемости двух взаимодействующих поверхностей.

4.1. Шлифование как процесс взаимодействия элементов единой системы «обрабатываемый материал–зерно–связка»

Потенциал эффективности алмазного шлифования полностью определяется характером взаимодействия таких элементов, как обрабатываемый материал, алмазные зерна и связка круга. Поэтому представляется целесообразным исследовать зону шлифования как единую техническую систему «обрабатываемый материал–алмазное зерно–связка круга». Элементы зоны шлифования будем рассматривать в трехмерном (3D) измерении.

Обработка материалов, связанная с образованием новой поверхности, достижения заданных формы и размеров, требует осознанного управления процессом разрушения материала, составляющего припуск на заготовке. Для предельного случая синтетических сверхтвердых материалов на основе алмаза и нитрида бора (СТМ), которые отличаются высокой твердостью, износостойкостью и хрупкостью, высокопроизводительная, качественная и экономически целесообразная обработка представляет специфическую, технологически сложную задачу и ставит ряд совершенно новых проблем, решение которых возможно в рамках теории физики разрушения.

Способность абразивных частиц внедряться в поверхностный слой и разрушать его при движении приближенно оценивают по соотношению значений микротвердости испытуемого материала H и абразива H_a [3]:

$$K_T = \frac{H}{H_a}. \tag{4.1}$$

Опытным путем установлено, что критическое значение коэффициента $K_T = 0{,}5 \ldots 0{,}7$. При $K_T < 0{,}5$ возможно прямое разрушение материала (при соответствующей форме частиц и достаточной нормальной нагрузке); при $K_T > 0{,}7$ прямое разрушение маловероятно, и процесс изнашивания переходит в многоцикловый с резко снижающейся интенсивностью по мере увеличения коэффициента K_T. При алмазном шлифовании обрабатываемого материала $K_T > 0{,}6$ даже с учетом анизотропии физико-механических свойств обрабатываемого материала и зерен.

Коэффициент K_T используем в качестве критерия для оценки перехода от прямого (одноактного) разрушения обрабатываемого материала и зерен к многоцикловому (усталостно-циклическому) при нагрузках в контакте, не превышающих критическую.

Прямое разрушение микрообъемов поверхностного слоя материалов под действием абразивной частицы возможно при $K_T < 0{,}5$, т. е. когда абразив
в 2 раза и более тверже изнашивающегося материала. При этом абразивная частица, как показывает опыт, обладает достаточной прочностью, чтобы довести материал до разрушения, сохранив свою целостность и, соответственно, форму.

Если критерий твердости $K_T > 0{,}7$, то прямое разрушение невозможно, т. к. контактный выступ частицы разрушится прежде, чем напряжения в деформируемом микрообъеме материала достигнут предельного значения.

Критерий твердости K_T потому и используется в качестве одного из важнейших показателей при моделировании абразивного изнашивания, что его значения позволяют априорно установить возможный вид разрушения материала. Чем $K_T > 0{,}7$, тем ниже уровень контактных напряжений и тем слабее интенсивность изнашивания материала. В случае алмазного шлифования СТМ варьирование величиной коэффициента K_T возможно только за счет анизотропии свойств контактирующих элементов. Алмазные зерна круга и шлифуемый алмазный поликристалл имеют примерно равные твердости. Но т. к. отдельные кристаллиты произвольно ориентированы, то с учетом существенной анизотропии свойств кристаллитов СТМ и алмазных зерен можно ожидать такого сочетания ориентацией, когда реализуется превышение твердости режущего зерна над обрабатываемым поликристаллом.

Алмазное шлифование базируется на массовом воздействии твердых и острых алмазных зерен на обрабатываемый объект, при этом скорость движения этих зерен, их количество, сила воздействия поддаются регулированию в широком диапазоне значений. Выявлена важная роль субмикрорельефа алмазных зерен.

Изучение субмикрогеометрии алмазных зерен [33] показало, что острота их вершин (ребер) столь велика, что при воздействии на обрабатываемый материал создаются очень узкие зоны с высокой концентрацией эффективных напряжений. Конфигурация этих зон зависит во многом от характера контакта – по вершине, по ребру, от типа кристаллографической площадки. Это требует рассмотрения 3-х мерной задачи (3D) напряженно-деформированного состояния зоны шлифования.

Дифференцированный подход, применявшийся другими исследователями [5, 22] к изучению явлений, протекающих в зоне шлифования, нивелирует выявление роли элементов системы, в частности, связки, влияния ее свойств и всей композиции, составляющей алмазоносный слой.

Интенсивность съема всецело будет зависеть от микроразрушения поликристалла при соударении с алмазными зернами круга и скольжении последних по поверхности в их относительном перемещении. Эти выводы дают основание рассматривать алмазное шлифование, например СТМ, как структурно чувствительный процесс управляемого микроразрушения, обеспечивающего получение деталей заданной формы, размеров и качества. Задача управления микроразрушением состоит в том, чтобы ограничить зону микроразрушения объемами, составляющими припуск под обработку, исключить возможность распространения микротрещин и других дефектов в объемы поверхностного слоя детали, максимально использовать сопутствующие явления для интенсификации съема припуска.

На основании структурно-эмпирического подхода можно констатировать, что высокопроизводительный съем материала, составляющего припуск под обработку, достижим в том случае, если вся подводимая зерном энергия затрачивается на снимаемые объемы, а не на сопутствующие явления. Так как образование новых поверхностей связано с превышением энергии межатомной связи, то локализация зоны разрушения будет обуславливать и уменьшение объемов, в которых протекают сопутствующие явления, а, значит, снижение энергии, затрачиваемой на съем единицы объема материала.

Подводимая в зону шлифования энергия распределяется между элементами системы «обрабатываемый материал–зерно–связка»:

$$E = E_{\text{ом}} + E_{\text{св}} + E_{\text{З}}, \qquad (4.2)$$

где E – подводимая в зону шлифования энергия;

$E_{\text{ом}}$ – энергия, поглощенная обрабатываемым материалом;

$E_{\text{св}}$ – энергия, поглощенная связкой;

$E_{\text{з}}$ – энергия, поглощенная зерном.

Поскольку возможности пакета программ для расчета по методу конечных элементов позволяют определять энергию и плотность энергии деформации в каждом отдельном элементе конечно-элементной сетки 3D модели E^1, зависимость можно представить в виде:

$$E = V_{\text{ом}} \cdot E^1_{\text{ом}} + V_{\text{з}} \cdot E^1_{\text{з}} + V_{\text{св}} \cdot E^1_{\text{св}}, \qquad (4.3)$$

где $E^1_{\text{з}}$ –плотность энергии деформации в конечных элементах зерна;

$E^1_{\text{ом}}$ – плотность энергии деформации в конечных элементах обрабатываемого материала;

$E^1_{\text{св}}$ – плотность энергии деформации в конечных элементах связки;

$V_{\text{ом}}$, $V_{\text{св}}$, $V_{\text{з}}$ – объемы конечных элементов обрабатываемого материала, связки и зерна, в которых произошли изменения энергии деформации.

В дальнейшем объемы разрушенных обрабатываемого материала и зерен $V_{\text{р}}$ будем определять как сумму объемов элементов конечно-элементной сетки 3D модели зерна и обрабатываемого материала, в которых энергия деформации и/или приведенные напряжения превысили критические для данного материала значения.

Проведение теоретико-экспериментального изучения процессов разрушения и взаимодействия всех элементов системы «обрабатываемый материал–зерно–связка», позволит определить роль физико-механических свойств ее элементов, влияние топографических параметров взаимодействующих поверхностей и условий нагружения (режимов шлифования) на функционирование данной системы, что в полной мере определяет эффективность алмазного шлифования.

4.2. Понятие о приспосабливаемости при алмазно-абразивной обработке

Разработка Б.И. Костецким [19] *теории поверхностной прочности и разрушения тесно связана с развитием представлений об универсальном явлении структурной приспосабливаемости материалов при контактном нагружены и ее инверсии, открытого в результате большого комплекса исследований и обобщения опыта промышленности.* Это фундаментальное явление обусловлено энергетической целесообразностью перестройки исходной структуры поверхностных слоев материалов в устойчивую форму энергетически наиболее выгодную для данных условий нагружения.

При этом наступает динамическое равновесие и саморегулирование всей термодинамической системы: происходит стабилизация всех явлений контактных взаимодействий.

Приспосабливаемость *– способность системы изменять свои параметры в связи с изменениями в ней самой или в зависимости от условий ее применения с целью повышения эффективности системы; способность системы к адаптации.*

Сущность энергетической приспосабливаемости состоит в том, что топография, структура и свойства дискретной алмазной поверхности круга и квазисплошной – обрабатываемого материала в процессе высокоскоро-

стного контактирования перестраиваются в направлении, энергетически более выгодном в сравнении с исходным состоянием.

Приспосабливаемость реализуется для всех материалов и условий среды в определенных диапазонах параметров нагружения (давления и скорости относительного перемещения). Изложенные представления являются фундаментальной основой для построения физической теории поверхностной прочности и разрушения. В области технических приложений эти представления позволяют решать две группы задач: обеспечение надежности и долговечности узлов трения при эксплуатации машин; разработка эффективных технологических процессов финишной обработки деталей машин.

Вторая возможность связана с инверсией структурной приспосабливаемости – использованием этого явления в направлении интенсификации поверхностного разрушения.

Главным условием оптимального использования любого инструментального материала является такое состояние системы «инструмент–обрабатываемый материал», при котором рабочие поверхности инструментов будут находиться в условиях структурной приспосабливаемости, а поверхности обрабатываемого материала в условиях ее нагружения и ослабления защитных функций вторичных структур.

Вторым примером использования инверсии структурной приспосабливаемости при финишных операциях путем изменения состава среды является резкое увеличение производительности при доводке. При отсутствии возможности восстановления на обрабатываемой поверхности в процессе доводки защитных вторичных структур, экранирующих действие ПАВ, съем металла с обрабатываемой поверхности увеличивается в 1,5 – 2,0 раза.

4.3. Методология изучения процесса шлифования с позиций приспосабливаемости двух взаимодействующих поверхностей

Эффективность любого процесса абразивной обработки определяется уровнем приспосабливаемости взаимодействующих поверхностей и возможностями изменения этого уровня за счет выбора условий шлифования (режимы обработки, введение в зону шлифования дополнительной энергии или ПАВ и т. д.). При традиционном алмазном шлифовании СТМ кругами на металлических связках процесс приспосабливаемости реализуется аномально быстро (1 – 2 минуты) [33]. Пути повышения эффективности данного процесса, в конечном счете, сводятся к регулированию интенсивности процесса приспосабливаемости, т. к. она определяет и производительность обработки, и ее качество, и интенсивность износа рабочей поверхности инструмента.

В отличие от классической теории резания в случае шлифования СТМ нет 1,5–2 кратного превышения твердости инструментального материала над обрабатываемым, нет внедрения алмазных зерен в СТМ, нет четкого понятия толщины среза, а взаимодействующие материалы к тому же имеют предельную в природе твердость, присущую алмазным структурам. Эффективность процесса будет определяется характером и интенсивностью взаимного разрушения элементов системы «обрабатываемый материал–зерно–связка» [33].

В процессе приспосабливаемости энергетические затраты на трение минимизируются, а удельная энергоемкость разрушения (износа) единицы объема материала поверхностного слоя достигают максимума. Перестройка структуры материала поверхностного слоя осуществляется путем перехода к ультрадисперсному тонкопленочному высокопрочному и устойчивому по отношению к физико-химическим воздействиям состоянию. Формируется особая топография поверхности с ультрамалыми размерами субмикронеровностей. Независимо от исходного рельефа, микрогеометрия приработанной поверхности оптимизируется, при одинаковых условиях устанавливается одинаковая (равновесная) шероховатость. Б. И. Костецкий подчеркивает [19], что устойчивое динамическое состояние износостойкости и антифрикционности (фрикционности) реализуются только при условии динамического равновесия и саморегулирования составляющих процессов и соблюдения общих энергетических соотношений:

$$\int_0^V \frac{\Delta E(V)}{A} dV = \min ; \qquad (4.4)$$

$$\frac{A}{И} = \max , \qquad (4.5)$$

где ΔE – изменение поглощенной энергии;

A – работа сил трения;

V – объем материала;

И – величина износа.

Именно в этом случае вторичные структуры, возникающие в процессе структурной приспосабливаемости, концентрируют в себе всю запасенную энергию и тем самым экранируют основной материал твердых тел от механических воздействий (в нашем случае – это может быть графит, выполняющий роль твердой смазки), что и является причиной их максимальной прочности.

Таким образом, *приспосабливаемость следует понимать как способность технической системы «обрабатываемый материал–зерно–связка» приобретать в процессе эволюции свойства, обеспечивающие стабильность ее функционирования, которые обычно характеризуются минимумом энергетических затрат. Приспосабливаемость – способность к самоорганизации технической системы в процессе функционирования.* Она реализуется при изменении свойств элементов системы или окружающей среды. Применительно к предметной области алмазно-абразивной обработки СТМ критерием самоорганизации может служить минимизация энергозатрат функционирования системы.

В качестве основных аспектов приспосабливаемости рассмотрены такие ее составляющие: топографическая, структурно-фазовая и энергетическая.

Топографическая приспосабливаемость включает аспекты изменения геометрических характеристик (параметров) поверхностей элементов системы «РПК–ОМ» (рабочая поверхность круга–обрабатываемый материал). В этом случае теоретически и экспериментально исследовали изменения 3D параметров топографии рабочей поверхности круга (РПК) и обрабатываемого материала и их влияние на эффективность алмазного шлифования.

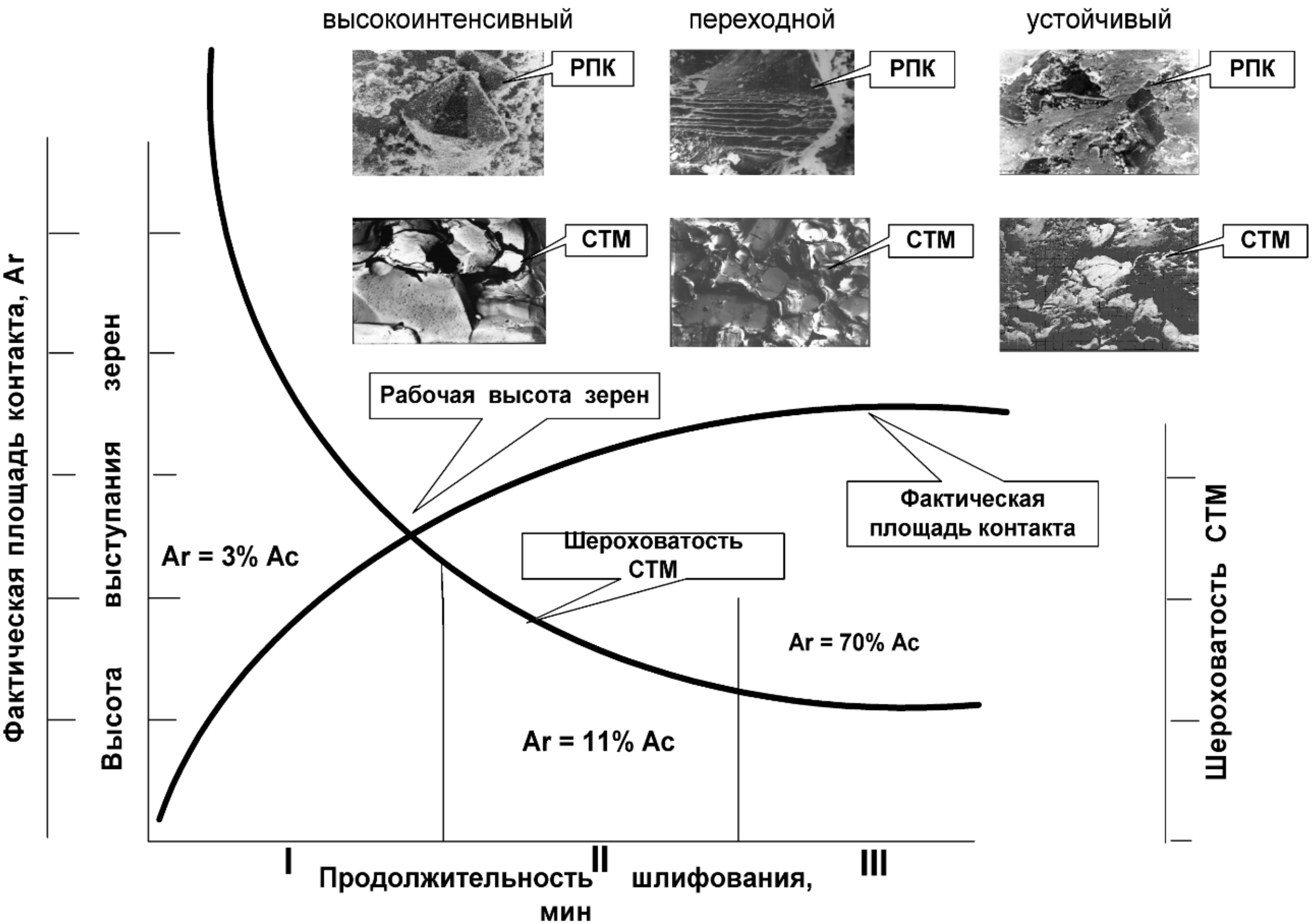
Структурно-фазовая приспосабливаемость включает аспекты, связанные с образованием мелкодисперсных вторичных структур, изменением физико-механических свойств поверхностных слоев контактирующих элементов. Для случая шлифования СТМ рассмотрены элементы структурно-фазовой приспосабливаемости, обусловленные: 1) анизотропией (микроанизотропией) свойств кристаллитов обрабатываемого материала и алмазных зерен, проявляющейся в различной интенсивности износа «твердых» и «мягких» граней, и способствующей изменению их в контакте (исходная и эволюционная анизотропия); 2) миграцией металлофазы к зоне контакта, вызванной существенным различием коэффициентов термического расширения алмаза и металлофазы; 3) элементами анизотропной графитизации и окисления алмазных структур СТМ и зерен.

Энергетическая приспосабливаемость – отражает энергетические аспекты эволюции свойств системы с точки зрения минимизации энергии разрушения. Косвенно характеризуется силами резания, мощностью и удельной энергоемкостью шлифования. Энергетическая приспосабливаемость характеризуется также перераспределением подводимой в зону шлифования энергии между элементами системы «обрабатываемый материал–зерно–связка.

При традиционном алмазном шлифовании кругами на металлических связках практически всех обрабатываемых материалов можно выделить три этапа приспосабливаемости. Первый этап (после правки круга) – чрезвычайно интенсивного изменения всех показателей (соответствует катастрофическому износу в процессах трения), второй этап – переходной и третий – установившийся (соответствует периоду нормального износа в процессах трения), представляющий процесс трения износостойкой пары «алмаз–алмаз».

В соответствии с этим рассматриваем три этапа приспосабливаемости при традиционном алмазном шлифовании СТМ кругами на металлических связках): высокоинтенсивный (I), переходной (II), устойчивый (III) (рис. 4.1).

На первом этапе алмазные зерна и обрабатываемая поверхность СТМ подвергаются преимущественно хрупкому микроразрушению; на втором этапе процесс дополняется влиянием термоактивируемых процессов; в третьем – преимущественную роль играют только термоактивируемые процессы. Характерным показателем этого периода является массовое образование на алмазных зернах площадок износа.


высокоинтенсивный
переходной
устойчивый
РПК
РПК
РПК
СТМ
СТМ
СТМ
Рабочая высота зерен
Фактическая площадь контакта
Шероховатость СТМ
Ar = 3% Ac
Ar = 11% Ac
Ar = 70% Ac
Фактическая площадь контакта, Ar
Высота выступания зерен
Шероховатость СТМ
I
II
III
Продолжительность шлифования, мин

В эти периоды практически в полной закономерной связи изменяются как параметры взаимодействующих поверхностей – фактическая площадь контакта, число зерен с площадками износа, шероховатость обработанной поверхности, рабочая (в нашем случае – наибольшая) высота выступания зерен из связки, так и выходные показатели процесса шлифования – производительность, удельный расход, удельный износ, коэффициент шлифования, удельная энергоемкость. Продолжительность этих периодов для различных марок обрабатываемых материалов различна (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Зависимость продолжительности периодов шлифования от марки обрабатываемого материала

Обрабатываемый материал	Продолжительность периода, с		
	интенсивный	переходный	устойчивый
АСПК	до 20	20–50	св. 50
АСБ	35	35–90	св.80
Диамет	40	40–80	св.80
ДАП	50	50–100	св.100
Эльбор-Р	170	170–240	св.240
Гексанит-Р	210	210–270	св.270
ДПНБ	250	250–300	св.300
КНТ-16*	350	350–370	св.370
ВК-20*	920	920–960	св.960
ВОК-60*	1200	1200–1400	св.1400
Корундовая керамика*	1700	1700–1900	св.1900
ЭИ-765*	1300	1300–1500	св.1500
Медь*	1800	1800–1900	св.1900

Примечания:

Общие условия: Круг 12А2-45 150×10×3×32 АС6 50/40 М6-14 4; $P_{н} = 2{,}0$ МПа; $V_{кр} = 30$ м/с; $S_{пр} = 1$ м/мин.

**Данные получены Наконечным Н.Ф.* (*Данные получены Наконечным Н.Ф.)

Изменение всех этих параметров адекватно может быть описано зависимостью типа:

$$A = K \cdot \tau^{c},$$

где *A* – показатель процесса приспосабливаемости; *K*, *c* – коэффициент и показатель степени, зависящие от условий шлифования; τ – время шлифования.

Такая синхронность изменения параметров приспосабливаемости взаимодействующих поверхностей и выходных показателей процесса алмазного шлифования даже при предварительном анализе позволяет судить об их тесной взаимосвязи и, как следствие, возможности управлять одними посредством других.

Приспосабливаемость при алмазном шлифовании не может быть реалистично изучена при раздельном исследовании процесса износа алмазного круга и съема припуска в силу взаимовлияния явлений, происходящих как на поверхности круга, так и на обработанной поверхности. Поэтому процесс приспосабливаемости проанализирован при изучении поведения единой системы «обрабатываемый материал–зерно–связка» в процессе шлифования с учетом изменения геометрических и физико-механических свойств ее элементов.

Установлено, что наиболее тесная корреляционная связь наблюдается между производительностью шлифования и относительной величиной фактической площади контакта, а шероховатость обработанной поверхности наиболее тесно связана с относительной опорной площадью РПК.

Таким образом, аномально быстрое изменение удельной интенсивности алмазного шлифования СТМ при упругой схеме обработки определяется резким увеличением относительной фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ», резким уменьшением величины удельных нагрузок и, как следствие, – снижением удельной интенсивности шлифования (табл. 4.2).

Относительная величина фактической площади контакта (далее – фактическая площадь контакта) принята в качестве основного топографического параметра приспосабливаемости. Интенсивное изменение всех выходных показателей связано с увеличением фактической площади контакта не только за счет износа зерен и образования на них площадок износа, но и за счет сглаживания шероховатости обработанной поверхности СТМ. По микрофотографиям рабочей поверхности круга и обработанной поверхности СТМ, снятым в различные периоды приспосабливаемости, можно отчетливо проследить синхронность их изменения с изменением величины фактической площади контакта в системе «РПК – СТМ» (см. рис. 4.1).

Таблица 4.2 – Удельная интенсивность шлифования $C_{уд}$, мм^3/мин Н·10^3

Марка СТМ	Относительная величина фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ», %					
	0,1	1	7	25	45	60
АСПК	75	46	29	11	4	1
АСБ	125	79	51	21	8	1
ДАП	193	131	88	41	19	3
Эльбор-Р	912	718	506	453	438	311
Гексанит-Р	1102	620	406	292	210	121
Диамет	205	152	111	63	34	2
ДПНБ	1106	789	622	409	307	302
КНТ-16*	9600	7300	6500	5400	4700	3700
ВК-20*	18300	12500	8700	7400	6300	5800
ВОК-60*	54300	49600	43200	39600	35700	31600
Корундовая керамика*	62600	58600	52700	48600	41500	38500
ЭИ-765*	9400	8400	7300	6700	5480	4740
Медь*	12000	9800	8700	7300	6500	5870

Примечания:

Общие условия: Круг 12А2-45 150×10×3×32 АС6 50/40 М6-14 4; $P_н = 2{,}0$ МПа; $V_{кр} = 30$ м/с; $S_{пр} = 1$ м/мин.

**Данные получены Наконечным Н.Ф.*

Важнейшим показателем при этом будет является относительная опорная площадь топографии РПК $t_{psРПК}$ и обрабатываемого СТМ $t_{psСТМ}$, которая определяется методом лазерного сканирования. Увеличение $t_{psРПК}$ и $t_{psСТМ}$ приводит к росту фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ» и, как следствие, уменьшению давлений в контакте. Трансформация механизмов разрушения обусловлена существенным уменьшением контактных напряжений при образовании на зернах площадок износа. Исследования 3D напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «обрабатываемый материал–зерно–связка» показали, что образование площадок износа при одних и тех же условиях может в 5–10 раз уменьшить при одних и тех же условиях может в 5–10 раз уменьшить величину приведенных напряжений в контакте «РПК–СТМ». Так, при одних и тех же условиях нагружения системы образование площадок износа на алмазных зернах уменьшает величину приведенных напряжений даже в контакте острого зерна в 5 раз (рис. 4.2). При этом даже при увеличении поперечной подачи до $S_{\text{поп}} = 5$ мкм/дв.ход напряжения в контакте «зерно–обрабатываемый материал» не достигают критических, т. е. процесс съема припуска прекращается. Вместе с тем чрезмерно высокие суммарные давления на СТМ могут привести к макроразрушению (объемному растрескиванию) обрабатываемой поверхности, т.е. браку при обработке.

При отсутствии контакта связки с обрабатываемым СТМ при шлифовании по упругой схеме использование величины нормального давления $P_{\text{н}} = \dfrac{P}{A_c}$ в традиционном понимании как отношения нагрузки в контакте P к номинальной площади контакта РПК с СТМ A_c не корректно, т. к. в этом случае, например, при шлифовании ДАП фактическая площадь контакта по мере приспосабливаемости изменяется от 0,001 до 12 мм^2, т.е. более чем в 10000 раз и, следовательно, фактические давления изменяются во столько же раз. Для того, чтобы сохранить производительность, соответствующую первому этапу обработки, т.е. сохранить фактические давления на том же уровне, следует нагрузку в контакте «СТМ–РПК» увеличить в 10000 раз и при обработке, например, ДАП она должна составлять 100 кН, что естественно приведет к объемному разрушению СТМ (браку при обработке). Таким образом, для корректного использования упругой схемы шлифования в условиях отсутствия контакта связки с обрабатываемым материалом необходимо учитывать коэффициент изменения фактической площади контакта K, равный: $K = A_r / A_c = P_{\text{н}} / P_{\text{ф}}$, где A_r – фактическая площадь контакта; A_c – номинальная площадь контакта; $P_{\text{ф}}$– фактическое нормальное давление в контакте «РПК–СТМ», $P_{\text{н}}$ – номинальное (задаваемое) давление.

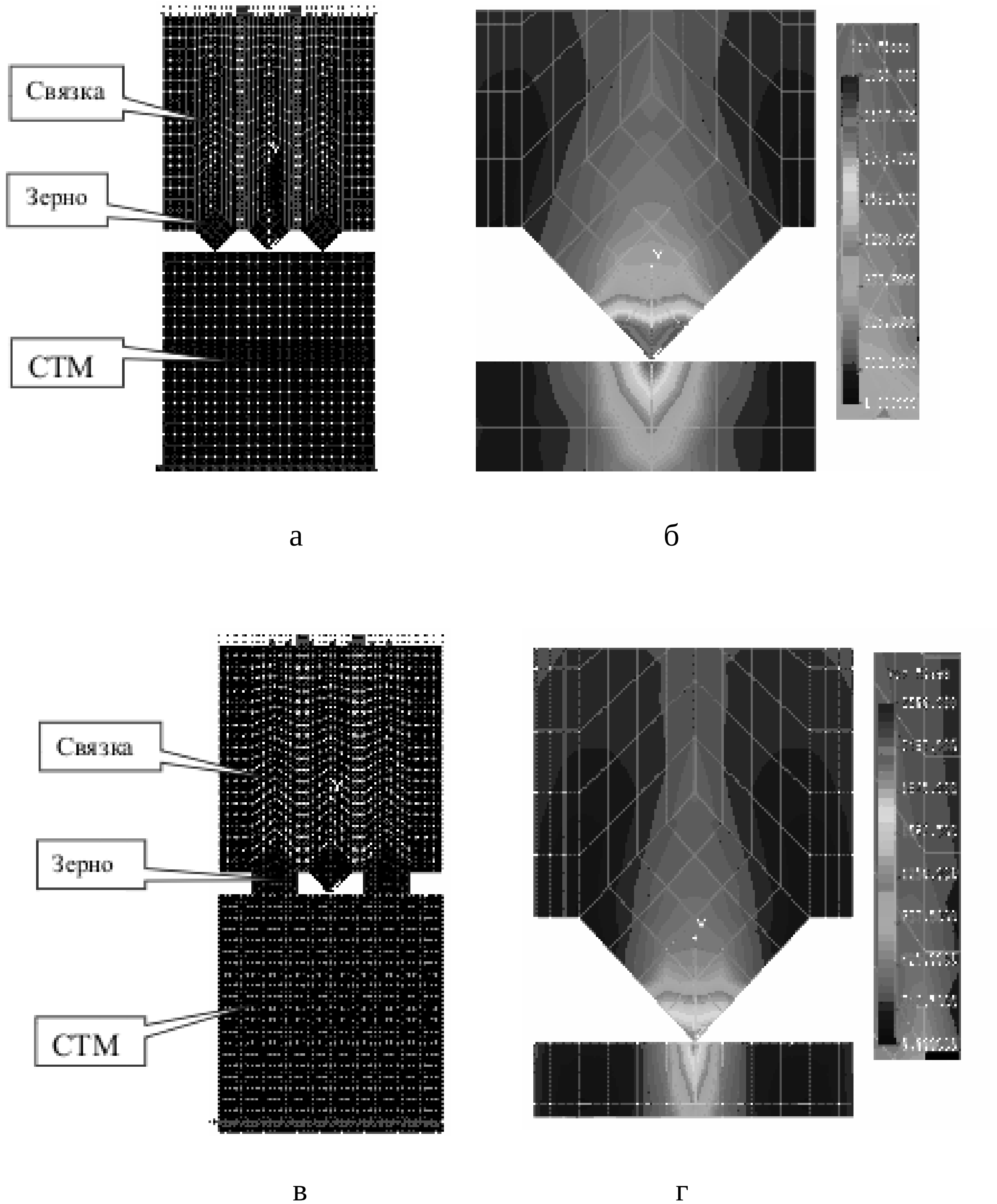


Рисунок 4.2 – Влияние зерен с площадками износа на НДС системы «СТМ–зерно–связка»:

а – расчетная схема; б – приведенные напряжения в среднем зерне;
в – расчетная схема; г – приведенные напряжения в среднем зерне

Изучение процесса приспосабливаемости должно базироваться на комплексном теоретическом и экспериментальном одновременном изучении изменения 3D параметров рабочей поверхности круга и обработанной поверхности и исследовании соответствующего изменения 3D напряженно-деформированного состояния единой системы «обрабатываемый материал–зерно–связка». Такой подход позволяет в условиях, максимально приближенных к реальным, изучить в трехмерном измерении поведение зоны шлифования в процессе обработки, в том числе более глубоко изучить процесс приспосабливаемости с учетом, например, таких взаимосвязей как: 1) влияние физико-механических свойств связки на величину напряжений в контакте «зерно–обрабатываемый материал» и, как следствие, на интенсивность съема припуска и износа зерен; 2) влияние физико-механических свойств обрабатываемого материала на величину критической заделки алмазных зерен в связке и, следовательно, на величину удельного расхода; 3) взаимовлияние физико-механических свойств обрабатываемого материала, алмазных зерен и связки на величину их напряженно-деформированного состояния и их оптимальное сочетание.

С учетом изложенных выше особенностей развития приспосабливаемости в системе «алмазный круг – шлифуемый обрабатываемый материал» представляется целесообразным и возможным повышать эффективность алмазного шлифования не только за счет осуществления инверсии процесса приспосабливаемости, но и управления ею во всем диапазоне. Например, введение энергии ультразвуковых колебаний в зону шлифования и в зону управления использованы при разработке способов управления процессом приспосабливаемости.

4.4. Исследование 3D параметров рабочей поверхности алмазных кругов и обработанной поверхности методом лазерного сканирования

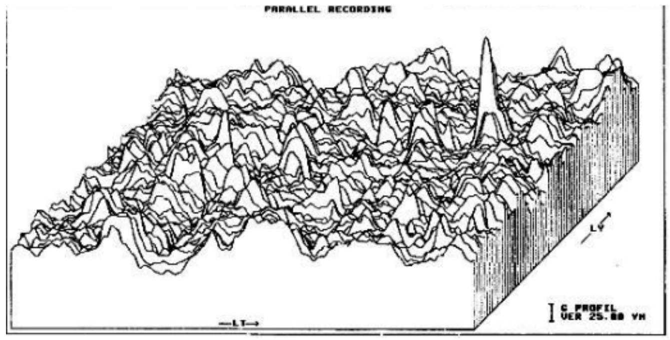
Широко применяемые методы профилографирования при исследовании параметров рабочей поверхности кругов (РПК) с целью изучения изменения их в процессе износа круга имеют ряд существенных недостатков, главные из них – искажающее влияние радиуса ощупывающей иглы [29], особенно при изучении субмикрорельефа алмазных зерен и связки.

Поэтому предпочтительной является современная методика лазерного сканирования применительно к изучению 3D параметров топографии обработанной поверхности обрабатываемого материала и РПК не только лишена этого недостатка, но и обладает рядом принципиальных достоинств, в том числе повышенной точностью, более широким спектром изучаемых параметров, меньшей трудоемкостью.

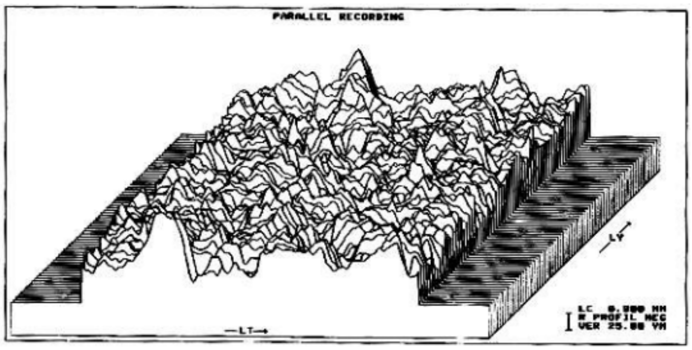
Исследование 3D топографии рабочей поверхности алмазных кругов и поверхности обрабатываемого материала проводилось на лазерном сканирующем приборе «Perthometer S8P» с лазерным датчиком модели FOCODYN, диапазон вертикального разрешения которого составлял ±250 мкм, что вполне достаточно для измерения высотных параметров РПК кругов зернистостью до 630/500 (рис. 4.3 а). Прибор позволяет одновременно фиксировать 9 выбранных из 86 возможных параметров топографии РПК. Существенным достоинством данного прибора является синхронная компьютерная обработка результатов измерения.

Исходя из анализа влияния параметров РПК на выходные показатели процесса алмазного шлифования обрабатываемого материала, установленного ранее [9], целесообразно рассматривать следующие параметры (условные обозначения параметров заложены в процессоре измерительного центра и соответствуют рис. 4.3 – 4.5):

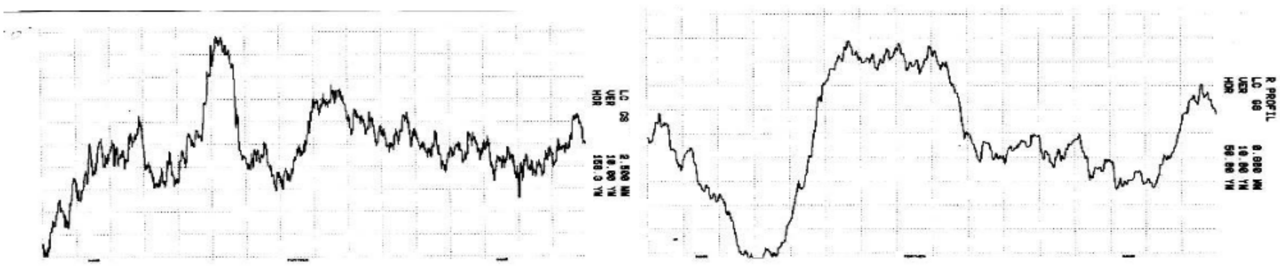
RP – высота от вершины зерен до средней линии; RA – аналог стандартного параметра R_a*; RQ – среднеквадратичное отклонение профиля; RT – максимальная высота неровностей профиля; RSM – средний шаг неровностей профиля; RSK – асимметрия закона распределения неровностей профиля; RZISO – высота неровностей по десяти точкам (*R_z*); TPK –относительная опорная площадь поверхности; X – среднее значение параметра; S – отклонение от стандарта; R – разность между максимальным и минимальным значениями; (диапазон рассеяния); VER – вертикальное увеличение; HOR – горизонтальное увеличение; LT – общая длина трассы сканирования; GS – элементарная (базовая) длина сканирования.*



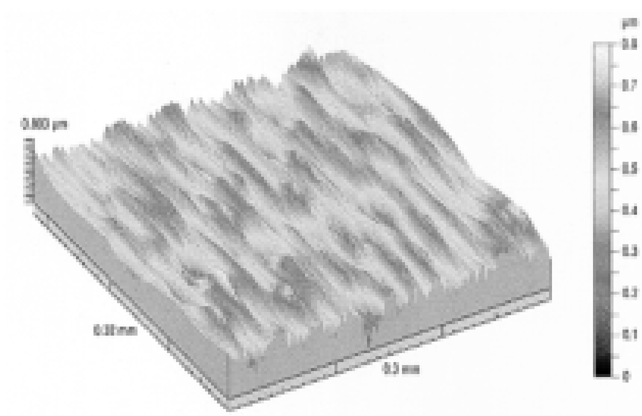
а б



в



г



д

Рисунок 4.3 – К методике лазерного сканирования рабочей поверхности круга и СТМ:
а – лазерный измерительный центр; б – топография РПК (без фильтра); в – топография РПК (с фильтром); г – субмикропрофиль зерна; д – топография поверхности СТМ

Лазерный измерительный центр позволяет получать визуальное изображение 3D топографии как непосредственно РПК (позитив), так и его отпечатка (негатива), обозначаемой на рис. 4.3 б, в символом NEG. Топография РПК может быть получена как с учетом волнистости поверхности (рис. 4.3 б), так и без, т.е. в отфильтрованном виде (рис. 4.3 в).

Анализ поверхности реплики (NEG) РПК показывает, что основная масса зерен выпадает из связки только в первые секунды шлифования, т.е. параметры негатива РПК в выступающей части практически одинаковы для 3 секунд и 2 минут шлифования (рис. 4.4 и 4.5).

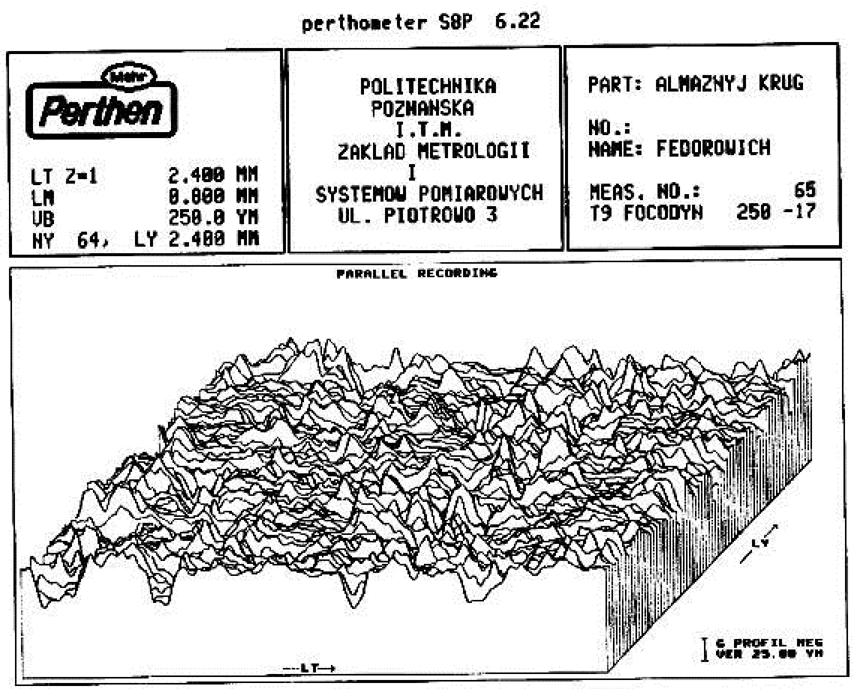


Рисунок 4.4 – Негатив 3D топографии рабочей поверхности алмазного круга после 10 сек шлифования

Такой вывод важен для изучения характера износа рабочей поверхности круга, т. е. после 3 секунд шлифования с достаточной точностью можно считать, что основной износ зерен происходит за счет их хрупкого микроразрушения, а не выпадения из связки.

Применительно к процессу алмазного шлифования обрабатываемого материала, когда практически отсутствует внедрение алмазных зерен и работают субмикрокромки алмазных зерен, особый интерес представляют *параметры микрорельефа отдельных алмазных зерен.* Существенным достоинством методики лазерного сканирования является возможность идентифицировать зерно и связку и изучать параметры микрорельефа отдельных алмазных зерен (рис. 4.3 г). При изучении 3D топографии РПК с малым шагом сканирования в нашем случае, равном 2,38 мкм, лазерный луч по каждому алмазному зерну размером 100 мкм пройдет более 30 раз.

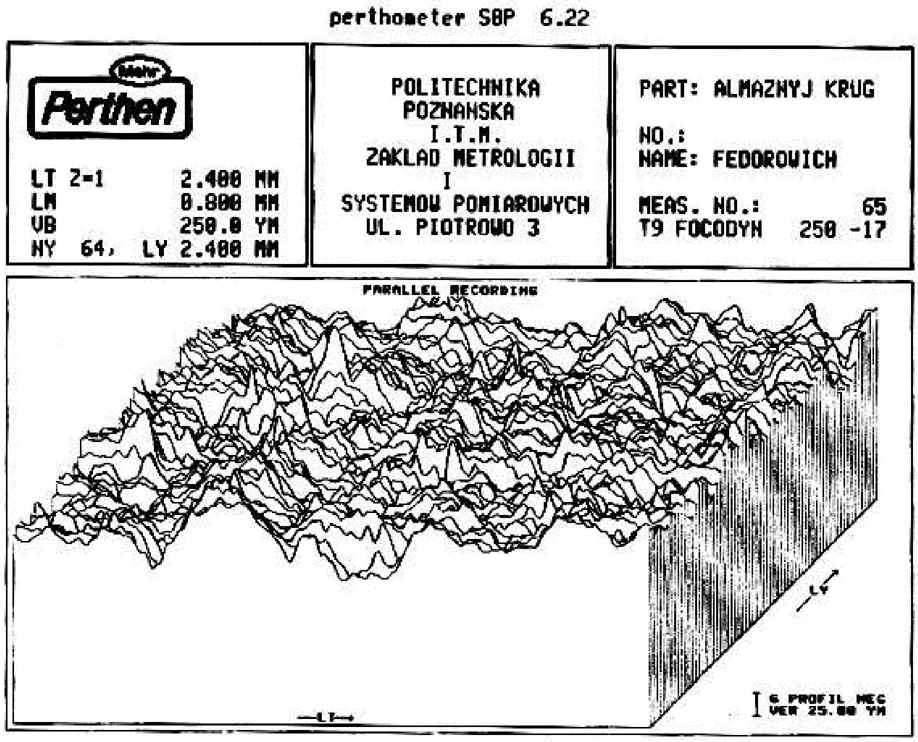


Рисунок 4.5 – Негатив 3D топографии рабочей поверхности алмазного круга после 2 мин шлифования

Особое значение имеет параметр относительная опорная площадь поверхности (t_{ps}), которая в большой степени определяет величину фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ».

С учетом того, что установленная нами при 3D моделировании напряженно-деформированного состояния системы «СТМ–зерно–связка» величина упругого внедрения зерна в СТМ не превышает 0,5 – 1 мкм, величину t_{ps} будем определять на уровне 1 мкм от максимально выступающего зерна, т.е. на уровне P = 5 % при h_p = 20 мкм.

Методика лазерного сканирования позволяет в 3D варианте в компьютерном режиме определять величину t_{ps} как на макроуровне (РПК поверхности круга), так и на микроуровне – субмикрорельеф отдельных алмазных зерен. *Величина развитости, «шероховатости» рабочей поверхности отдельных алмазных зерен является важным параметром при определении фактической площади контакта в системе «СТМ–зерно», который сложно получить другими способами.* Величина относительной опорной площади профиля РПК на уровне 0 – 1 мкм (субмикрорельеф зерен) будет использована при определении величины фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ».

Если проанализировать динамику изменения параметра t_{ps} на уровне P = 5 %, что адекватно фактической площади контакта в системе «СТМ–зерно», то у вновь заправленного электрохимическим методом круга (рис. 4.6) t_{ps} возрастает медленно по глубине топографии РПК, что свидетельствует о высокой остроте зерен, а у изношенного круга t_{ps}. резко возрастает из-за массового образования на зернах площадок износа (рис. 4.7). Анализ динамики изменения параметра t_{ps} по глубине профиля одного и того же круга, но работающего в различных условиях, позволяет судить о динамике изменения величины фактической площади контакта в системе «РПК– СТМ».

Значительный практический и методический интерес представляет метод фильтрации, которым обладает лазерный сканирующий измерительный центр. Фильтрация позволяет отделить волнистость макропрофиля РПК от рельефа алмазных зерен над уровнем связки. Такая методика особенно важна при анализе роли процесса управления продольным и поперечным профилем РПК [9].

Существенным достоинством данной методики является компьютерная обработка результатов сканирования и построение законов распределения высоты зерен над уровнем связки (см. рис. 4.3 д) *и их изменения в процессе шлифования.* Таким образом, методика лазерного сканирования рабочей поверхности круга позволяет успешно решить проблему о законах распределения алмазных зерен над уровнем связки, которой занимались многие исследователи [4].

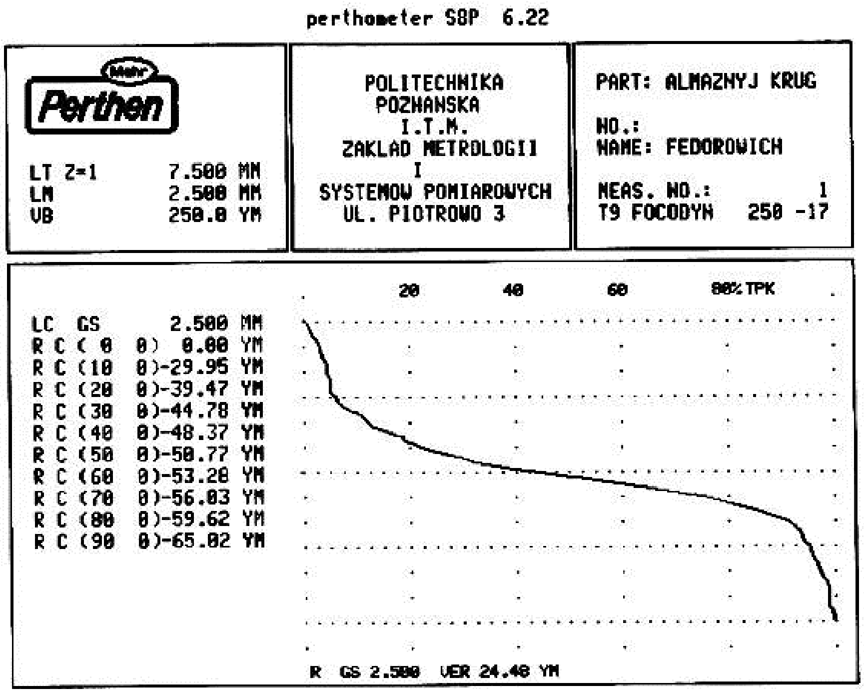


Рисунок 4.6 – Относительная опорная площадь РПК после правки

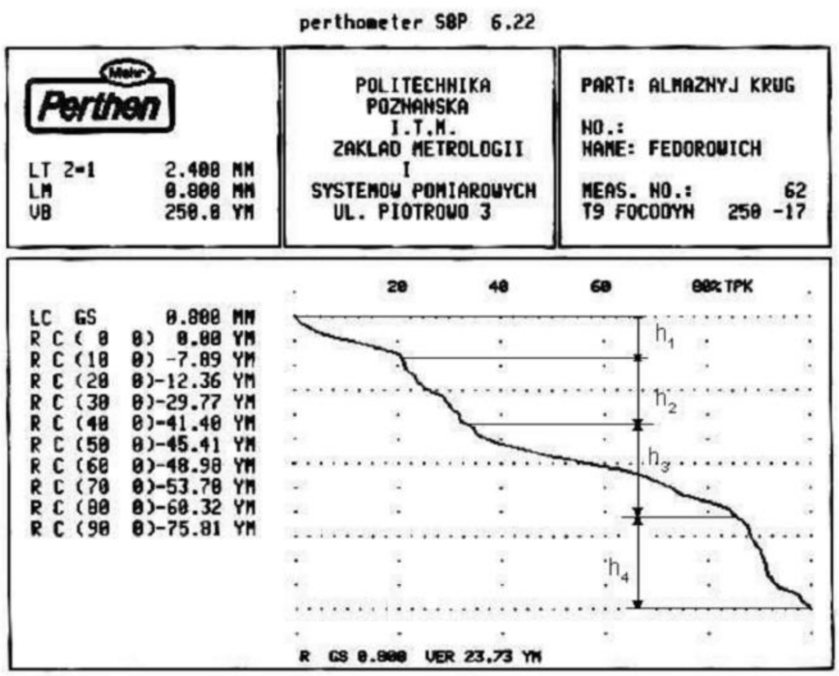


Рисунок 4.7 – Относительная опорная площадь РПК после 2-х мин шлифования

С использованием этой же методики исследовались и параметры топографии обработанной поверхности СТМ, граней и режущей кромки резцов из СТМ и их зависимость от условий обработки (см. рис. 4.3 д). Можно предположить, что наиболее эффективным параметром оценки качества обработанной поверхности СТМ будет являться не традиционно применяемые параметры шероховатости R_a и R_z, а относительная опорная площадь поверхности t_{ps}, измеряемая методом лазерного сканирования.

4.5. Методика определения фактической площади контакта в системе «СТМ–зерно–связка»

Характер и интенсивность взаимного микроразрушения элементов системы «СТМ–зерно–связка» в большой степени определяется величиной фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ». Наиболее изучено контактирование шероховатых поверхностей с учетом вероятности встречи выступов, моделированных в виде стержней, сфер или эллипсоидов в работах Н.Б. Демкина, И.В. Крагельского, Э.В. Рыжова, И.Х. Чеповецкого [12, 16, 32].

Принципиальным отличием процесса взаимодействия в системе «РПК–СТМ» от рассматриваемого при трении и износе является то, что контактируют принципиально различные по топографии поверхности. Одна из них РПК – дискретная, другая СТМ – квазисплошная. Контактируют практически идеально жесткие алмазные материалы, причем дискретную поверхность РПК формируют алмазные зерна, закрепленные в относительно пластичном материале-связке.

Выполненные опыты показали, что с увеличением нагрузки размер пятен упругого контакта растет незначительно, а фактическая площадь контакта повышается в основном за счет увеличения их количества (упругое вдавливание зерен в связку). Рассмотрим следующие параметры площади контакта в системе «РПК–СТМ»:

1) номинальная A_a, определяемая геометрическими размерами контактирующих поверхностей; 2) контурная A_c, обусловленная площадками *контакта, возникающими из-за макрогеометрических отклонений; 3) фактическая (физическая) A_r, представляющая собой сумму фактических участков соприкосновения инструмента и детали, через которые передается давление.*

Поскольку определяющую роль играет не общая фактическая площадь контакта A_r, а удельная, приходящаяся на каждый отдельный контакт, т.е. на макроуровне это $A_{r\,\text{уд}} = \frac{A_r}{n}$, где n – число зерен в контакте, очевидно, что чем мельче зерна, тем меньше величина пятен контакта, тем больше напряжения в контакте.

На микроуровне $A'_{r\,\text{уд}} = \frac{A_r}{n n_1}$, где n_1 – число субмикрокромок на зерне, находящемся в контакте.

Исходной для расчета фактической площади контакта является формула определения среднего давления при упругой деформации сферических выступов по Герцу [44]:

$$\bar{q} = \frac{0,43 H_{\max} E^{0,5}}{I P^{0,5}}, \tag{4.6}$$

где E – относительное сближение контактирующих поверхностей;

I – упругая постоянная контакта;

P – приведенный радиус контактирующих сфер;

$H_{\max}$ – расстояние между линией выступов и линией впадин профиля.

При моделировании процесса контактирования в системе «РПК–СТМ» предполагается, что алмазные зерна могут упруго вдавливаться в связку при контактировании с микронеровностями СТМ.

Фактическая площадь контакта по Н.Б. Демкину [12] при упругой деформации микровыступов рассчитывается по формуле:

$$A_r = A_c \left\{ \frac{2,35 b^{\frac{1}{2\delta}} r^{\frac{1}{2}} \left(1 - \mu^2\right) N}{2^{\frac{1}{2\delta}} K_2 h_{\max}^{\frac{1}{2}} E A_c} \right\}^{\frac{2\delta}{2\delta+1}}, \tag{4.7}$$

где K_2 – постоянная интегрирования, величина, которая зависит от численного значения δ;

N – нормальная нагрузка, Н;

μ – коэффициент Пуассона связки;

E – модуль упругости связки, ГПа;

r – радиус кривизны вершин зерен, мкм;

$h_{\max}$ – максимальная высота выступания зерен из связки;

b и δ – параметры опорной кривой рельефа РПК.

Под действием усилия прижима поверхности инструмента и детали сближаются. Сближение может в большой степени не соответствовать глубине упругого внедрения алмазов в обрабатываемый СТМ, т. к. при контактном взаимодействии они перемещаются в связке, а величина и характер этого перемещения изменяются в широком диапазоне в зависимости от физико-механических свойств связки.

По данным Н.Б. Демкина увеличение фактической площади контакта с ростом нагрузки осуществляется за счет «смятия» микронеровностей и поэтому в зависимости (4.7) учитывается модуль упругости контактирующих материалов E. Поскольку в нашем случае «смятием» микрогребешков можно пренебречь, а увеличение фактической площади контакта с ростом нагрузки будет происходить в основном за счет заглубления зерен в связку, с определенными допущениями в зависимостях Н.Б. Демкина использовали не модуль упругости контактирующих материалов (зерна и СТМ), а модуль упругости металлической связки.

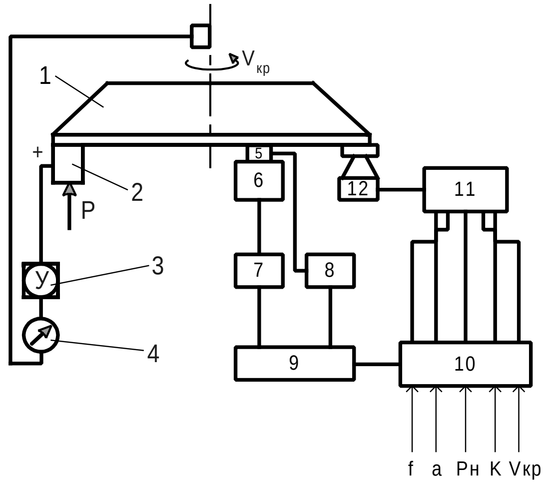
Применительно к определению фактической площади контакта способ лазерного сканирования с компьютерной обработкой результатов измерения эффективен тем, что позволяет оценивать параметр t_{ps} – относительную опорную площадь на любом уровне высоты рельефа, т. е. при различных степенях приспосабливаемости системы «РПК–СТМ». Учитывая возможности данной методики отфильтровывать макрорельеф, например, волнистость, полученная величина t_{ps} на уровне 0 – 1 мкм (упругое вдавливание зерен в связку) является адекватной фактической площади контакта при допущении, что поверхность СТМ идеально гладкая. Аналогичным образом, получив компьютерную зависимость относительной опорной площади поверхности СТМ, можно по этим зависимостям прогнозировать и определять величину фактической площади контакта при любой степени приспособленности в системе «РПК–СТМ». Еще одно существенное достоинство метода лазерного сканирования – возможность количественно оценивать параметры микрорельефа отдельных алмазных зерен, которые используют в формулах Н.Б. Демкина и И.В. Крагельского при определении фактической площади на микроуровне.

Экспериментальное определение величины фактической площади контакта РПК с обрабатываемым СТМ можно проводить также по отпечаткам на фольге, сдавливаемой с реально используемым при шлифовании нормальным давлением усилием $P_н$ между кругом и обрабатываемым СТМ.

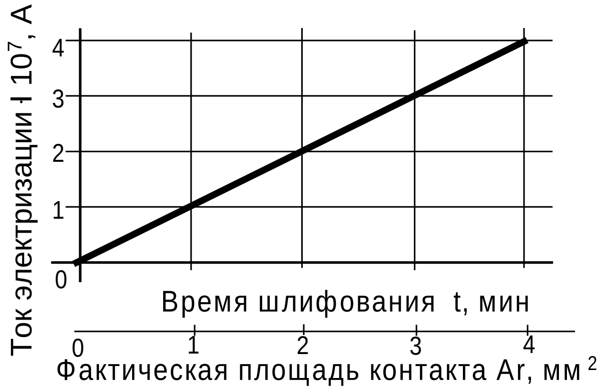
4.6. Методика оценки степени приспосабливаемости при шлифовании

Методика основана на использовании склонности алмаза к электризации его поверхности при трении пары «алмаз–алмаз».

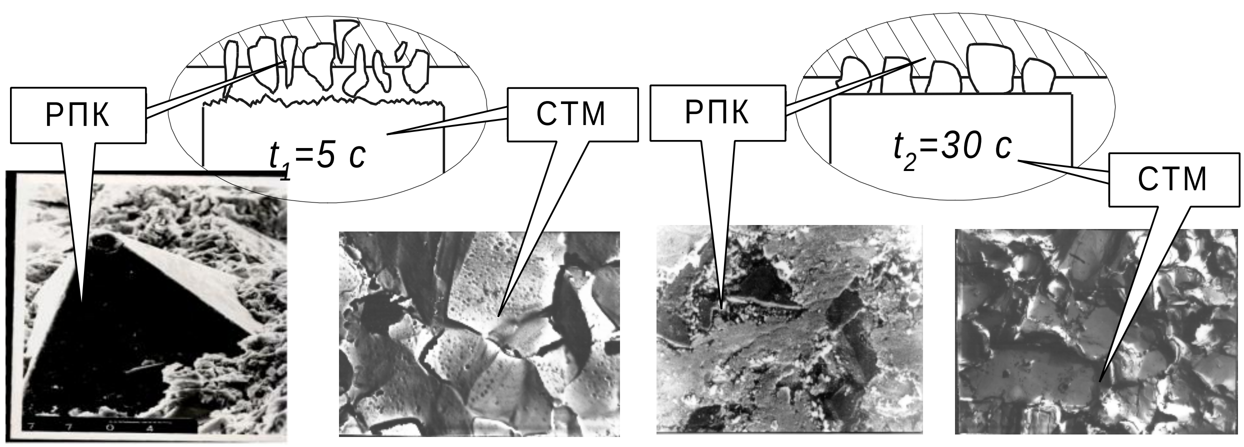
Как известно, распиливание кристаллов алмаза сопровождается интенсивной статической электризацией. На этом принципе основано определение эффективности разрезки природных алмазов. Величина тока электризации достигает несколько сот наноамперов и выбор его в качестве управляющего сигнала для включения цепи управления РПК обусловлен тем, что его проще регистрировать, чем, например, электронную или фотоэмиссию. Известно, что по мере износа алмазного круга и его приспосабливаемости на зернах образуются площадки, и процесс трансформируется в трение износостойкой пары «алмаз–алмаз» или «алмаз–связка». По мере увеличения площадок износа растет и ток электризации. На использовании эффекта электризации трущихся алмазных поверхностей разработана оригинальная методика определения степени топографической приспосабливаемости взаимодействующих поверхностей алмазного круга и обрабатываемого СТМ (рис. 4.8 а, в). График зависимости тока электризации от величины фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ» представлен на рис. 4.8 б.



а



б



в

Рисунок 4.8 – К методике оценки уровня приспосабливаемости при шлифовании СТМ:

а – электрическая схема оценки приспосабливаемости; б – зависимость тока электризации от фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ»; в – фотографии поверхности РПК и СТМ.
1 – алмазный круг; 2 – шлифуемый образец; 3 – усилитель сигнала; 4 – микровольтамперметр; 5 – съемник; 6 – вибропреобразователь; 7 – генератор; 8 – усилитель; 9 – синхронный резистор; 10 – микроконтроллер; 11 – схема управления 12 – исполнительный механизм.

Условные обозначения: *f* – частота ультразвуковых колебаний; *a* – амплитуда; $P_н$ – нормальное давление; *K* – концентрация; $V_{кр}$ – скорость круга

Поскольку величина тока электризации мала, а наличие электролита вносит дополнительные сложности при регистрации сигнала, предложена специальная электрическая схема (рис. 4.8 а). Для снятия с площадок износа электрического тока малой величины используется электродинамический съемник 5 с вибропребразователем 6, модуляция емкости которого осуществляется за счет изменения величины промежутка между площадками износа на алмазных зернах и пластиной конденсатора. Снятый сигнал малой величины усиливается электрометрическим усилителем 3 и синхронизируется с работой генератора 7 синхронным резистором 9. Усиленный сигнал подается на микроконтроллер 10, запрограммированный на включение через схему управления 11 любых параметров комбинированного управления РПК, т. е. может изменяться величина тока в цепи управления, скважность, частота и энергия импульсов, амплитуда и частота ультразвукового воздействия на зерна круга и т. д.

Величина снимаемого по разработанной схеме электрического потенциала зависит от количества и величины площадок износа на алмазных зернах и, как следствие, от величины фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ». Таким образом, по величине снимаемого электрического сигнала делается заключение об уровне топографической приспосабливаемости поверхностей РПК и СТМ.

Этот подход может быть использован и при разработке адаптивной системы комбинированного управления режущим рельефом круга.

4.7. Исследование параметров РПК и обработанной поверхности методом цветометрического компьютерного сканирования

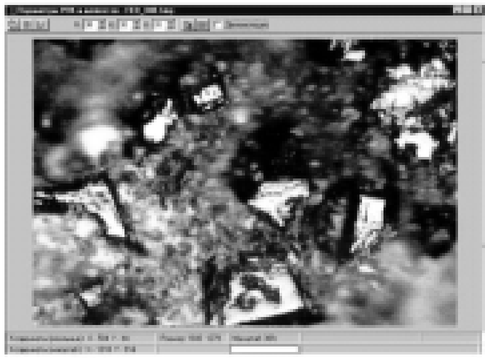
Сложность структуры алмазоносного слоя, развитость режущего рельефа алмазных кругов затрудняют оптическое исследование их рабочей поверхности. Однако ряд задач такого характера можно решать с помощью металлографических микроскопов с применением специальных методик, которые позволяют получать высокое разрешение при изучении деталей рельефа высотой до 100 ... 160 мкм.

При помощи перпендикулярно падающих поляризованных лучей света при больших увеличениях были получены снимки непосредственно с поверхности круга. В этом случае часть изображения формируется за счет некогерентных рассеянных лучей. Составляющие поверхности алмазного круга и обработанной поверхности СТМ изучались с использованием цветового контраста фаз в поляризованном свете. Каждая фаза имеет свои оптические свойства, определяющие собственные слабые деполяризационные рефлексы. Благодаря различной окраске легко дифференцируются такие составляющие алмазоносного слоя как карбид бора, алмаз, бронза и т.д.

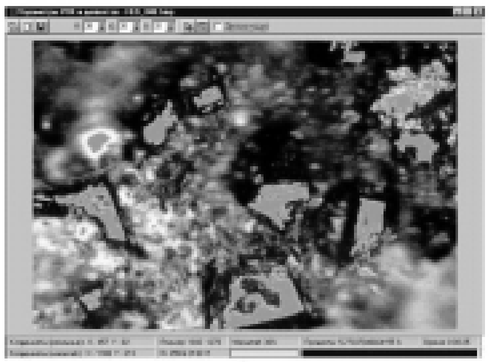
Используя различную окраску площадок износа на алмазных зернах, а также различный цвет микрополостей на поверхности СТМ, разработали специальную программу, позволяющую в компьютерном режиме определять процентное содержание площадок износа на зернах на поверхности РПК и дефектов на поверхности СТМ.

Разработанная программа позволяет автоматически определять процентное содержание площадок износа на алмазных зернах и относительную площадь микродефектов на обработанной поверхности СТМ.

С помощью сканера фотография рабочей поверхности круга или обработанной поверхности СТМ в поляризованном свете (рис. 4.9 а) оцифровывается и сохраняется в файле с расширением *.bmp. Созданный файл открывается в программе (рис. 4.9) и перемещением манипулятора «мышь» с нажатой левой клавишей по изображению площадок износа или микрополости (металлофазы) выбирается их цвет для вычисления процентного содержания площадок износа на поверхности РПК. Программа позволяет выбирать объекты одного или нескольких цветов и суммирует результат. Так как в фотографиях различаются около 16 миллионов цветов и их оттенков, то для более точного вычисления количества пикселей заданного цвета в программе предусмотрено изменение величин (R, G, B) – составляющих. Это позволяет подсчитать не только основной цвет, выбранный пользователем, но и его ближайшие оттенки, количество которых также выбирает пользователь.



Фотография поверхности РПК в поляризованном свете в исходном состоянии



Фотография поверхности РПК в поляризованном свете после цветометрического анализа

и дефектов поверхности СТМ

В связи с разработкой программного продукта на языке программирования высокого уровня Borland Delphi 5.0 для Windows 95/98 или выше возникают некоторые требования к вычислительной технике, на которой будет эксплуатироваться программный продукт. Минимальные требования к вычислительной технике определяются требованиями для Windows 95/98 или выше и составляют: 1) IBM PC AT совместимый компьютер с процессором 486SX-33 или более мощным; 2) видео карта VGA емкостью не менее 512 Кбайт; 3) объем ОЗУ не менее 16 Мбайт; 4) НЖМД (винчестер) не менее 40 Мбайт; 5) Windows 95/98 или выше.

Выбор языка программирования Delphi связан с удобством обработки очень объёмных структур данных, а также с возможностью реализации удобного интерфейса (см. рис. 4.9).

Использование разработанной методики существенно сокращает трудоемкость и время экспериментального изучения параметров РПК и структуры обработанной поверхности СТМ. Полученные результаты использованы при определении фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ».

Сравнение результатов изучения относительной площади площадок износа на зернах РПК по данной методике с методикой лазерного сканирования для определения параметра относительной опорной площади РПК подтвердило ее достаточную точность.

4.8. Методика исследования 3D напряженно-деформированного состояния зоны шлифования

Если материал сохраняет свойство линейной упругости вплоть до разрушения, например, алмаз, за исключением небольшой окрестности вершины трещины, то учет влияния трещины на прочность тела может быть сделан с позиций линейной механики разрушения, которая хорошо обоснована, особенно для трещины нормального отрыва. Однако определение параметров разрушения представляет собой сложную физическую и математическую задачу, аналитические решения которой получены только для частных случаев. Для решения задач со сложной геометрией и условиями нагружения обычно применяют численные методы, среди которых наибольшее распространение получил метод конечных элементов (МКЭ).

В настоящее время разработаны и эффективно используются целый ряд пакетов программ по методу конечных элементов, которые обладают большими возможностями. Из зарубежных наиболее распространенными являются пакеты типа «Cosmos», «Ansys» и «Nostran». В данной работе были использованы пакеты, аналогичные типам «Cosmos» и «Ansys». *Пакет позволяет в трехмерном измерении (3D модель) рассчитывать поля приведенных и главных напряжений, энергию и плотность энергии деформации, температурные поля и поля термосиловых напряжений, а также частоту собственных колебаний алмазных зерен.* Окно программы представлено на рис. 4.10. Пример расчетов приведенных напряжений в элементах 3D системы «СТМ–зерно–связка» приведен на рис. 4.11 и в приложении А. На шкалах результатов расчета условно обозначены: Von Mises – приведенные напряжения, МПа; ENERGY – энергия деформации, SED – плотность энергии деформации; ESTRN – деформация; Princ_1(2,3) – главные напряжения.

Важным достоинством метода является возможность одновременного изучения напряженно-деформированного состояния (НДС) во всех элементах единой 3D системы «СТМ–зерно–связка» с учетом их взаимовлияния при различных физико-механических свойствах элементов системы и условиях ее нагружения. Вклад каждого из рассмотренных факторов в общий съем шлифуемого СТМ и другие выходные показатели определяются тем, как функционирует вся система «СТМ–зерно–связка». Дифференцированный подход, применявшийся другими исследователями [22], к изучению явлений, протекающих в зоне шлифования, нивелирует выявление роли взаимовлияния элементов, в частности связки, влияния ее свойств на напряжения в контакте «СТМ–зерно».

При исследовании взаимодействия зерна с поликристаллом рассматриваются модели, в которых связка, зерно и поликристалл полагаются упругими сплошными телами. Поскольку наиболее распространенной формой кристаллитов (монокристаллов) алмаза считается октаэдр, форму 3D конечных элементов в МКЭ принимают близкой к нему. Такой подход обоснован еще и тем, что при разрушении алмаза частицы (продукты) разрушения имеют именно форму октаэдра.

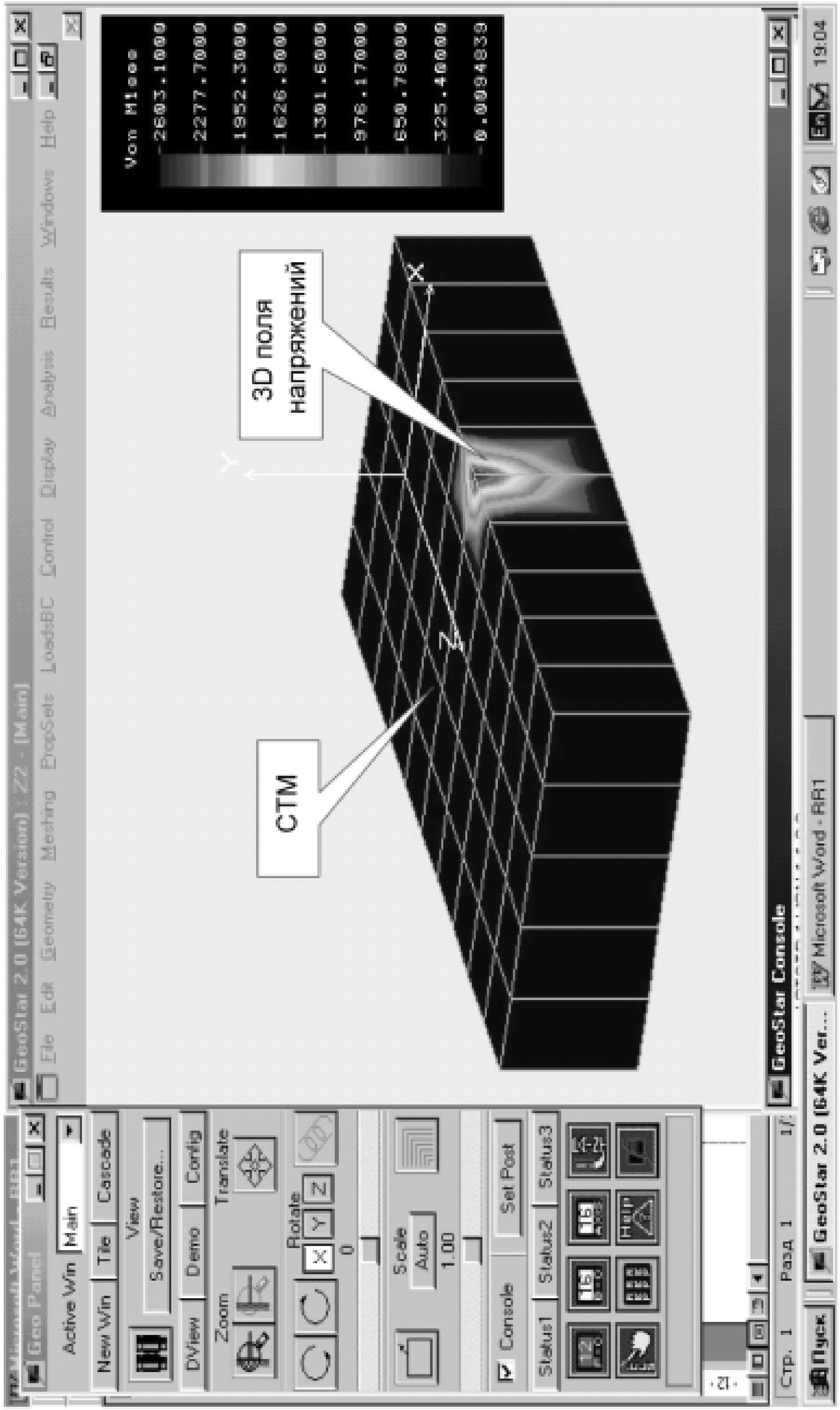
Связка и поликристалл при моделировании представляются в виде призматических фрагментов с размерами соответственно 1×1×3 мм и 1×1×2 мм, а зерно – в виде октаэдра с размерами 200×140×140 мкм, что позволяет достаточно точно моделировать деформирование фрагментов модели с учетом удаленности зон краевых эффектов. Расчетная схема модели приведена на рис. 4.11.

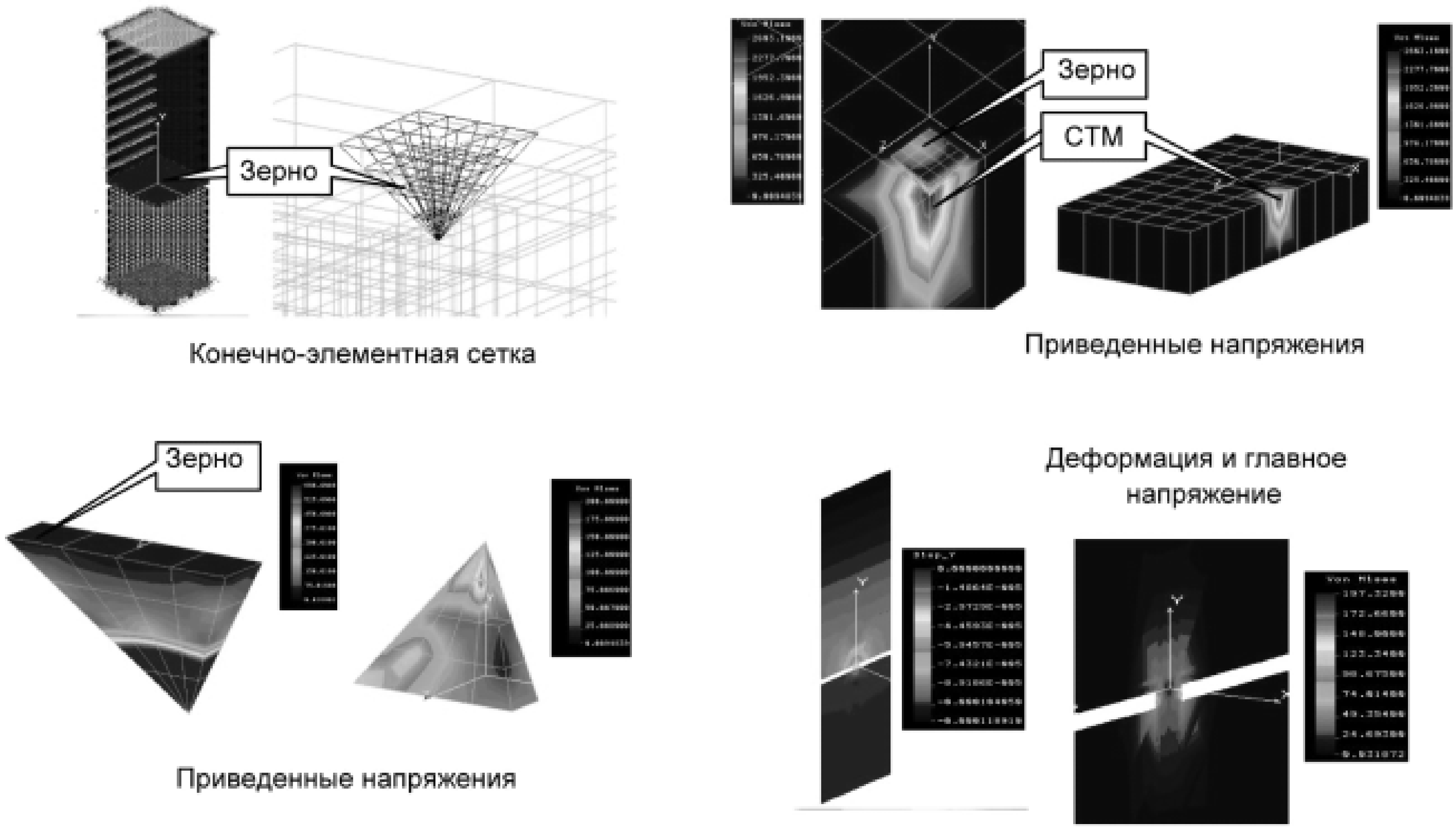
В качестве возможных вариантов ориентации зерна относительно поликристалла рассматриваются три: контакт зерна с поликристаллом по вершине зерна (точечный контакт), ребру (линейный контакт) и плоскости (плоский контакт–имитация площадки износа на зерне). При изучении совместной работы зерен рассматриваются различные соотношения этих вариантов.

Конечноэлементный анализ проводился с применением восьмиузловых элементов SOLID.

Нагружение модели производится по двум вариантам: 1) заданием перемещения $U_{\text{у}}$ верхней плоскости связки (кинематическое воздействие – имитация поперечной подачи $S_{\text{поп}}$); 2) приложением давления к верхней плоскости связки (силовое воздействие нормальной и тангенциальной составляющих силы резания – имитация упругой схемы шлифования). Достоинством такого подхода является возможность изучения 3D НДС как при упругой схеме шлифования, так и по жесткой и сравнения результатов исследований.

В качестве характерной реакции модели на нагружение принимаются: 1) перемещение среднего узла верхней поверхности связки (величина поперечной подачи) – $U_{\text{у}}^{\text{св}}$; 2) перемещение верхнего узла зерна (заглубление зерна в связку) –$U_y^з$; 3) перемещение узла контакта зерна с поликристаллом (упругое заглубление зерна в СТМ) – $U_{\text{у}}^{\text{пк}}$; 4) приведенные напряжения (по Мизесу) в верхнем узле контакта зерна со связкой – $\sigma_{\text{св}}$; 5) приведенные напряжения в узле контакта зерна с поликристаллом – $\sigma_{\text{пк}}$.


GeoStar 2.0 (64K Version) : Z2 - [Main]
File Edit Geometry Meshing PropSets LoadsBC Control Display Analysis Results Windows Help
СТМ
3D поля
напряжений
Von Mises
2603.1000
2277.7000
1952.3000
1626.9000
1301.6000
976.17000
650.78000
325.40000
0.0094839
Geo Panel
Active Win Main
New Win Tile Cascade
View
Save/Restore...
DView Demo Config
Zoom Translate
Rotate
Scale
Auto
1.00
Console Set Post
Status1 Status2 Status3
GeoStar Console
Стр. 1 Разд 1
Пуск GeoStar 2.0 (64K Ver... Microsoft Word - RR1
19:04

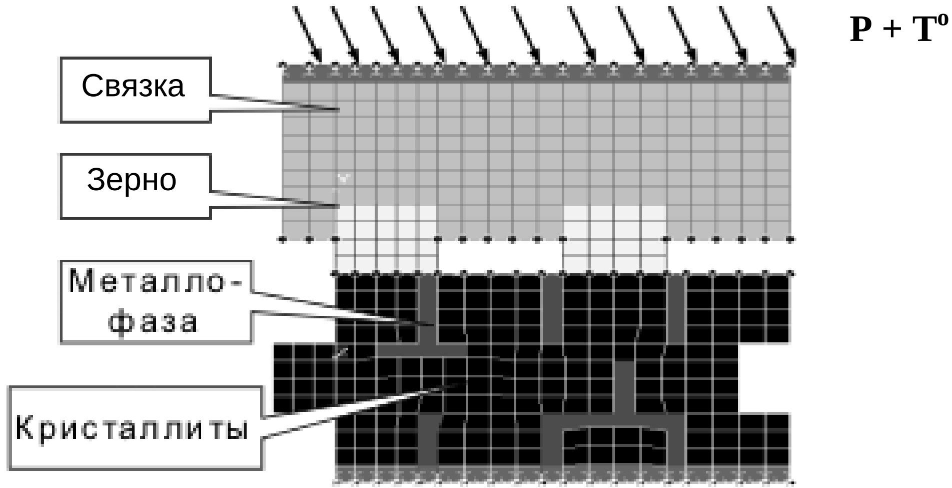

Зерно
Конечно-элементная сетка
Зерно
СТМ
Приведенные напряжения
Зерно
Приведенные напряжения
Деформация и главное напряжение

Трехмерное изучение модели (по сравнению с плоской задачей) позволяет вскрыть существенную разницу в НДС при контакте зерна с СТМ по ребру и вершиной (в плоской задаче величина НДС будет одинакова). Сравнительный анализ результатов расчета НДС системы для плоской и трехмерной задачи показал, что они могут отличаться на 20–150 %. Естественно, что наиболее реалистичные результаты получаются при 3D моделировании.

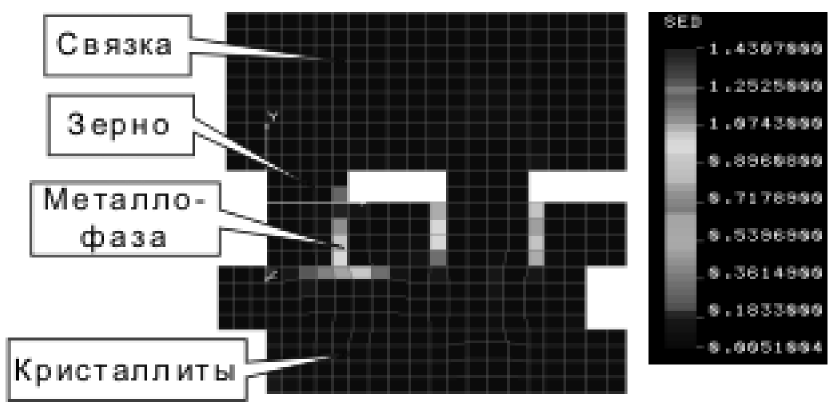
Поскольку в реальном процессе алмазного шлифования рассматриваемая техническая система нагружена не только силовыми, но и температурными воздействиями, необходимо определять величину главных и приведенных напряжений, а также величину деформаций, энергии и плотности энергии деформации в каждом элементе системы «СТМ–зерно–связка» от силового, температурного и суммарного – термосилового нагружения. Для этого кроме величины нормального давления или поперечной подачи задается и величина контактной температуры в зоне шлифования, и температура подаваемой в зону шлифования СОТС. При исследовании причин образования дефектного слоя (брака при шлифовании СТМ) поликристалл моделируется в виде совокупности отдельных кристаллитов и прослоек металлофазы. Пример результатов расчета термосиловых полей плотности энергии деформации в системе приведен на рис. 4.12.

Для определения объемов разрушенных СТМ и алмазных зерен используются как силовые (приведенные напряжения превышают предел прочности СТМ на растяжение), так и энергетические (энергия деформации в элементе превышает предельное значение) критерии разрушения. Пакет позволяет определять величину энергии деформации и плотность энергии в каждом элементе системы. При этом можно определять объем элементов с закритическими значениями приведенных напряжений или закритической энергией деформации. Эти возможности пакета целесообразно использовать при теоретическом определении величины удельного износа в теоретическом модуле экспертной системы процесса алмазного шлифования СТМ.

С целью получения максимально достоверных результатов расчета объемов разрушенных СТМ и алмазных зерен конечноэлементную сетку элементов системы «СТМ–зерно–связка» целесообразно сгущать по мере приближения к зоне контакта (к зоне разрушения) до размеров объема элемента, не превышающего 10^{-4} мкм^3, что значительно меньше реально разрушаемого объема при одноактном воздействии алмазным зерном в процессе шлифования.



а



б

Рисунок 4.12 – Расчетная схема (а) и результаты расчета энергии деформации в элементах системы «связка–зерно–металлофаза–кристаллиты СТМ» (б)

Возможности пакета по определению частоты собственных колебаний алмазных зерен в связке используются при обосновании учета анизотропии физико-механических свойств СТМ при назначении оптимальных режимов шлифования.

4.9. Вопросы для самостоятельной подготовки

1. Понятие о процессе приспосабливаемости.
2. Влияние процесса приспосабливаемости на эффективность процесса шлифования.
3. Преимущества 3D методологии при изучении процесса приспосабливаемости.
4. Топографическая приспосабливаемость.
5. Структурно-фазовая приспосабливаемость.
6. Энергетическая приспосабливаемость.
7. Понятие единой технической системы «обрабатываемый материал–алмазное зерно–связка»
8. Преимущества методологии 3D моделирования по отношению к 2D.
9. Суть комплексного подхода к 3D моделированию процесса изготовления алмазных кругов и процесса шлифования.
10. Метод лазерного сканирования при исследовании топографии алмазных кругов и обработанной поверхности.
11. Метод компьютерной цветометрии при исследовании топографии алмазных кругов и обработанной поверхности.
12. Роль фактической площади контакта в системе «РПК–обрабатываемый материал».
13. Методика экспериментальной оценки уровня приспосабливаемости при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов.
14. Метод конечных элементов (МКЭ) в исследованиях процессов обработки.
15. Уровень 3D напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны шлифования – как критерий оценки эффективности процесса обработки.

ГЛАВА 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗОНЫ ШЛИФОВАНИЯ

Rem tene, verba sequentur –
Постигни суть, а слова найдутся.

Наука строится из фактов, как дом строится из кирпичей; однако нагромождение фактов не есть наука, так же как груда кирпичей не есть дом.

Пуанкаре

Раздел посвящен анализу теоретических исследований микроразрушения элементов системы «СТМ–зерно–связка» в процессе алмазного шлифования**.** Теоретические исследования проведены путем 3D моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны шлифования и разрушения элементов системы «СТМ–зерно–связка». Определены условия, обеспечивающие рациональное распределение энергии, подводимой в зону шлифования, между элементами системы, при котором наиболее эффективно будет разрушаться объем припуска либо съем будет минимизироваться до атомно-молекулярного уровня, обеспечивая прецизионность обработки. Получены исходные данные для разработки теоретического модуля экспертной системы процесса алмазного шлифования СТМ.

5.1. Методология 3D моделирования напряженно-деформированного состояния зоны шлифования

В качестве системы рассматривается не плоская, а трехмерная (3D) модель зоны шлифования, причем связка, зерно, и СТМ понимается как единая техническая система, функционирование которой полностью определяет эффективность процесса шлифования. Именно такой подход позволяет в условиях, максимально приближенных к реальным, вскрыть взаимовлияние элементов системы «СТМ–зерно–связка», физико-механических свойств алмазных зерен, связки и обрабатываемого материала, топографии контактирующих поверхностей, режимов шлифования (нагружения системы).

Такой комплексный подход к изучению зоны шлифования как единого целого в трехмерном измерении стал реальным только с использованием возможностей современной вычислительной техники и, в частности, пакетов прикладных программ для метода конечных элементов.

Особенности строения СТМ, анизотропия свойств, наличие дефектности структуры и ее многофазность делают затруднительными и некорректными применение для анализа напряженно-деформированного состояния системы «СТМ–зерно–связка» классических методов теории упругости. Наиболее эффективным для этого является метод конечных элементов (МКЭ) [7], при котором непрерывная (упругая) среда заменяется на конечное количество дискретных элементов, связанных друг с другом в узловых точках конечным числом узловых связей. Свойства упругой среды при определении деформаций сохраняются в каждом ее элементе.

Возможности изучения НДС зоны шлифования в 3-х мерном (объемном) измерении (3D модель) существенно приближают результаты теоретических расчетов к реальности. Например, при плоском решении задачи не представляется возможным разделить контакт зерна вершиной или ребром, т. к. расчетные схемы в этом случае идентичны. Сравнительные расчеты НДС системы «СТМ–зерно–связка» в плоском и 3D варианте показали, что расхождение результатов может достигать 50–150 %.

Еще одним достоинством 3D моделирования НДС системы «СТМ–зерно–связка» как единого целого является возможность моделировать процесс алмазного шлифования по жесткой схеме, т. е. с поперечной подачей. При этом НДС создается не путем приложения нагрузки к алмазному зерну, как это обычно делалось, а заданием перемещения алмазоносного слоя на обрабатываемый материал. Такая расчетная схема полностью соответствует процессу шлифования с поперечной подачей в реальном процессе алмазного шлифования СТМ по жесткой схеме.

В работах института сверхтвердых материалов НАН Украины [25, 34] рассмотрена возможность расчета напряженно-деформированного состояния кристаллов алмазов различной формы методом конечных элементов. Он развит применительно к трехмерным задачам теории упругости для анизотропных сред. Расчет напряжений в алмазе кубооктаэдрической формы при сжатии [001] позволил установить, что напряженное состояние кристаллов далеко от однородного сжатия. Большие градиенты напряжений имеют место, как в направлении оси сжатия, так и в перпендикулярных к ней плоскостях. Возникают значительные поперечные напряжения, сжимающие в приконтактных областях и растягивающие в средней части кристалла. Именно действием этих растягивающих напряжений можно объяснить разрушение кристаллов по плоскостям (110) и $(\overline{110})$ при сжатии в направлении [001]. *Эти результаты подтверждают необходимость учета анизотропии свойств при исследовании процессов разрушения алмазных структур. Расчет и анализ напряженно-деформированного состояния кристаллов различной формы позволяют перейти при оценке процесса их разрушения от характеристики разрушающих усилий к более обоснованным значениям предельных напряжений или предельной энергии деформации. Практически идеальная хрупкость взаимодействующих материалов позволяет предполагать, что разрушение объемов материала будет происходить при условии появления в них закритических значений приведенных напряжений и/или закритической энергии (плотности энергии) деформации, значения которых могут быть получены методом конечных элементов. Это дает возможность количественно оценивать влияние физико-механических свойств СТМ и алмазных зерен (с учетом их анизотропии), условий нагружения системы, различных дефектов строения СТМ на характер и интенсивность их разрушения.* В рамках решаемой задачи определено влияние условий нагружения геометрических параметров элементов и их ориентации по отношению к зоне контакта, физико-механических свойств зерна, СТМ, связки на величину и распределение главных и приведенных напряжений, упругих деформаций, энергии и плотности энергии деформации, частоту собственных колебаний алмазных зерен.

Цель теоретических исследований – разработка теоретического модуля экспертной системы процесса алмазного шлифования СТМ. Ее назначение – сократить объем трудоемких и дорогостоящих экспериментов.

Интенсивность микроразрушения алмазных зерен и припуска СТМ в значительной степени обуславливается их прочностными характеристиками. Наиболее ответственными из них являются предел прочности при растяжении $\sigma_р$, т. к. в большинстве случаев разрушение СТМ и зерен наступает в зонах максимальных растягивающих напряжений и коэффициента интенсивности напряжений K_{1C}. Сложность экспериментального определения этих показателей обусловлена малыми размерами как СТМ, так и алмазных зерен и сложностью изготовления образцов требуемых размеров. Наиболее полно эта проблема решена в работах Л. Н. Девина и С. Н. Дуба. Получена зависимость для определения предела прочности СТМ при растяжении:

$$\sigma_р \approx \frac{0,41\sigma_к\sigma_с}{\sigma_с - 1,89\sigma_к}, \tag{5.1}$$

где $\sigma_к = \frac{P}{dh}$ – средняя прочность при диаметральном сжатии образца диаметром d высотой h разрушающим усилием P;

$\sigma_с$ – предел прочности при одноосном сжатии.

Исходя из данных о прочности алмазных зерен при статическом сжатии, можно определить $\sigma_к$ для каждой зернистости. Эти зависимости использованы при определении значений предела прочности при растяжении $[\sigma_р]$ всех исследуемых СТМ и алмазных зерен. Поскольку СТМ относятся к практически идеально хрупким материалам, будем считать, что объем материала, в котором приведенные напряжения и/или плотность энергии деформации превысит предельные значения разрушится.

3D моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «СТМ–зерно–связка» и ее элементов осуществляли с целью количественной оценки влияния условий шлифования – поперечная подача $S_{поп}$, нормальное давление $P_н$, скорость шлифования V, характеристик кругов – зернистость Z, концентрация алмазов в круге K, марки СТМ и алмазных зерен, марки металлической связки, наличие металлофазы на интенсивности взаимного разрушения элементов системы.

На рис. 5.1 приведена систематика видов разрушения элементов системы «СТМ–алмазное зерно–связка», определяющих эффективность алмазного шлифования СТМ, которая свидетельствует о сложности и взаимосвязанности явлений, протекающих в зоне резания.

Поскольку наиболее распространенной формой кристаллитов (монокристаллов) алмаза считается октаэдр (при разрушении алмаза частицы разрушения имеют такую же форму), то и форму 3D конечных элементов в МКЭ принимали в виде октаэдра.

Возможности современных ЭВМ позволяют вести расчет при размерах конечных элементов сетки, составляющих сотые доли микрометра, что вполне соизмеримо с реальными объемами диспергирования зерен и СТМ в процессе шлифования. Расчетная сетка сгущалась по мере приближения к месту приложения нагрузки.

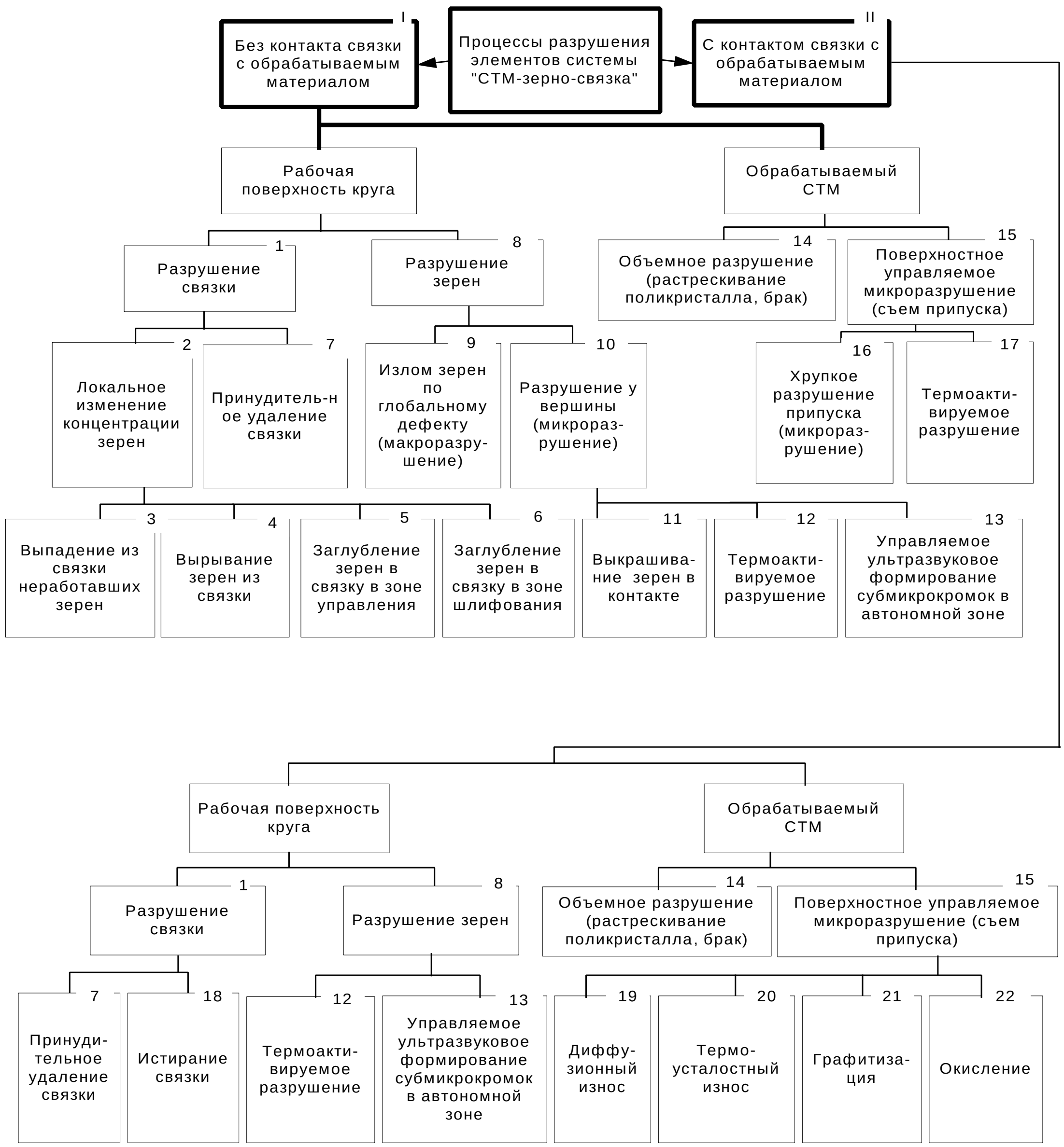


Рисунок 5.1 – Систематика видов разрушения элементов системы «СТМ–зерно–связка» в процессе шлифования

Предлагаемый подход оценки НДС зоны шлифования и, как следствие, интенсивности съема припуска и износа зерен может быть использован в том случае, когда контактные нагрузки достаточны для одноактного взаимного разрушения элементов системы «СТМ–зерно–связка». В противном случае будет использована теория механики усталостно-циклического разрушения элементов системы. Об адекватности разработанной модели можно судить по степени соответствия прогнозируемых объемов разрушенных и выпавших алмазных зерен и объемов разрушенных СТМ, а также развития дефектного слоя, обусловленного обработкой, конкретным результатам, полученным при экспериментальных исследованиях. Проверка полученных результатов реализуется в экспериментальном модуле экспертной системы.

При моделировании приняты следующие допущения:

1. Обрабатываемый материал абсолютно хрупкий, под нагрузкой деформируется упруго вплоть до разрушения.

2. Обрабатываемый материал относится к классу СТМ, обладает дефектностью структуры в виде пор и включений металлофазы длиной 5–10 мкм, равномерно расположенных в объеме образца.

3. Контурная площадь контакта в системе «СТМ–РПК» определяется схемой шлифования, а фактическая площадь контакта – профилем макро- и микрогеометрий РПК с учетом ее износа и шероховатости поверхности СТМ.

4. Алмазные зерна равномерно распределены по поверхности круга, контактирующей с СТМ, разновысотность зерен подчиняется равномерному закону. Алмазные зерна имеют форму октаэдра и контактируют с обрабатываемой поверхностью вершиной, ребром, гранью или их совокупностью. Контактирование зерна с СТМ вершиной, ребром или гранью принимается равновероятным. Изменение фактической площади контакта происходит не за счет возникновения площадок смятия, а за счет упругого заглубления зерен в связку.

5. Объем материала считается разрушенным, если величина приведенных или главных напряжений в нем превысит предел его прочности на растяжения, либо энергия деформации в этом элементе превысит значения по-

верхностной энергии, которая для различных граней кристаллитов колеблется в пределах от 18,4 до 10,6 дж/м^2 [33].

В зависимости от поставленных целей исследований варьируется степень детализации изучаемых процессов и изменяются используемые методы и методики решения задач.

5.2. 3D напряженно-деформированное состояние системы «СТМ–зерно–связка»

Механизм съема припуска при взаимодействии элементов системы «СТМ–зерно–связка» изучался при нагружении силой шлифования либо величиной поперечной подачи, обеспечивающей по данным эксперимента изменение состояния СТМ в зоне шлифования от упругого деформирования до разрушения. Характер нагружения принят статическим, однако, величина его рассчитывалась с учетом динамического характера взаимодействия и корректировалась по экспериментальным данным.

Приближенно оценить силу взаимодействия можно, воспользовавшись теорией соударения шаров, изложенной в [13].

Основной гипотезой этой теории является предположение о том, что свойства и размеры соударяющихся тел различаются не слишком сильно. Для таких тел время соударения очень велико по сравнению с периодом низшей формы их колебаний.

В данном случае одно из тел (СТМ) можно представить как шар бесконечно больших радиуса и массы. В этом случае период низшей формы колебаний становится очень большим, стремясь к бесконечности. Однако и в этом случае экспериментально определённая продолжительность соударения достаточно хорошо согласуется с результатами указанной теории [44].

Для случая, когда условный радиус округления зерна R_2 = 100 мкм, скорость круга V = 30 м/с, модули упругости зерен и СТМ E = 800 ГПа, коэффициент Пуассона ν = 0,1, масса зерна m_2 = 0,1 г получаем P_{max} = 0,28 Н. По данной методике рассчитывалась величина силового нагружения системы «СТМ–зерно–связка» и корректировалась по результатам экспериментального определения сил резания и коэффициента шлифования при обработке различных марок СТМ.

Варьировалось направление действия результирующей силы шлифования по отношению к обрабатываемой поверхности от нормали (тангенциальная составляющая силы резания $P_z = 0$, разрушение материала происходит только под воздействием нормальной составляющей P_y) до направления, обусловленного соотношением сил $P_z /P_y = 0{,}1–0{,}4$, что по данным экспериментов характерно для обработки сверхтвердых материалов.

В результате расчетов были получены значения перемещений в узлах и напряжений в элементах сетки. Для получения более полной картины 3D НДС наиболее нагруженной зоны контакта шаг сетки был уменьшен до 0,0005 мм по мере приближения к зоне контакта. При исследовании взаимодействия зерна с поликристаллом рассматриваются модели, в которых связка, зерно и поликристалл полагаются упругими сплошными телами.

Связка и поликристалл представляются в виде призматических фрагментов с размерами соответственно 2×2×3 мм и 1×1×2 мм, а зерно – в виде октаэдра с размерами 200×150×150 мкм, что позволяет достаточно точно моделировать деформирование фрагментов модели с учетом удаленности зон.

В качестве возможных вариантов ориентации зерна относительно поликристалла рассматриваются три: контакт зерна с поликристаллом по вершине зерна, ребру и плоскости. При изучении совместной работы зерен рассматривались различные вариации соотношений их количества по-разному ориентированных к зоне контакта.

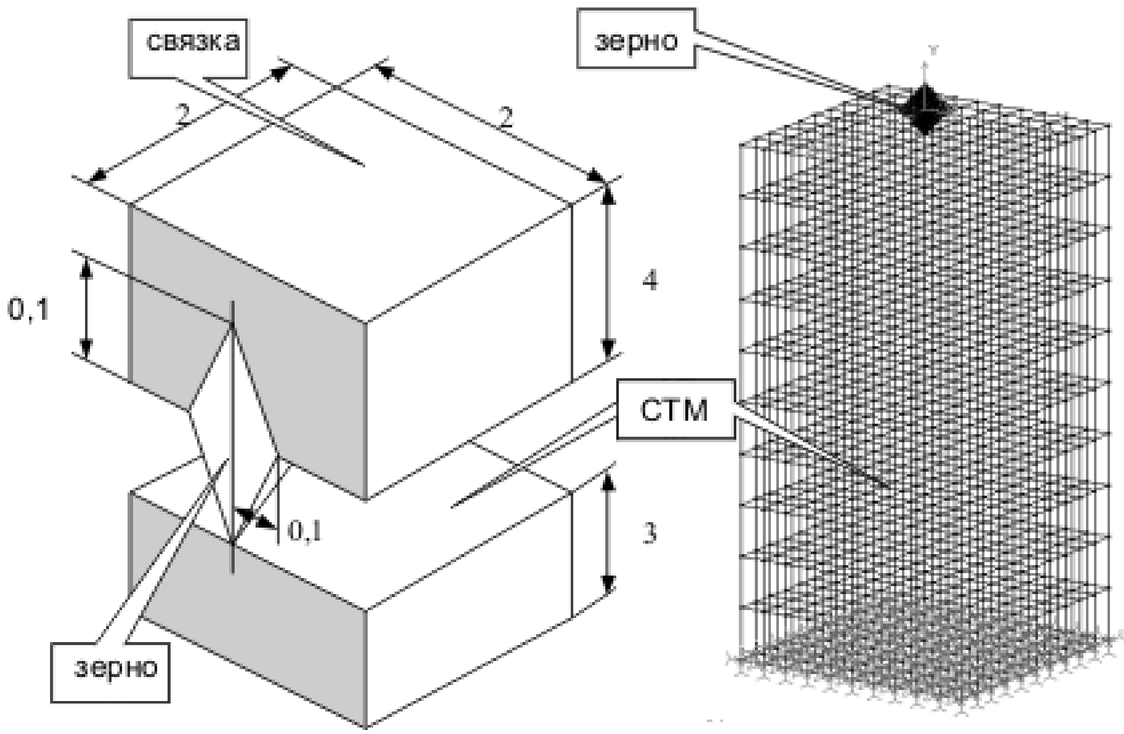
Далее рассмотрено деформирование модели при этих ориентациях зерна и влияние упругих характеристик элементов модели на ее НДС.

5.2.1. 3D НДС зоны шлифования при точечном контакте зерна

Оценка напряженно-деформированного состояния системы «СТМ–зерно–связка» проводилась с использованием пакета программ для метода конечных элементов с применением восьми узловых элементов SOLID (4847 узлов, 1640 элементов) (рис. 5.2 а).

Поликристалл закреплялся по нижней грани по линейным перемещениям U_x, U_y, U_z. Сгенерированная конечноэлементная сетка модели приведена на рис. 5.2 б.

Характеристики материала элементов модели: зерно E = 1000 ГПа; G = 545 ГПа; μ = 0,1; поликристалл E = 1000 ГПа; G = 545 ГПа; μ = 0,1; связка E = 72 ГПа; G = 28 ГПа; μ = 0,24 (алюминиевый сплав).



а б

Рисунок 5.2 – Модель взаимодействия элементов системы (а) и ее сгенерированная конечноэлементная сетка (б) при точечном контакте зерна с СТМ

Нагружение модели производилось по двум вариантам:

– заданием перемещения U_y верхней плоскости связки (кинематическое воздействие) – имитация поперечной подачи при жесткой схеме шлифования;

– приложением давления к верхней плоскости связки (силовое воздействие) – упругая схема шлифования.

В качестве реакции модели на нагружение приняты:

– перемещение узла (№29) контакта зерна с поликристаллом U_y^3;

– напряжения (приведенные по Мизесу) в узле (№29) контакта зерна с поликристаллом σ_{von};

– напряжения (приведенные по Мизесу) в узле (№1) контакта связки с зерном σ_{von}.

При перемещении алмазного слоя на U_y^c = 5 мкм, получили величину упругого перемещения зерна в СТМ U_y^3 = 0,473 мкм; при этом напряжения в зерне (поликристалле) будут равны σ_{von} = 14717 МПа; а напряжения в связке σ_{von} = 4620 МПа.

При приложении к связке давления p = 10 МПа, соответствующего усилию P = 0,4 Н, получаем:

– перемещение зерна U_y^3 = 0,2718 мкм;

– напряжения в зерне (поликристалле) σ_{von} = 8452 МПа;

– напряжения в связке σ_{von} = 2653 МПа.

Картина распределения приведенных напряжений в базовой модели системы «СТМ–зерно» при перемещении связки U_y^c = 5 мкм приведена на рис. 5.3.

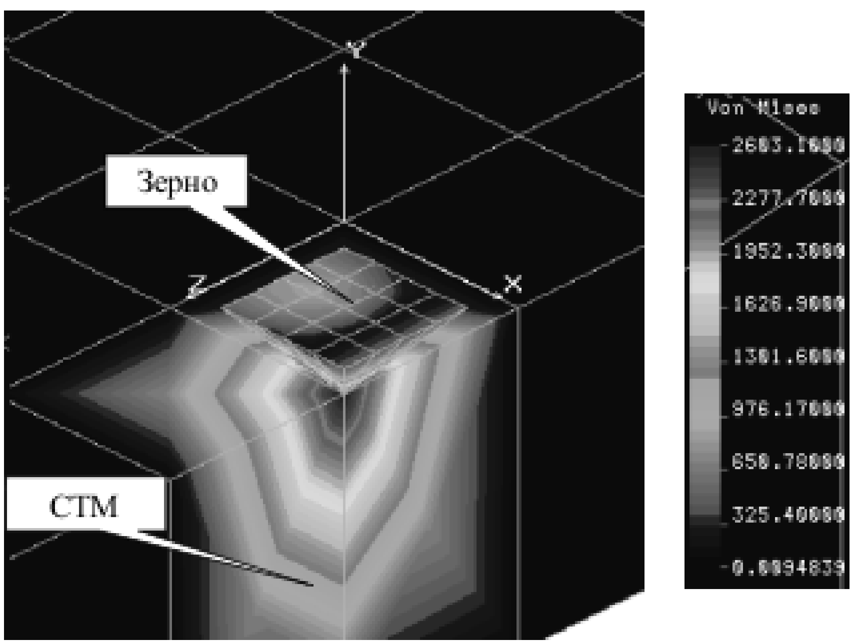


Рисунок 5.3 – 3D поля приведенных напряжений в системе «зерно–СТМ» при точечном контакте зерна с СТМ

При этом в 365 элементах зерна и в 236 элементах СТМ энергия деформации превысит критическое значение и объемы разрушенного зерна и поликристалла составят соответственно $V_з$ = 0, 023 мкм^3 и $V_{стм}$ = 0,018 мкм^3.

Соответствие между кинематическим и силовым воздействием модели выражается зависимостями:

из условия равенства напряжений в зерне (поликристалле):

$$P = 13{,}93\ U_y^c, \tag{5.2}$$

где P – усилие в Н; U_y –перемещение в мкм;

из условия равенства напряжений в связке:

$$P = 13{,}93\ U_y^c; \tag{5.3}$$

из условий равенства перемещений на границе «зерно–поликристалл»:

$$P = 13{,}93\ U_y^c. \tag{5.4}$$

Зависимости (5.2)–(5.4) свидетельствуют о практически полном соответствии поведения модели при силовых и кинематических воздействиях в принятых точках для дальнейшего анализа. Далее принята зависимость $P = 13{,}93\ U_y^c$, соответствующая критериям (5.2)–(5.4).

С использованием описанной выше модели анализировалось влияние свойств связки, зерна и поликристалла на процесс деформирования.

Выявленное соответствие реакции модели на кинематические и силовые воздействия позволило рассматривать один вид воздействия – нагружение перемещением связки U_y^c = 5 мкм, что практически соответствует величине поперечной подачи $S_{поп}$.

Анализ поведения модели проводился для следующих физико-механических характеристик элементов системы «СТМ–зерно–связка»: связка:модуль упругости E = 72 ГПа; G = 28 ГПа; коэффициент пуассона μ = 0,24 (базовый вариант); E = 100 ГПа; G = 40 ГПа; μ = 0,24; E = 130 ГПа; G = 50 ГПа; μ = 0,24; зерна: E = 1000 ГПа; G = 454 ГПа; μ = 0,1 (базовый вариант); E = 800 ГПа; G = 360 ГПа; μ = 0,1; поликристалла: E = 1000 ГПа;

G = 545 ГПа; μ = 0,1 (базовый вариант); E = 800 ГПа; G = 360 ГПа; μ = 0,1; E = 500 ГПа; G = 227 ГПа; μ = 0,1.

Сравнительный анализ поведения 3D модели при нагружении производился относительно базового варианта.

Результаты расчета 3D НДС для модели с точечным контактом вершины зерна с поликристаллом приведены в табл. 5.1. Анализ этих данных показывает, что наиболее эффективным способом повышения величины напряжений в поликристалле является повышение жесткости связки:

$$\frac{\Delta U_y^3}{\Delta E_{\text{св}}} = 0{,}00222 \text{ мкм/ГПа},$$

что на порядок больше, чем при повышении жесткости зерна:

$$\frac{\Delta U_y^3}{\Delta E_{\text{з}}} = 0{,}00023 \text{ мкм/ГПа}.$$

Причем этот способ управления процессом остается эффективным в широком диапазоне изменения характеристик поликристалла:

$$\frac{\Delta U_y^3}{\Delta E_{\text{пк}}} = 0{,}00045 \text{ мкм/ГПа}.$$

Таблица 5.1 – 3D НДС в характерных точках конечноэлементной модели при точечном контакте зерна (вершиной)

	Базовый вариант	Связка		СТМ		Зерно
		E=100 ГПа	E=130 ГПа	E=800 ГПа	E=1000 ГПа	E=800 ГПа
$U_y^{\text{зер}}$, мкм	0,473	0,546	0,602	0,307	0,248	0,427
$\sigma_{\text{пк}}$, МПа	14717	17125	19000	15230	15448	13363
$\sigma_{\text{св}}$, МПа	4620	5314	5817	4790	4849	4164

Модуль упругости связки является определяющим среди характеристик фрагментов системы и при оценке их влияния на напряжения в поликристалле (в точке контакта с зерном). Такой результат открывает новые *возможности повышения эффективности алмазного шлифования СТМ за счет увеличения модуля упругости связки.*

Градиент роста этих напряжений наиболее значителен:

$$\frac{\Delta\sigma_{\text{пк}}}{\Delta E_{\text{св}}} = 0,0738,$$

при изменении жесткости связки. Причем он отличается примерно на порядок соответственно от градиентов изменения модуля упругости зерна (0,00677) и поликристалла (0,00146).

Напряжения в связке (в контакте с вершиной зерна) также в наибольшей мере зависят от модуля ее упругости:

$$\frac{\Delta\sigma_{\text{св}}}{\Delta E_{\text{пк}}} = 0,0206,$$

влияние на них жесткости самого зерна и поликристалла практически не существенно для рассматриваемых диапазонов характеристик составляющих модели (соответственно 0,0023 и 0,00046).

Таким образом, анализ поведения модели позволяет утверждать, что ее НДС при контакте зерна с поликристаллом в вершине зависит в основном от свойств материала связки как основного элемента рассмотренной модели.

5.2.2. 3D НДС зоны шлифования при линейном контакте зерна

3D модель взаимодействия зерна с поликристаллом при линейном контакте (по ребру) представлена на рис. 5.4 а. Для этой модели было сгенерировано 2248 элементов типа SOLID, 8761 узел (рис. 5.4 б).

Условия закрепления, характеристика материала фрагментов и варианты нагружения соответствовали принятым в модели при контакте зерна с поликристаллом по вершине. В качестве реакции модели на нагружение принимались: – перемещение узла (№98) контакта зерна с поликристаллом U_y; – напряжения (приведенные по Мизесу) в узле (№98) контакта зерна с поликристаллом σ_{von};– напряжения (приведенные по Мизесу) в узле (№16) контакта связки с зерном σ_{von}.

При перемещении алмазоносного слоя на величину U_y^c = 5 мкм, получили: перемещение зерна U_y^3 = 0,5638 мкм; напряжения в зерне (поликристалле) σ_{von} = 4448,4 МПа; напряжения в связке σ_{von} = 1502,3 МПа.

При приложении к связке давления p = 10 МПа, соответствующего усилию P = 0,4 Н, получили: перемещение зерна U_y^3 = 0,3049 мкм; напряжения в зерне (поликристалле) σ_{von} = 2406 МПа; напряжения в связке σ_{von} = 812,54 МПа.

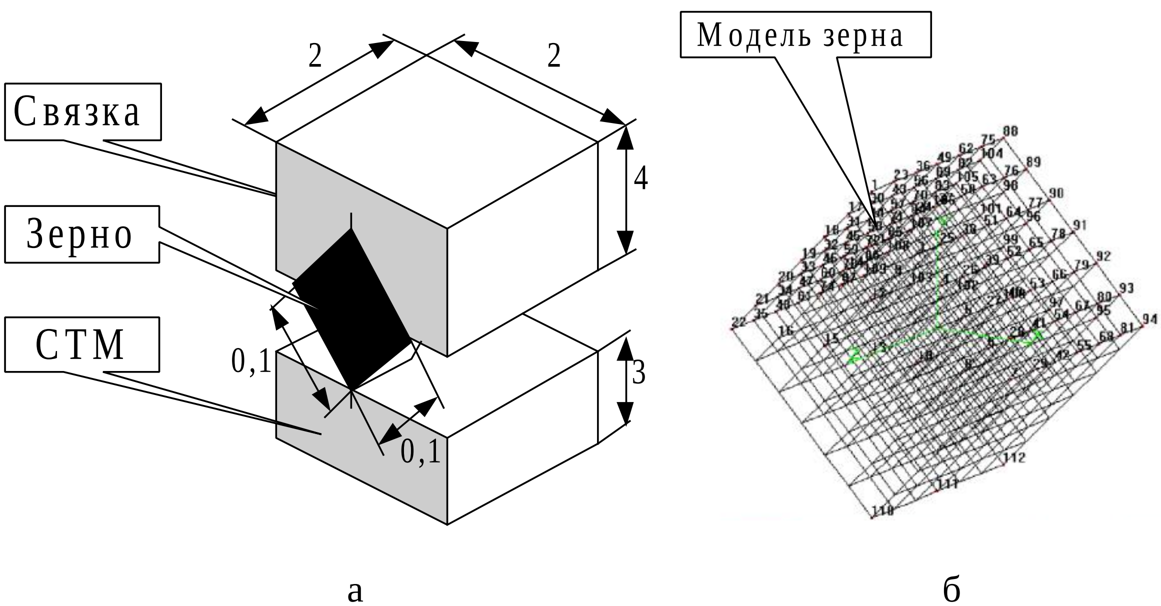


Рисунок 5.4 – Модель взаимодействия элементов системы при линейном контакте зерна с СТМ (а) и конечноэлементная сетка (б)

При этом в 234 элементах зерна и в 127 элементах СТМ энергия деформации превысит критическое значение и объемы разрушенного зерна и поликристалла составят соответственно $V_з$ = 0, 019 мкм^3 и $V_{СТМ}$ = 0,012 мкм^3.

Характер распределения приведенных напряжений в зерне для базовой модели при перемещении связки U_y^c = 5 мкм приведены на рис. 5.5.

Соответствие между кинематическим и силовым воздействием модели имеет вид: из условия равенства напряжений в зерне (поликристалле):

$$P = 14{,}79\ U_y^c; \qquad (5.5)$$

из условия равенства напряжений в связке:

$$P = 14{,}79\ U_y^c; \qquad (5.6)$$

из условия одинакового перемещения зерна:

$$P = 14{,}79\ U_y^c. \qquad (5.7)$$

Зависимости (5.7) тождественны, что подтверждает соответствие деформирования модели в принятых контрольных точках при силовом и кинематическом нагружении. В дальнейшем для контакта зерна с поликристаллом по ребру в соответствии с (5.7) принята зависимость:

$$P = 14{,}79\ U_y^c. \qquad (5.8)$$

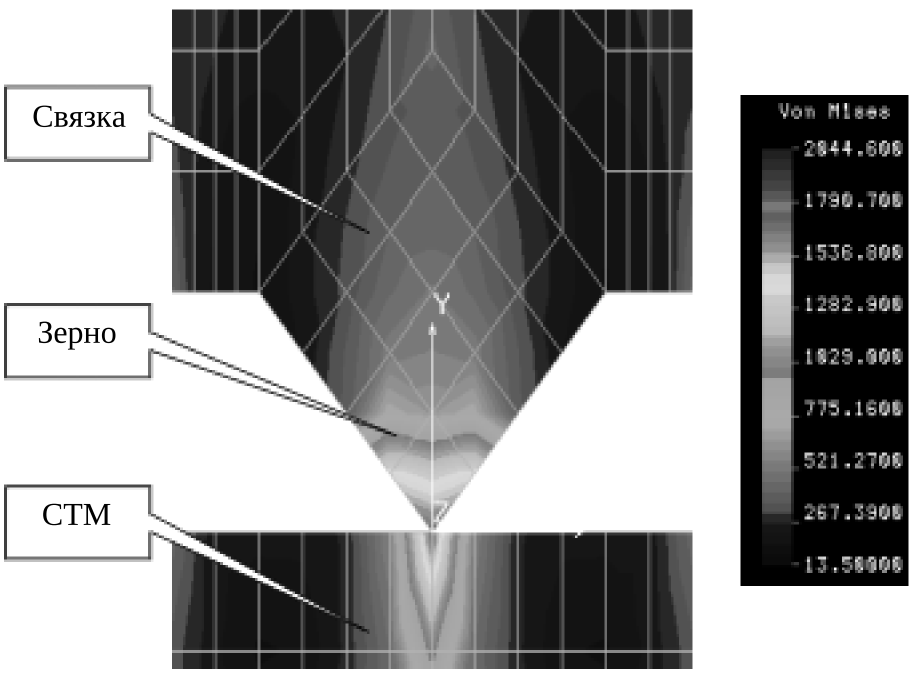


Рисунок 5.5 – Приведенные напряжения в системе при линейном контакте зерна с СТМ

Влияние свойств материала элементов модели по аналогии с моделью, рассматривавшейся в 5.2.1, с учетом соответствия, выраженного зависимостями (5.7), анализировались при кинематическом нагружении перемещением связки $U_y^c = 5$ мкм. Анализ деформирования модели производился при упругих характеристиках фрагментов, соответствующих 5.2.1 относительно модели с базовыми характеристиками. Результаты определения НДС для модели с линейным контактом (по ребру) приведены в табл. 5.2. Анализ этих данных показывает, что, как и при контакте зерна с поликристаллом вершиной, наиболее эффективным с точки зрения увеличения приведенных напряжений в поликристалле является повышение модуля упругости связки:

$$\frac{\Delta U_y^3}{\Delta E_{\text{св}}} = 0{,}00288 \text{ мкм/ГПа},$$

что, на порядок больше, чем при повышении модуля упругости зерна:

$$\frac{\Delta U_y^3}{\Delta E_{\text{з}}} = 0{,}00024 \text{ мкм/ГПа},$$

при слабом влиянии на это характеристик поликристалла:

$$\frac{\Delta U_y^3}{\Delta E_{\text{пк}}} = 0{,}000528 \text{ мкм/ГПа}.$$

Таблица 5.2 – 3D НДС в характерных точках конечноэлементной модели при линейном контакте зерна (ребром)

	Базовый вариант	Связка		СТМ		Зерно
		E=100 ГПа	*E*=130 ГПа	*E*=800 ГПа	*E*=1000 ГПа	*E*=800 ГПа
$U_y^{\text{зер}}$, мкм	0,564	0,658	0,731	0,369	0,300	0,516
$\sigma_{\text{пк}}$, МПа	4449	5192	5770	4554	4591	4025
$\sigma_{\text{св}}$, МПа	1502	1807	2059	1576	1603	1405

При анализе влияния характеристик элементов на напряжения в зоне контакта ребра зерна с поликристаллом установлено, что доминирующим элементом при этом также является связка:

$$\frac{\Delta \sigma_{\text{пк}}}{\Delta E_{\text{св}}} = 0{,}02277,$$

при существенно меньшем (на порядок) влиянии жесткости зерна:

$$\frac{\Delta \sigma_{\text{пк}}}{\Delta E_{\text{з}}} = 0{,}00212,$$

и практической незначимости свойств поликристалла

$$\frac{\Delta\sigma_{\text{пк}}}{\Delta E_{\text{пк}}} = 0,000284.$$

Причем, по сравнению с моделью, рассмотренной в 5.2.1, средний градиент напряжений на границе зерно – поликристалл в этом случае в три раза ниже, что свидетельствует о том, что управление НДС при контакте зерна с поликристаллом по ребру существенно ослаблено с точки зрения влияния связки.

5.2.3. 3D НДС зоны шлифования при плоском контакте зерна

3D модель взаимодействия зерна с поликристаллом при плоском контакте (по грани) представлена на рис. 5.6 а. При формировании для этой модели было сгенерировано 2448 элементов типа SOLID, 8561 узел (рис. 5.6 б). Условия закрепления, характеристики материала фрагментов и варианты нагружения аналогичны рассмотренным ранее в 5.3.1, 5.3.2 моделям.

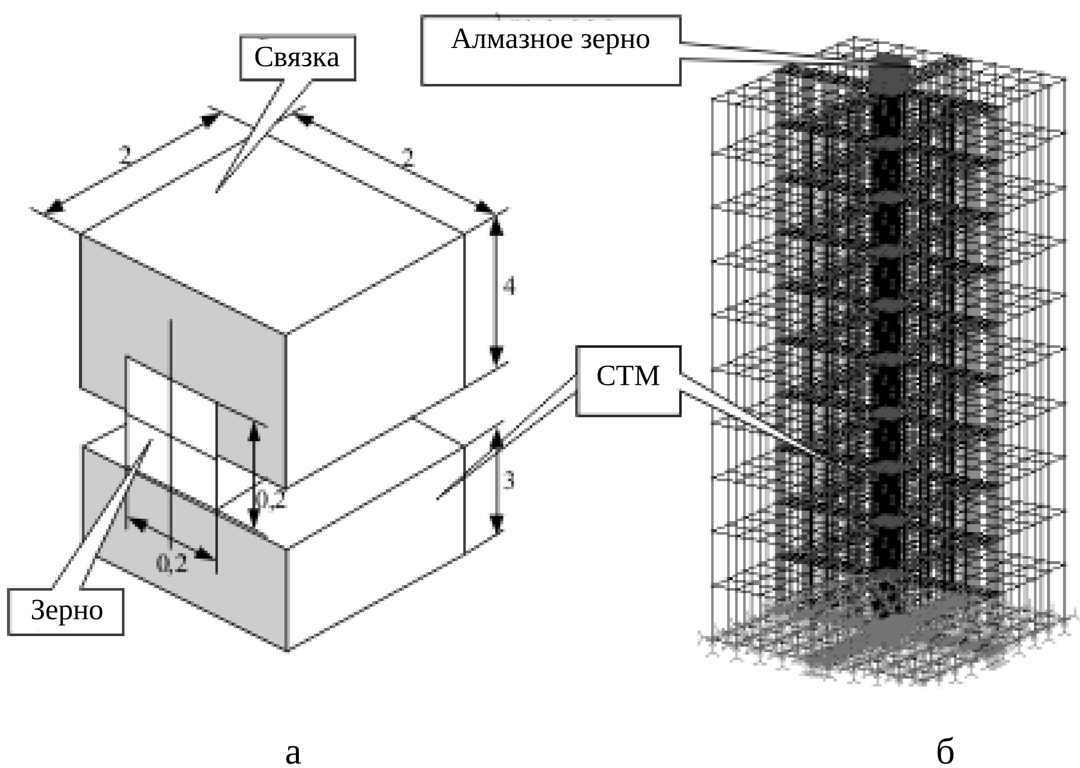


Рисунок 5.6 – Модель взаимодействия элементов системы «СТМ–зерно–связка» (а) и ее сгенерированная сетка при плоском контакте зерна с СТМ (б)

В качестве реакции модели на нагружение рассматривались: перемещение узла (№88) контакта зерна с поликристаллом U_y; напряжения (приведенные по Мизесу) в узле (№88) контакта зерна с поликристаллом σ_{von}; напряжения (приведенные по Мизесу) в узле (№13) контакта связки с зерном σ_{von}.

При перемещении связки на величину U_y^c = 5 мкм, получили: перемещение (внедрение) зерна U_y^3 = 0,6553 мкм; напряжения в зерне (поликристалле) σ_{von} = 753,12 МПа; напряжения в связке σ_{von} = 946,7 МПа.

При приложении к связке давления p = 10 МПа, соответствующего усилию P = 0,4 Н, упругое перемещение (внедрение) зерна в СТМ составляет U_y^3 = 0,2719 мкм; напряжения в зерне (поликристалле) σ_{von} = 314 МПа; напряжения в связке σ_{von} = 392,25 МПа.

При этом ни в одном из элементов сетки СТМ и зерна энергия деформации не превысила критического значения и следовательно разрушения их не произошло. Это убедительно доказывает вывод о том, что образование площадок износа на алмазных зернах является основным ограничивающим фактором для производительного шлифования СТМ.

Характер распределения напряжений в системе для базовой модели при перемещении связки U_y^c = 5 мкм представлен на рис. 5.7.

Соответствие между кинематическим и силовым взаимодействием описывается зависимостями:

из условия равенства напряжений в зерне (поликристалле)

$$P = 19{,}188\ U_y^c; \qquad (5.9)$$

из условия равенства напряжений в связке

$$P = 19{,}308\ U_y^c; \qquad (5.10)$$

из условия одинакового перемещения зерна

$$P = 19{,}28\ U_y^c. \qquad (5.11)$$

Зависимости (5.9)–(5.11) свидетельствуют о хорошем соответствии характера деформирования модели при кинематическом и силовом нагружении системы. Однако, в отличие от 5.2.1, 5.2.2, оно не абсолютно. В дальнейшем, при анализе контакта зерна с поликристаллом по плоскости с учетом (5.9)–(5.11) принята усредненная зависимость

$$P = 19{,}28\ U_y^c. \qquad (5.12)$$

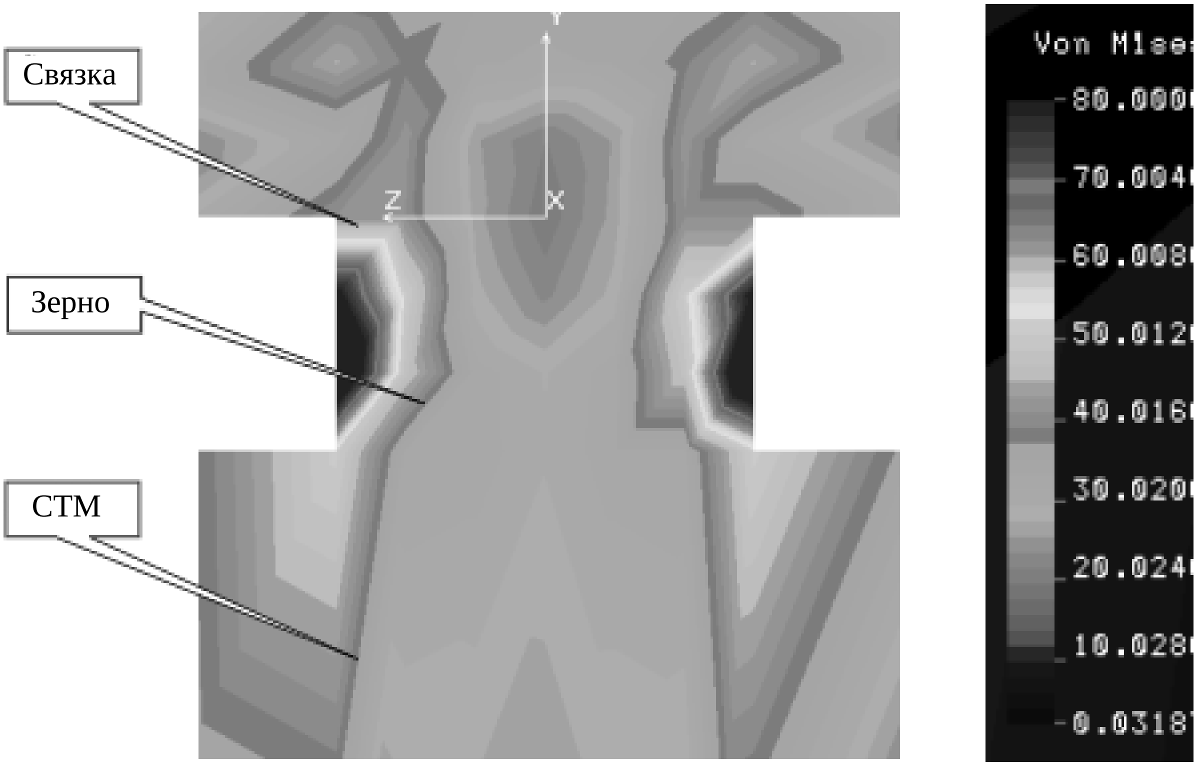


Рисунок 5.7 – Приведенные напряжения в системе «СТМ–зерно–связка» при плоском контакте зерна с СТМ

Аналогично анализу, проведенному в 5.2.1 и 5.2.2, деформирование базовой модели при контакте зерна с поликристаллом по плоскости рассматривалось при кинематическом нагружении перемещением связки $U_y^c = 5$ мкм при изменении упругих свойств элементов базовой модели таких же, которые рассматривались ранее.

Результаты расчета приведены в табл. 5.3. Из анализа этих результатов следует, что на величину упругого заглубления зерна в поликристалл для этой модели:

$$\frac{\Delta U_y^3}{\Delta E_{\text{св}}} = 0,0059 \text{ мкм/ГПа}$$

также наиболее существенно влияют свойства связки при несоизмеримо малом по сравнению с этим влиянием соответственно характеристик зерна и поликристалла:

$$\frac{\Delta U_y^3}{\Delta E_{\text{з}}} = 0,000076 \text{ мкм/ГПа};$$

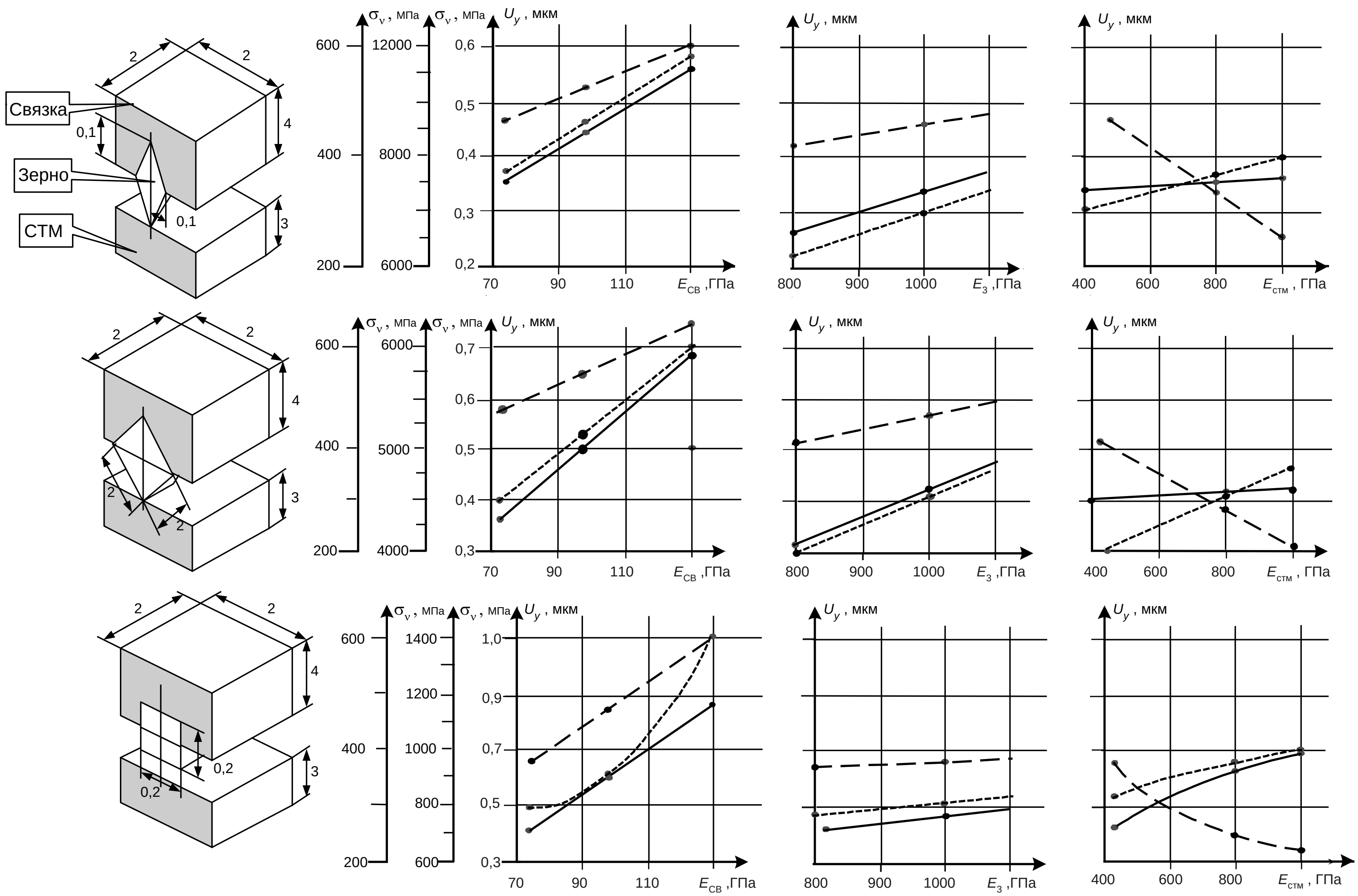
$$\frac{\Delta U_y^3}{\Delta E_{\text{пк}}} = 0,0006 \text{ мкм/ГПа}.$$

И в этом случае связка является определяющим элементом по вкладу в напряженное состояние в районе контакта зерна с поликристаллом $\frac{\Delta\sigma_{\text{пк}}}{\Delta E_{\text{св}}} = 0,02278$ при $\frac{\Delta\sigma_{\text{пк}}}{\Delta E_{\text{з}}} = 0,00212$ и $\frac{\Delta\sigma_{\text{пк}}}{\Delta E_{\text{пк}}} = 0,000284$. Причем градиенты напряжений на границе зерна и поликристалла для этой модели практически совпадают с полученными в 5.2.2 для модели контакта по ребру, что подтверждает вывод о том, что управление НДС при контакте зерна с поликристаллом наиболее эффективно через влияние характеристик связки.

Таблица 5.3 – 3D НДС в характерных точках конечноэлементной модели при плоском контакте зерна (гранью)

	Базовый вариант	Связка		СТМ		Зерно
		E=100 ГПа	*E*=130 ГПа	*E*=800 ГПа	*E*=1000 ГПа	*E*=800 ГПа
$U_y^{\text{зер}}$, мкм	0,6653	0,840	1,010	0,443	0,3649	0,6501
$\sigma_{\text{пк}}$, МПа	753,1	960,7	1150	915,0	987,1	789,2
$\sigma_{\text{св}}$, МПа	946,7	1159	1354	989,2	1004	894

Влияние физико-механических свойств СТМ, зерна и связки на 3D НДС системы «СТМ–зерно–связка» приведено на рис. 5.8.



а – контакт алмазного зерна с СТМ по вершине; б – контакт алмазного зерна с СТМ по ребру;
в – контакт алмазного зерна с СТМ по плоскости.

Условные обозначения: – напряжение «зерно-связка»; – напряжение «зерно-СТМ»; – деформация «зерно-СТМ»

Из анализа табл. 5.1–5.3 и рис. 5.8 видно, что глубина упругого внедрения алмазных зерен, контактирующих вершиной, ребром или площадкой, различается незначительно, однако при этом величина приведенных напряжений в поликристалле может различаться более чем в 20 раз, а в связке более чем в 4 раза. Таким образом, *зерна с площадками износа (контактирующие гранью) и кристаллиты расположенные «твердой» гранью в зоне контакта являются существенным ограничивающим фактором производительного процесса шлифования и образуют износостойкую пару трения «твердая грань кристаллита СТМ – твердая грань алмазного зерна»*.

Устранить такое аномальное для производительного шлифования состояние возможно тремя путями:

– удалить неблагоприятные зерна с поверхности РПК (например, удалением связки);

– целенаправленно разрушать площадку износа (например, воздействием алмазными инденторами с частотой ультразвуковых колебаний (см. главу 6);

– сколоть зерно по плоскости, параллельной октаэдрической грани, по которой алмаз легче всего раскалывается, используя анизотропию свойств СТМ и зерен.

5.3. Моделирование совместной работы различно ориентированных зерен при контакте с поликристаллом

Рассмотренные выше *модели контакта зерна с поликристаллом по вершине, ребру и грани являются основой для моделирования совместной работы зерен различной ориентации.*

Если общее число зерен модели, находящихся в контакте с поликристаллом N, а относительное количество зерен, ориентированных вершиной, ребром и гранью соответственно $\overline{n}_{\text{в}}$, $\overline{n}_{\text{р}}$ и $\overline{n}_{\text{гр}}$, усилие, действующее на связку при перемещении верха связки $U_y^{\text{св}}$ с учетом, (5.8) и (5.11) равно:

$$P = N\left(P_{\text{в}}\bar{n}_{\text{в}} + P_{\text{р}}\bar{n}_{\text{р}} + P_{\text{гр}}\bar{n}_{\text{гр}}\right) = N(4{,}125\bar{n}_{\text{в}} + 7{,}369\bar{n}_{\text{р}} + 9{,}285\bar{n}_{\text{гр}})U_y^{\text{св}}. \quad (5.13)$$

В действительности зерна могут занимать и промежуточные положения, которые при моделировании не рассматривались. Кроме того, в соотношении (5.11) $\bar{n}_{\text{в}}$, $\bar{n}_{\text{р}}$ и $\bar{n}_{\text{гр}}$ связаны зависимостью

$$\bar{n}_{\text{в}} + \bar{n}_{\text{р}} + \bar{n}_{\text{гр}} = 1. \quad (5.14)$$

Из анализа результатов, приведенных в табл. 5.1–5.3 видно, что ответственными за разрушение зерна и СТМ являются напряжения в поликристалле (узле контакта зерна с поликристаллом), возникающие при контакте зерна с СТМ вершиной.

Для производительного шлифования необходимо выполнение условия разрушения СТМ в контакте с зерном, но при этом зерно не должно выпадать из связки. При упругой схеме шлифования подстановка в уравнение накладывает ограничения на напряжения в поликристалле и связке:

$$\sigma_{\text{пк}} = 8184{,}82 \cdot \frac{P}{N(4{,}125\bar{n}_{\text{в}} + 7{,}369\bar{n}_{\text{р}} + 9{,}285\bar{n}_{\text{гр}})} \geq [\sigma]_{\text{пк}}; \quad (5.15)$$

$$\sigma_{\text{св}} = 339{,}93 \cdot \frac{P}{N(4{,}125\bar{n}_{\text{в}} + 7{,}369\bar{n}_{\text{р}} + 9{,}285\bar{n}_{\text{гр}})} \leq [\sigma]_{\text{св}}. \quad (5.16)$$

Кроме того, в качестве ограничений должны быть рассмотрены допустимые сжимающие напряжения (суммарные) в поликристалле, исключающие его объемное разрушение (растрескивание):

$$\sigma_{\text{пк}} = \frac{P}{F} \leq [\bar{\sigma}]_{\text{пк}}, \quad (5.17)$$

где F – площадь поликристалла (для модели F = 1 мм^2) и предельное число зерен в контакте [N] (определяется концентрацией и рабочей высотой зерен).

При этом принято, что для вновь заправленного круга:

$$\bar{n}_{\text{в}} = 1, \ \bar{n}_{\text{р}} = \bar{n}_{\text{гр}} = 0,$$

а для переходного периода:

$$\bar{n}_{\text{в}} = \bar{n}_{\text{р}} = \bar{n}_{\text{гр}} = 0{,}33.$$

При жесткой схеме шлифования уравнениями для ограничений являются зависимости (5.17) и (5.15) и уравнение, получаемое в результате подстановки в (5.17):

$$\frac{N(4{,}125\overline{n}_{\text{в}} + 7{,}369\overline{n}_{\text{р}} + 9{,}285\overline{n}_{\text{гр}})U_y^{\text{св}}}{F} \le [\overline{\sigma}]_{\text{пк}}. \qquad (5.18)$$

На рис. 5.9 представлены зависимости силовых (а) и кинематических (б) воздействий (P и $U_y^{\text{св}}$) от количества контактирующих зерен (концентрации), определяющие эффективные условия обработки СТМ. Таким образом, *расчетным путем определена оптимальная зона бездефектной обработки СТМ, в которой выполняются условия эффективного съема припуска, удержания алмазных зерен в связке и исключения объемного разрушения (растрескивания) поверхности СТМ.*

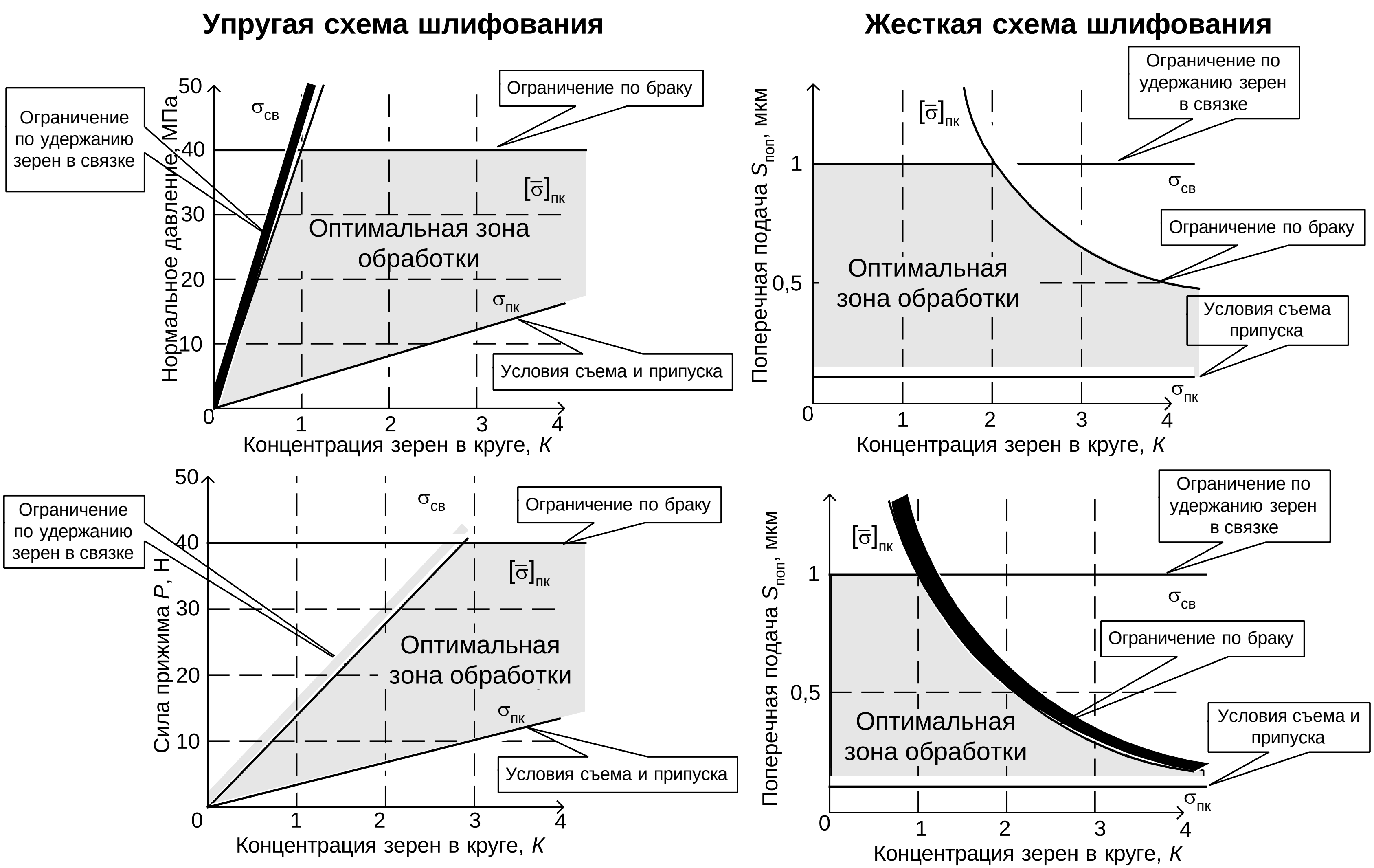
Эффективность обработки определяется количеством снятого материала поликристалла. Объем снимаемого материала поликристалла может быть определен как:

$$V_{\text{стм}} = \left(V_{\text{в}}^2\overline{n}_{\text{в}} + V_{\text{р}}\,\overline{n}_{\text{р}} + V_{\text{гр}}\overline{n}_{\text{гр}}\right), \qquad (5.19)$$

где $V_{\text{в}}$, $V_{\text{р}}$, $V_{\text{гр}}$ – объемы элементов СТМ с закритическими приведенными напряжениями (энергиями деформации) в контакте с зерном соответственно вершиной, ребром и гранью.

В табл. 5.4 приведены результаты расчетов суммарных объемов разрушенных зерен в зависимости от рабочей высоты их выступания из связки.

Таким образом, *теоретически определена область оптимального разрушения элементов системы «СТМ–зерно–связка», в которой зерно удерживается в связке и не разрушается, а СТМ разрушается в контакте, но не растрескивается из-за общей нагрузки всех зерен (исключается брак (см. рис. 5.9)). Теоретически может быть определена область оптимальных условий алмазного шлифования различных марок СТМ, в том числе и вновь создаваемых.* Дальнейшие экспериментальные исследования с целью сокращения их объема, будут проводиться в этой области.



а, б – круг острый; в, г – круг изношенный

Таблица 5.4 – Зависимость суммарного объема разрушенных зерен на участке поверхности круга площадью 100 мм^2 от их рабочей высоты

$\varepsilon_{кр}$	Зернистость	h_{max}, мкм	Суммарный разрушенный объем зерен при заданной рабочей высоте, мм^3				
			$0{,}1h_{max}$	$0{,}2h_{max}$	$0{,}3h_{max}$	$0{,}4h_{max}$	$0{,}5h_{max}$
0,2	50/40	51,568	0,00001	0,0002	0,0017	0,0076	0,0236
	80/63	85,021	0,00002	0,0003	0,0021	0,0100	0,0328
	100/80	103,118	0,00003	0,0004	0,0032	0,0144	0,0453
	200/160	202,622	0,00006	0,0007	0,0064	0,0295	0,0936
	315/250	321,013	0,00008	0,0013	0,0111	0,0494	0,1529
0,3	50/40	47,183	0,000003	0,0001	0,0006	0,0036	0,0129
	80/63	75,299	0,000008	0,0002	0,0013	0,0062	0,0209
	100/80	88,447	0,000036	0,0005	0,0029	0,0121	0,0357
	200/160	172,216	0,000080	0,0010	0,0063	0,0265	0,0765
	315/250	275,135	0,000070	0,0012	0,0086	0,0387	0,1161
0,4	50/40	38,084	0,000008	0,0001	0,0009	0,0037	0,0111
	80/63	62,017	0,000018	0,0002	0,0012	0,0052	0,0160
	100/80	72,440	0,000035	0,0005	0,0030	0,0107	0,0284
	200/160	141,945	0,000075	0,0010	0,0061	0,0222	0,0589
	315/250	225,086	0,000089	0,0015	0,0099	0,0362	0,0955
0,5	50/40	32,918	0,000002	0,00004	0,0003	0,0016	0,0054
	80/63	53,070	0,000006	0,0001	0,0005	0,0024	0,0080
	100/80	65,819	0,000007	0,0001	0,0006	0,0030	0,0105
	200/160	127,348	0,000013	0,0002	0,0014	0,0070	0,0236
	315/250	202,800	0,000022	0,0002	0,0021	0,0107	0,0362
0,6	50/40	26,099	0,000003	0,000008	0,0002	0,0009	0,0031
	80/63	41,969	0,000005	0,00005	0,0003	0,0016	0,0050
	100/80	49,861	0,000010	0,00013	0,0008	0,0029	0,0080
	200/160	96,190	0,000025	0,0003	0,0019	0,0067	0,0180
	315/250	153,338	0,000033	0,0004	0,0025	0,0093	0,0256

5.4. Влияние параметров топографии поверхности круга на 3D напряженно-деформированное состояние зоны шлифования

В процессе традиционного алмазного шлифования СТМ кругами на металлической связке аномально интенсивно изменяются выходные показатели, в соответствии с происходящими изменениями параметров режущего рельефа круга (РПК). Так, например, при шлифовании двухслойных алмазных пластин (ДАП) практически все острые зерен на РПК за 2 минуты работы трансформируются в зерна с площадками износа.

Изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «СТМ–зерно–связка» при различных параметрах топографии взаимодействующих поверхностей необходимо для определения их влияния на количественные показатели процесса микроразрушения ее элементов в процессе шлифования. Такие расчеты осуществляются в разработанном теоретическом модуле экспертной системы процесса шлифования СТМ [41].

В качестве параметров топографии РПК, влияющих на 3D НДС системы «СТМ–зерно–связка», выбраны величина угла при вершине алмазного зерна φ; число зерен в контакте с СТМ; рабочая высота выступания зерен из связки; наличие площадок износа в контакте с СТМ. В результате в пакете программ типа Cosmos выявлено влияние этих параметров на величину главных и приведенных напряжений, энергии и плотности энергии деформации в каждом элементе системы. Расчеты позволяют определять объемы разрушенных СТМ и алмазных зерен, а также объемы выпавших из связки зерен по объему конечных элементов с закритическими значениями напряжений и/или энергии (плотности энергии) деформации. Результаты этих расчетов использованы в теоретическом модуле экспертной системы для определения производительности шлифования и удельного расхода зерен.

Расчеты влияния остроты алмазных зерен (угол при вершине зерна φ) на величину приведенных напряжений и энергии деформации в элементах системы «СТМ–зерно–связка» показали, что этот параметр является определяющим для взаимного микроразрушения как СТМ, так и алмазных зерен (рис. 5.10, 5.11). Так, увеличение угла φ с 30° до 120° уменьшает величину приведенных напряжений в контакте «зерно–СТМ» более, чем в 3 раза, что уменьшает объем разрушенного СТМ с 0,256 до 0,07, а алмазных зерен – с

0,317 до 0,09 10^{-9} $мкм^3$ (табл. 5.5). Основным фактором, снижающих эффективность производительного процесса шлифования СТМ, является образование на алмазных зернах площадок износа. Наличие в контакте с СТМ зерен с площадками износа на порядок уменьшает величину приведенных напряжений в контакте «зерно–СТМ» (см. рис. 5.11). Влияние числа зерен в контакте с СТМ и их рабочей высоты на НДС системы «СТМ–зерно–связка» приведено на рис. 5.12, 5.13.

Таблица 5.5 – Результаты расчетов объемов разрушенных СТМ ($V_{стм}$) и алмазных зерен ($V_з$)

Разрушенные объемы, $мм^3$	Модуль упругости связки E, МПа			
	50	100	150	200
$V_З$	0,248	0,365	0,483	0,564
$V_{СТМ}$	0,117	0,183	0,214	0,283
	Угол при вершине зерна φ			
	30°	60°	90°	120°
$V_З$	0,317	0,265	0,113	0,09
$V_{СТМ}$	0,256	0,183	0,11	0,07

Примечание. Общие условия: обрабатываемый материал – АСПК; марка зерна – АС6; концентрация зерен – 100 % (4); относительная величина критической заделки зерен $\varepsilon_{кр}$ = 0,5; нормальное давление $P_н$ = 2,0 МПа.

Влияние указанных параметров на НДС системы объясняется перераспределением подводимой в зону шлифования энергии между элементами системы «СТМ–зерно–связка» Более острые зерна позволяют больше энергии сконцентрировать в зоне их контакта с СТМ, что способствует интенсификации микроразрушения.

Рабочая высота зерен в большой степени влияет на критическую величину их заделки в связку. Проведенные расчеты позволили получить зависимости влияния рабочей высоты зерен, модуля упругости металлической связки, нормального давления $P_н$ (для упругой схемы шлифования) и величины поперечной подачи $S_{поп}$ (для «жесткой» схемы шлифования) на критическую величину заделки зерен в связку (см. рис. 5.13). Эти результаты могут быть использованы для определения критической величины заделки алмазных зерен.

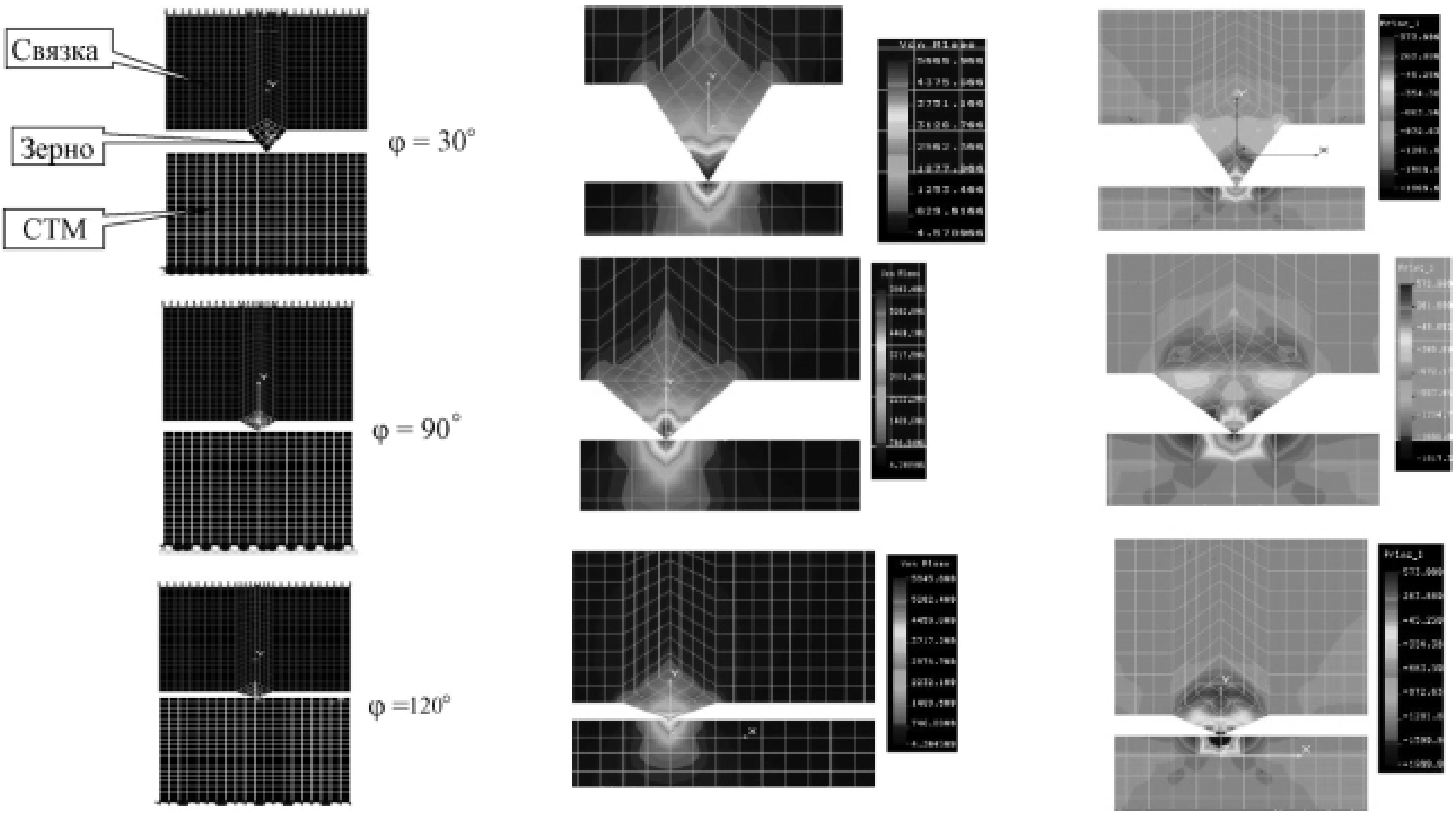


Рисунок 3.16 – Влияние угла при вершине зерна на 3D НДС системы «СТМ-зерно-связка»:
а – расчетные схемы; б – приведенные напряжения; в – главные напряжения.
Результаты расчетов: $V_{СТМ} = 0,15\ \varphi^{-0,26}$ мкм^3; $V_з = 0,27\ \varphi^{-0,27}$ мкм^3; $\Delta h_{СТМ} = 0,02\ \varphi^{-0,23}$ мкм; $\Delta h_з = 0,03\ \varphi^{-0,13}$ мкм,
где $V_{СТМ}$, $V_з$ – соответственно объем разрушенного зерна и СТМ;
$\Delta h_{СТМ}$, $\Delta h_з$ – соответственно линейный износ зерна и СТМ

Влияние указанных параметров на НДС системы объясняется перераспределением подводимой в зону шлифования энергии между элементами системы «СТМ–зерно–связка» Более острые зерна позволяют больше энергии сконцентрировать в зоне их контакта с СТМ, что способствует интенсификации микроразрушения.

Рабочая высота зерен в большой степени влияет на критическую величину их заделки в связку. Проведенные расчеты позволили получить зависимости влияния рабочей высоты зерен, модуля упругости металлической связки, нормального давления $P_{н}$ (для упругой схемы шлифования) и величины поперечной подачи $S_{поп}$ (для «жесткой» схемы шлифования) на критическую величину заделки зерен в связку (см. рис. 5.13). Эти результаты могут быть использованы для определения критической величины заделки алмазных зерен.

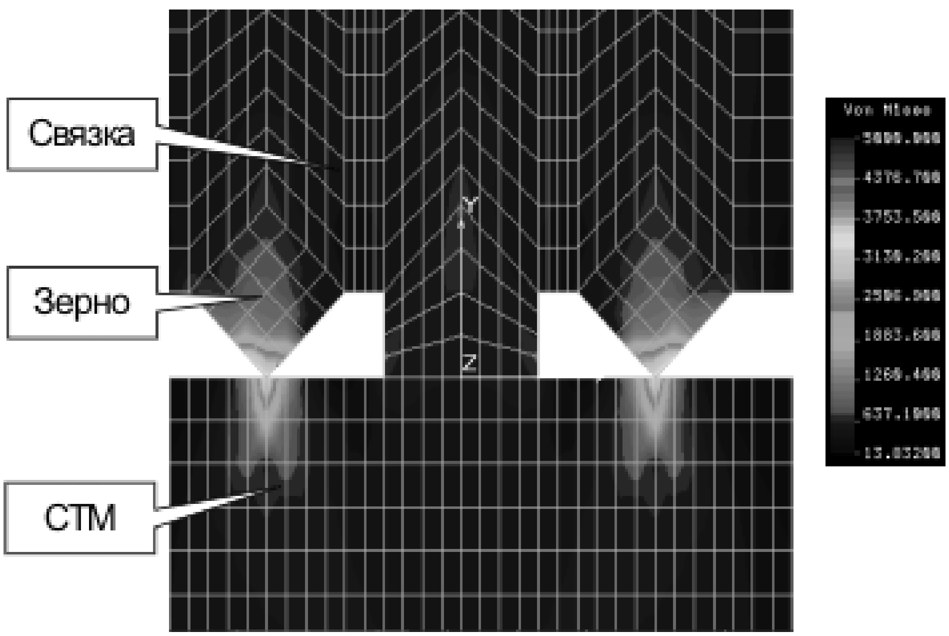
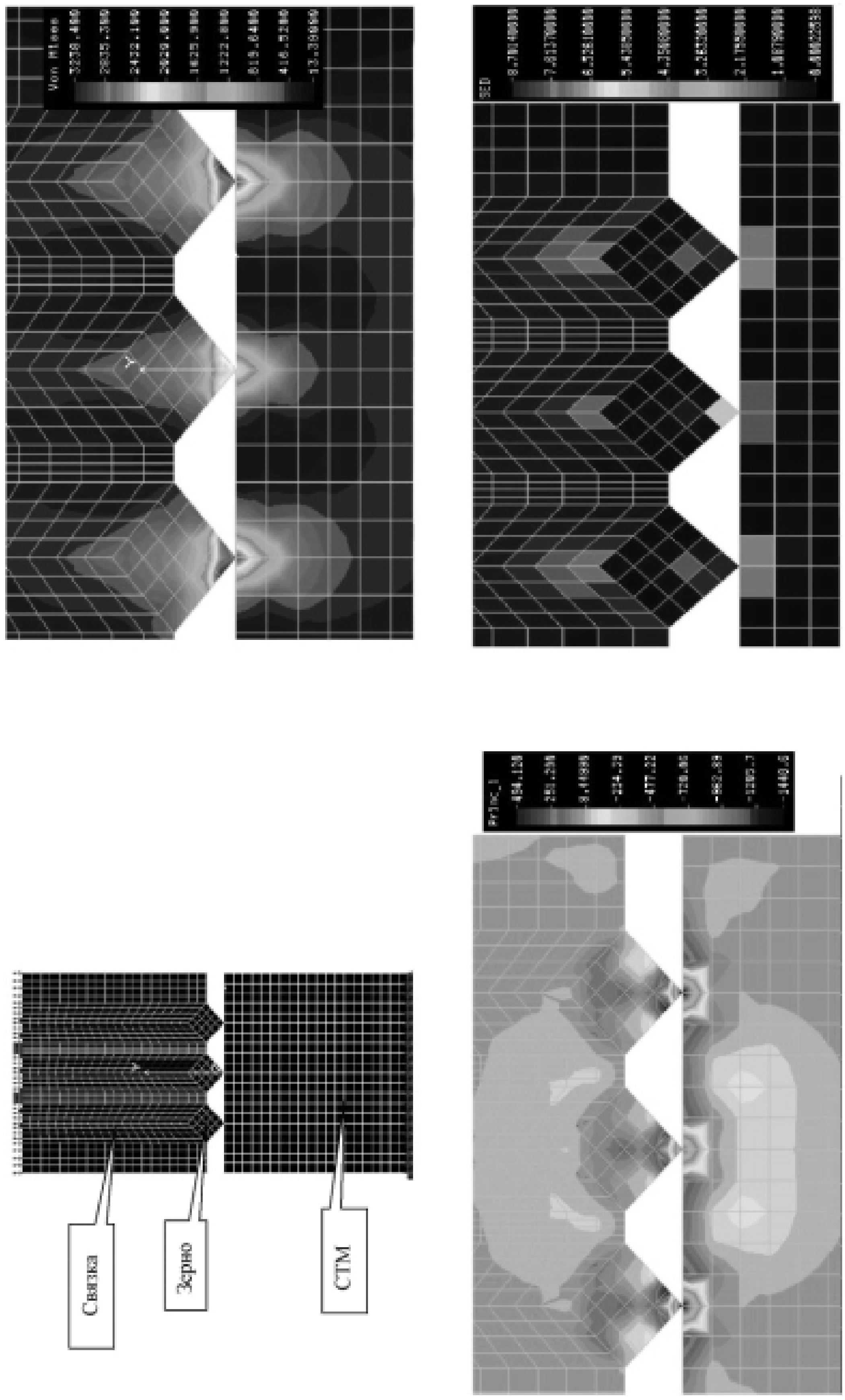


Рисунок 5.11 – Приведенные напряжения в системе «РПК–СТМ»

Анализ полученных зависимостей показал, что даже незначительное число зерен с площадками износа «забирает» на себя большую часть нагрузки и не дает острым зернам производить эффективную работу микроразрушения СТМ, т. к. напряжения в контакте не достигают предела его прочности (см. рис. 5.11).



а – расчетная схема; б – приведенные напряжения; в – главные напряжения; г – плотность энергии деформации

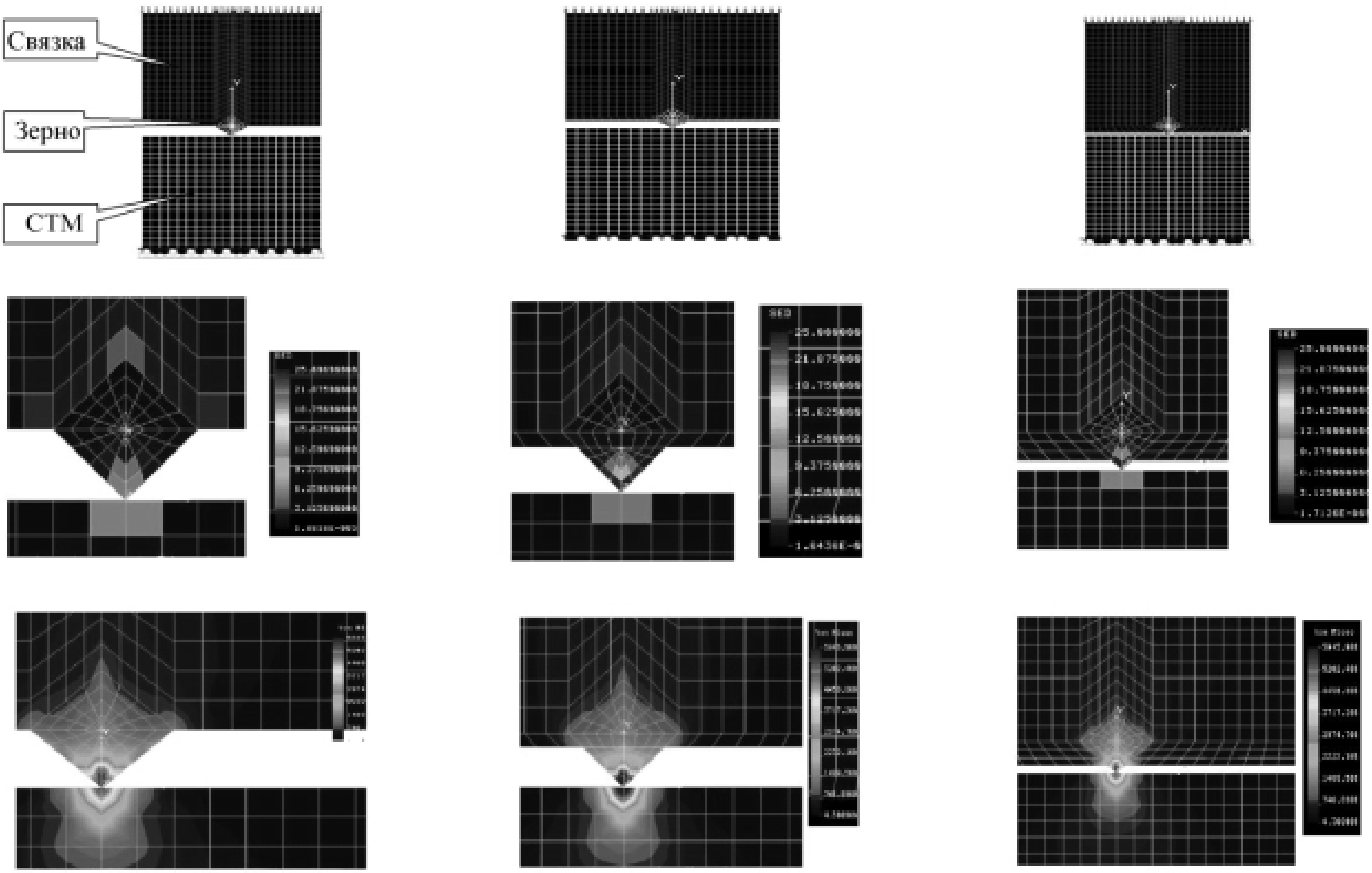


Рисунок 5.13 – Влияние рабочей высоты зерен на параметры НДС системы «СТМ–зерно–связка»:
а – $h_р = l_з/2$; б – $h_р = l_з/3$; в – $h_р = l_з/4$

Зерна с площадками износа не могут быть разрушены только за счет увеличения нагрузки $P_н$, т. к. например, при прочности зерен 32 Н уже даже при 100 зернах в контакте с СТМ общая нагрузка на него будет 3200 Н, что приведет к растрескиванию обрабатываемой поверхности СТМ (брак при заточке лезвийного инструмента из СТМ). Следовательно, такие зерна необходимо либо «убирать» с рабочей поверхности круга (удалением связки), либо микроразрушать вершины зерен для образования острых субмикрокромок (например, ультразвуковым способом).

Уменьшая число зерен в контакте, например, за счет концентрации алмазов в круге или увеличения рабочей высоты зерен $h_р$, увеличивается нагрузка на единичное алмазное зерно, уменьшается вероятность контактирования их с СТМ площадками износа и можно существенно интенсифицировать процесс микроразрушения припуска под обработку СТМ. Критическая величина заделки зерна в связку, определяемая величиной максимальных приведенных напряжений в ней, также зависит от соотношения в контакте зерен с площадками износа и острых. Так, расчеты показали, что увеличение зерен с площадками износа с 10 % до 80 % приводит к уменьшению критической величины заделки $h_{кр}$ от 45 до 25 мкм.

Исследование влияния параметров топографии РПК на 3D НДС системы показали, что если алмазное зерно даже не значительно выступает из связки ($h_р \neq 0$), т. е. связка не контактирует с обрабатываемым материалом, в нем возникают напряжения, достаточные для процесса самозатачивания (микроразрушения). Если зерно полностью заделано в связку ($h_р = 0$), за счет объемного «обжатия» связки и отсутствия свободных границ оно не самозатачивается. В связи с этим производительный процесс шлифования СТМ следует осуществлять только при реализации первого типа взаимодействия в системе «РПК–СТМ» т.е. без контакта связки с обрабатываемым материалом.

5.5. Вопросы для самостоятельной подготовки

1. Метод конечных элементов в изучении процесса разрушения.
2. Возможности программных пакетов «Cosmos», «Ansys», «Nostran».
4. Возможности программного пакета «Wave Advand Edge».
5. Построить 3D модель алмазного зерна в пакете «Cosmos».
6. Построить 3D модель системы «алмазное зерно–связка обрабатываемый материал» в пакете «Cosmos».
7. Рассчитать 3D НДС в системе «алмазное зерно–связка обрабатываемый материал».
8. Рассчитать приведенные напряжения в системе «алмазное зерно–связка обрабатываемый материал».
9. Рассчитать энергию деформации в системе «алмазное зерно–связка обрабатываемый материал».
10. Рассчитать главные напряжения в системе «алмазное зерно–связка обрабатываемый материал».
11. Рассчитать плотность энергии деформации в системе «алмазное зерно–связка обрабатываемый материал».
12. Рассчитать объем разрушенных алмазных зерен.
13. Рассчитать объем разрушенного обрабатываемого материала.
14. Рассчитать величину критической заделки зерен в связку.
15. Влияние параметров топографии поверхности круга на уровень 3D НДС в зоне шлифования.

ГЛАВА 6. ТОПОГРАФИЧЕСКАЯ ПРИСПОСАБЛИВАЕМОСТЬ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ЗОНЕ ШЛИФОВАНИЯ

Tempus fugit, aeternitas manet –
Время бежит, вечность остаётся.

Материю видит перед собой всякий; содержание находит лишь тот, кто имеет с ним дело; форма не остаётся тайной для большинства.
Гёте

В разделе приводится теоретико-экспериментальный анализ топографической приспосабливаемости 3D параметров топографии рабочей поверхности круга (РПК) и обрабатываемой поверхности сверхтвердого материала (СТМ) при алмазном шлифовании. Подчеркивается определяющая роль топографической составляющей процесса приспосабливаемости. Излагается методология теоретико-экспериментального определения фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ», влияния анизотропии физико-механических свойств алмазных зерен на интенсивность их износа и изменение параметров РПК. Рассмотрены вопросы теоретического обоснования возможности управления величиной фактической площади контакта. Анализируются теоретические зависимости, описывающие взаимосвязь и изменение топографических параметров приспосабливаемости.

6.1. Теоретический анализ топографической приспосабливаемости при шлифовании СТМ

Величина контактных давлений при взаимодействии РПК с обрабатываемым СТМ определяется числом зерен в контакте и общей нагрузкой, которая задается либо поперечной подачей (жесткая схема), либо нормальным давлением (упругая схема). Число зерен в контакте с обрабатываемым СТМ зависит от общего количества зерен на единице площади РПК и (применительно к шлифованию сверхтвердых материалов) от рабочей высоты выступания зерен, т.е. от развитости режущего рельефа круга.

Особенность предлагаемого подхода определяется предельным состоянием системы: закономерности износа круга устанавливаются для условий практического отсутствия внедрения алмазных зерен в обрабатываемый материал (твердости обрабатываемого и инструментального материалов одинаковы) и отсутствия контакта связки с СТМ; алмазные зерна изнашиваются только в пределах одной высоты их выступания из связки. Комплексный теоретический и экспериментальный анализ изменения топографических параметров рабочей поверхности круга и СТМ проводится с учетом ранее установленной чрезвычайно высокой интенсивности процесса приспосабливаемости при алмазном шлифовании СТМ с использованием 3D моделирования. В единую систему взаимодействия объединены рабочая высота зерен, число зерен на РПК, в контакте с СТМ, критическая величина их заделки в связку, относительная величина фактической площади контакта РПК с СТМ. Эти зависимости необходимы для разработки теоретического модуля экспертной системы процесса шлифования СТМ.

В основу расчета числа зерен на РПК положено равномерное распределение их в связке и объемное содержание в алмазоносном слое (концентрация). Придерживаясь выбранной методологии 3D моделирования, теоретические расчеты параметров рабочей поверхности круга рассматривались не в ее сечении, а на поверхности (рис. 6.1 а). Алмазное зерно моделировалось в форме октаэдра – наиболее распространенной форме алмазного кристаллита с размерами *a* и *H* (соответственно для зернистости 200/160 $H = 200$, $a = 160$) (рис. 6.1 в, г).

Поскольку в производительном процессе шлифования контакт связки с СТМ отсутствует, величина фактической площади контакта РПК с СТМ на макроуровне определяются только величиной опорной поверхности алмазных зерен, т. е. суммарной величиной площадок износа $\sum S_i$ на них.

Зерна в круге с концентрацией 100 % ($K = 4$) занимают одну четвертую часть объема алмазоносного слоя. При моделировании зерна и приходящегося на него объема алмазоносного слоя в виде шара или куба, исходя из концентрации алмазов в круге, получим:

$$\frac{r^3}{R^3} = \frac{a^3}{A^3} = \frac{K}{16}, \tag{6.1}$$

где K – коэффициент концентрации (100 % $K = 4$; 50 % $K = 2$ и т. д.);

R – радиус шара алмазоносного слоя с одним зерном;

r – радиус алмазного зерна;

A – сторона куба объема алмазоносного слоя с одним зерном;

a – сторона кубического алмазного зерна.

Тогда площадь зерен $S_з$ на единице сечения алмазоносного слоя S будет равна:

$$S_з = S\left(\frac{K}{16}\right)^{2/3}, \tag{6.2}$$

где S – единичная площадь поверхности РПК.

После условного «разрыва» (см. рис. 6.1 б) алмазоносного слоя на поверхности РПК останется половина зерен, т. е. опорная площадь зерен $S_з$ будет равна:

$$S_з = \frac{1}{2} S\left(\frac{K}{16}\right)^{2/3}. \tag{6.3}$$

Это справедливо при максимальной высоте выступания зерен из связки, равной 0,5 $H_з$, где $H_з$ – максимальный размер зерна. Рабочая высота зерен теоретически может быть равной $h_р = \alpha \cdot H_з$, где α – относительная высота выступания зерен из связки ($\alpha = 0 \ldots 1$, т. е. в рассматриваемом случае $\alpha = 0,5$).

Площадь сечений зерен в плоскости разрыва (опорная площадь профиля) равна

$$\sum_{1}^{n} S_{з_i} = \alpha S\left(\frac{K}{16}\right)^{2/3}. \tag{6.4}$$

Величина фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ» в большой степени определяется величиной относительной опорной площади РПК t_{ps}. Под величиной t_{ps} приняли (по аналогии со стандартным параметром шероховатости поверхности t_p) отношение величины суммы площадей площадок износа на зернах на заданном уровне P % от $h_{\max}$ (степень износа зерен круга) $\eta_з = \sum S_i$ к номинальной площади базового участка A_c:

$$t_{ps} = \frac{\sum \cdot S_i}{A_c} \cdot 100\,\%, \tag{6.5}$$

где $S_i = a_i^2$.

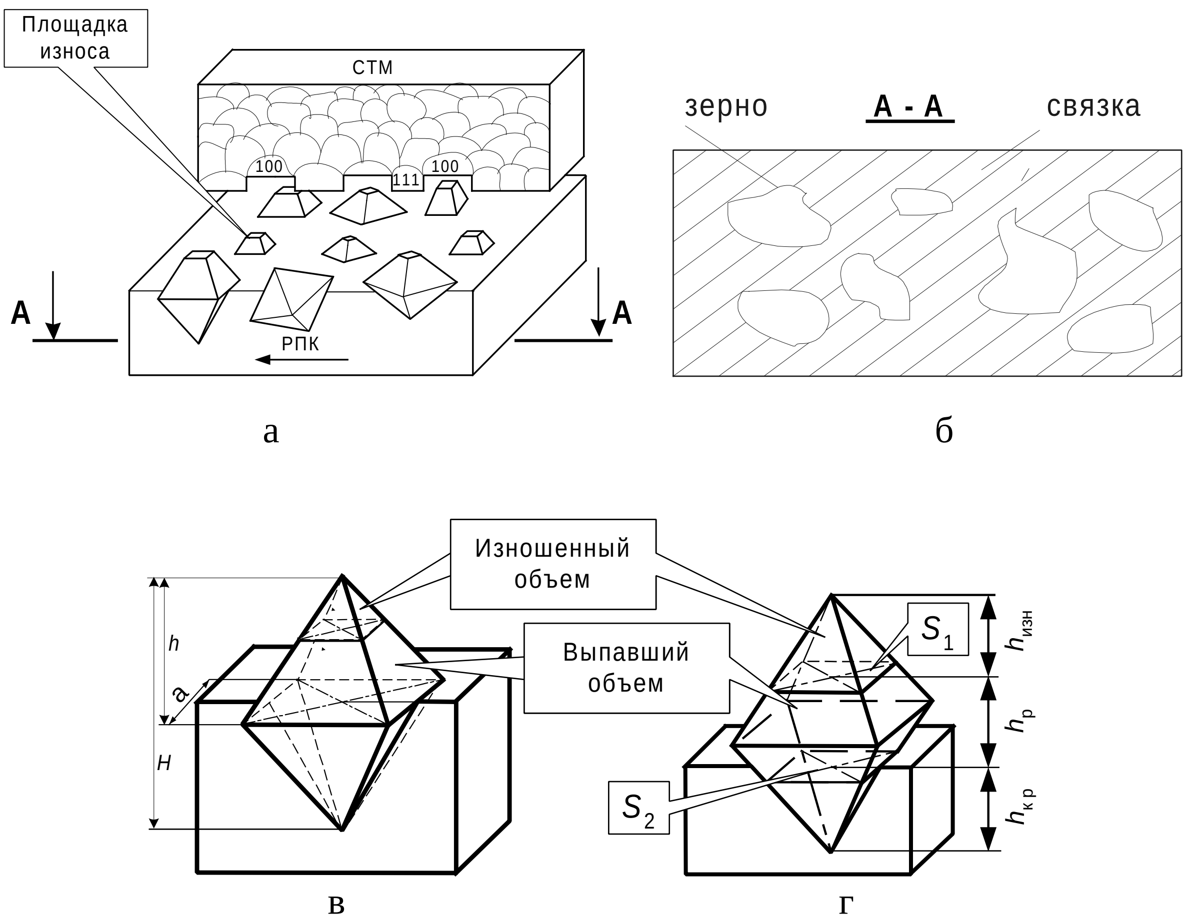
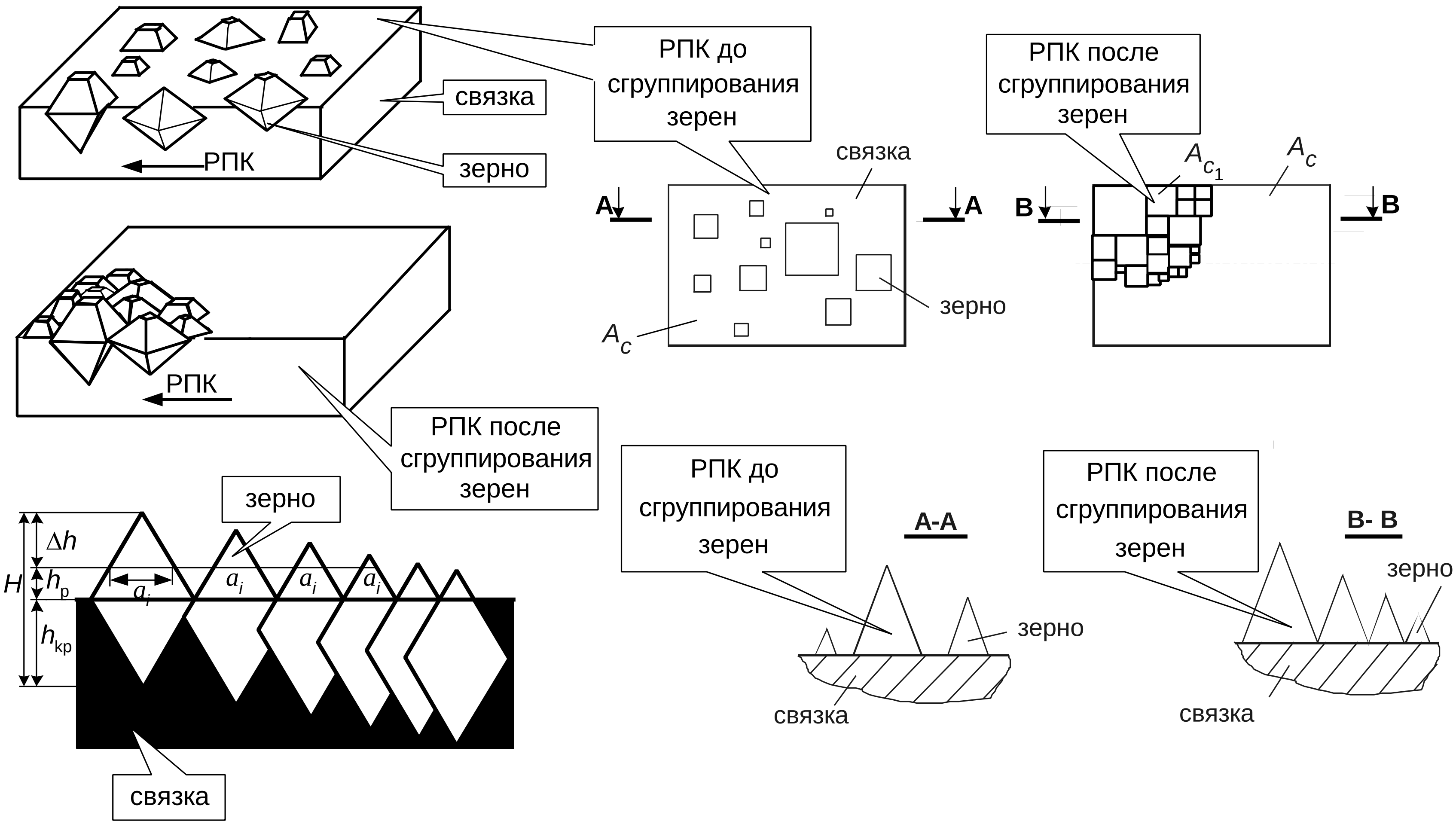


Рисунок 6.1 – К расчету параметров топографии рабочей поверхности круга:
а – расчетная схема; б – сечение алмазоносного слоя;
в, г – расчетные схемы системы «зерно–связка»

По мере износа круга (увеличения Δh_i) величина S_i будет расти. Расчетная схема для определения величины t_{ps} в зависимости от критической величины заделки зерен в связку $h_{кр}$ и рабочей высоты зерен $h_р$ представлена на рис. 6.2 а.



а – модель РПК, б – изменяющаяся модель РПК

Тогда относительная опорная площадь РПК t_{ps} будет равна:

$$t_{ps} = \frac{\alpha}{S}\left(\frac{K}{16}\right)^{2/3} \cdot 100\% . \quad (6.6)$$

При различной высоте выступания зерен из связки величина t_{ps} для круга 100 % концентрации теоретически может меняться (при изменении *a* от 0 до 1) от 0 до 39,73 %. Таким образом, если «вскрывать» круг электрохимическим способом, величина t_{ps} теоретически (при допущении, что критическая величина заделки зерна в связку $h_{кр}$ может быть равной 0) будет возрастать на уровне связки от 0 до 19,84 %. Аналогично можно получить выражение для относительной опорной длины профиля РПК t_p:

$$t_p = \alpha\left(\frac{K}{16}\right)^{1/3} \cdot 100\% . \quad (6.7)$$

С увеличением высоты выступания зерен t_p может меняться от 0 до ≈63 %. При высоте выступания зерен $h_р = 0{,}5\ l_з$, величина t_p не может быть больше 32 %. В этих расчетах установлено принципиальное отличие в определении относительной опорной длины профиля РПК, выполненных Поповым С. А. и другими авторами, у которых она равнялась 100 % [29]. Это отличие объясняется тем, что они рассматривали профили РПК без разделения зерен и связки.

При отсутствии внедрения алмазных зерен в обрабатываемый материал в контакте будут находиться только максимально выступающие зерна (точнее вершины зерен), находящиеся в диапазоне величины их вдавливания в связку Δh. Тогда число контактирующих с СТМ вершин зерен может измениться в процессе шлифования только за счет: 1) износа (разрушения) вершин зерен верхнего уровня и перехода этих вершин в следующий уровень, т. е. суммирование от уровня к уровню; 2) упругого вдавливания зерен верхнего уровня и перехода вершин этого уровня на следующий.

Износ зерен в круге после вскрытия (например, электрохимическим способом) происходит только в пределах одной высоты их выступания над уровнем связки. При этом все зерна на рабочей поверхности разделим на

4 группы: I – зерна, выпавшие до касания с СТМ, II – зерна, выпадающие в первый момент шлифования (у них величина заделки в связку ($h_з$) меньше критической ($h_{кр}$)), III – зерна, активно работающие, IV – зерна над связкой после образования пары трения «алмаз–алмаз». Совпадение характера изменения закона распределения опорной площади зерен по мере износа круга, полученных расчетным методом с помощью системы моделирования, разработанной в разделах 1–3 (рис. 6.3 а), и методом лазерного сканирования (рис. 4.1–4.3) убедительно подтверждают достоверность выбранной расчетной схемы.

В первый период шлифования вскрытым кругом из связки выпадут зерна, величина заделки которых $h_з$ будет меньше критической $h_{кр}$. При дальнейшем шлифовании выпадение из связки зерен маловероятно, т.к. число их в контакте будет постоянно расти, а, следовательно, нагрузка на единичное зерно уменьшается и в работу будут вступать зерна с увеличенной заделкой в связку. По мере износа зерен величина t_p и t_{ps} на поверхности контакта с СТМ будет расти. Определим зависимость t_{ps} от величины рабочей высоты зерен, т. е. в процессе износа круга, используя расчетную схему, представленную на рис. 6.2 а.

Из подобия треугольников получим текущую величину t'_{ps}:

$$t'_{ps} = \frac{\alpha(H_з - h_р)}{H_з}\left(\frac{K}{16}\right)^{2/3} \cdot 100\% . \tag{6.8}$$

Примем равномерный закон распределения вершин зерен над уровнем связки, и с учетом, что рабочая высота зерен $h_р = aH_з = H_з - h_{кр}$, получим:

$$t_{ps} = \frac{(H_з - h_{кр} - h_р)}{H_з}\left(\frac{K}{16}\right)^{2/3} \cdot 100\% . \tag{6.9}$$

Изменение величины относительной опорной площади поверхности РПК t_{ps} от величины критической заделки зерен в связку, их концентрации и рабочей высоты, полученные расчетным путем (расч) и методом лазерного сканирования (эксп), приведены в табл. 6.1–6.2.

Таблица 6.1 – Результаты теоретического (расч) и экспериментального (эксп) определения относительной опорной площади РПК

%	Рабочая высота зерен $h_р = al_з$						
	a = 0	a = 0,1	a = 0,2	a = 0,3	a = 0,4	a = 0,5	a = 0,6
t_{ps} (расч)	12,5	9,8	7,2	4,9	3,2	2,5	1,2
t_{ps} (эксп)	12,3	9,7	7,0	4,5	3,1	2,4	1,1
	Концентрация, %						
	10	20	30	50	100	150	200
t_{ps} (расч)	0,25	0,71	0,82	1,25	2,5	3,75	5,0
t_{ps} (эксп)	0,23	0,69	0,78	1,21	2,42	3,62	4,83
	Нормальное давление $Р_н$, МПа						
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
t_{ps} (расч)	1,25	2,34	3,45	4,21	6,25	7,5	12,6
t_{ps} (эксп)	1,18	2,17	2,37	4,11	6,19	7,64	12,5
	Относительная критическая величина заделки $h_{кр} = al_з$						
	a = 0,2	a = 0,3	a = 0,4	a = 0,5	a = 0,6	a = 0,7	a = 0,8
t_{ps} (расч)	10	8,5	7,5	5,1	2,5	1,32	0,7
t_{ps} (эксп)	9,89	8,61	7,48	4,6	3,47	1,29	0,66

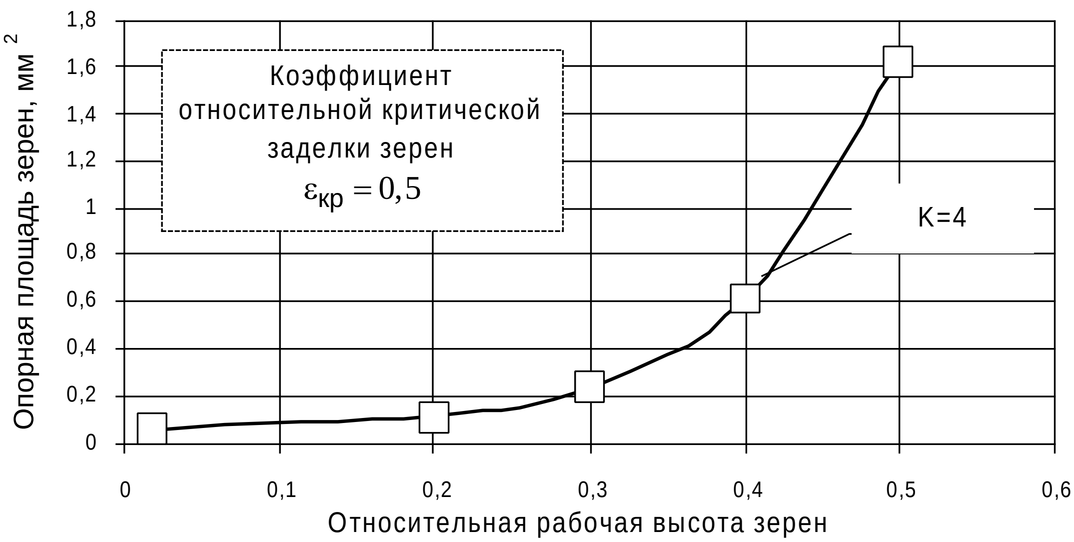


Рисунок 6.3 – Теоретическая зависимость опорной площади зерен от их высоты

Таблица 6.2 – Зависимость опорной площади зерен от их рабочей высоты на участке поверхности круга площадью 100 мм^2

$\varepsilon_{кр}$	Зернистость	h_{max}, мкм	Количество зерен по глубине от наиболее выступающего зерна				
			$0{,}1h_{max}$	$0{,}2h_{max}$	$0{,}3h_{max}$	$0{,}4_{max}$	$0{,}5h_{max}$
0,2	50/40	51,684	0,0082	0,1072	0,5670	1,9099	4,4858
	80/63	85,021	0,0072	0,0784	0,4312	1,6029	3,9715
	100/80	103,118	0,0073	0,0956	0,5418	1,8256	4,3724
	200/160	202,622	0,0069	0,0934	0,5564	1,9340	4,5824
	315/250	321,013	0,0084	0,1062	0,6037	1,9866	4,6698
0,3	50/40	44,078	0,0018	0,0369	0,2674	1,1326	2,9893
	80/63	75,299	0,0036	0,0505	0,3046	1,1470	2,9262
	100/80	88,447	0,0129	0,1065	0,5304	1,7073	3,7768
	200/160	172,216	0,0142	0,1188	0,6055	1,8912	4,0673
	315/250	275,135	0,0084	0,0960	0,5444	1,8042	3,9804
0,4	50/40	39,415	0,0070	0,0725	0,3817	1,2124	2,7950
	80/63	62,017	0,0081	0,0636	0,3230	1,0657	2,5524
	100/80	72,440	0,0166	0,1397	0,6152	1,6313	3,3845
	200/160	141,945	0,0160	0,1482	0,6543	1,7370	3,5434
	315/250	225,086	0,0151	0,1505	0,6738	1,7814	3,5986
0,5	50/40	31,883	0,0019	0,0281	0,1744	0,6737	1,7347
	80/63	53,070	0,0032	0,0276	0,1638	0,6119	1,6192
	100/80	65,819	0,0022	0,0258	0,1631	0,6512	1,7358
	200/160	127,348	0,0022	0,0333	0,1986	0,7695	1,9314
	315/250	202,800	0,0017	0,0309	0,1908	0,7465	1,8648
0,6	50/40	25,140	0,0020	0,0221	0,1383	0,4866	1,1988
	80/63	41,969	0,0023	0,0258	0,1424	0,4951	1,1927
	100/80	49,861	0,0058	0,0545	0,2350	0,6669	1,4641
	200/160	96,190	0,0075	0,0691	0,2835	0,7772	1,6325
	315/250	153,338	0,0066	0,0608	0,2424	0,6901	1,5055

Примечание: $\varepsilon_{кр}$ – коэффициент относительной критической заделки зерен в связке; h_{max} – высота наиболее выступающего зерна на исследуемом участке поверхности круга.

Учитывая, что площадь, занимаемая зернами на единице поверхности РПК $S_з$, при $h_р = 0$ равна

$$\sum S_з = \frac{\left(H_з - h_{кр}\right)S}{H_з}\left(\frac{K}{16}\right)^{2/3}, \tag{6.10}$$

получим выражение для числа зерен на РПК:

$$n = \frac{\left(H_з - h_{кр}\right)S}{H_з S_з}\left(\frac{K}{16}\right)^{2/3}, \tag{6.11}$$

где $S_з$ – средняя площадь сечения зерна. Для зерна в форме октаэдра в сечении будет квадрат со стороной a, то:

$$n = \frac{S\left(H_з - h_{кр}\right)}{H_з^{\ 2}}\left(\frac{K}{16}\right)^{2/3}. \tag{6.12}$$

Расчетные (расч) и модельные (мод) зависимости числа зерен n на 1см^2 РПК от коэффициента относительной критической величины и заделки в связку приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3 – Количество зерен на поверхности круга, полученное по расчетным зависимостям (расч.) и путем статистического моделирования (мод.)

Зернистость	Количество зерен на рабочей поверхности круга площадью 100 мм^2 при коэффициенте относительной критической заделки зерен в связке $\xi_{кр}$									
	$\xi_{кр} = 0,2$		$\xi_{кр} = 0,3$		$\xi_{кр} = 0,4$		$\xi_{кр} = 0,5$		$\xi_{кр} = 0,6$	
	расч.	мод.	расч.	мод.	расч.	мод.	расч.	мод.	расч.	мод.
50/40	17857	18668	15625	16268	13393	13956	11161	11641	8928	9372
80/63	7051	7693	6170	6709	5289	5749	4407	4783	3526	3867
100/80	4464	4924	3906	4320	3348	3714	2790	3081	2232	2468
200/160	2464	2926	1906	1822	1348	1712	790	481	232	271
315/250	1049	1072	943	915	537	562	331	370	225	228

Однако практический интерес представляет не только число зерен на рабочей поверхности круга, но и число зерен, находящихся в контакте с обрабатываемым СТМ. В нашем случае это число зерен на уровне их рабочей высоты $h_{\text{р}}$. Примем равномерный закон распределения вершин зерен по глубине рабочей поверхности, а рабочую величину зерен будем определять в относительных величинах от максимального размера зерна как $h_{\text{р}} = \alpha \cdot H_{\text{з}}$, где α – коэффициент относительной высоты выступания зерен (α = 0–1). Тогда зависимость числа зерен в контакте от их рабочей высоты, т. е. в зависимости от уровня износа круга будет иметь вид:

$$n = \frac{2\alpha S\left(H_{\text{з}} - h_{\text{кр}}\right)}{H_{\text{з}}^{\ 2}}\left(\frac{K}{16}\right)^{2/3}. \qquad (6.13)$$

Результаты расчетов изменения числа зерен в контакте по мере износа круга приведены в табл. 6.4. Анализ результатов позволяет сделать вывод о существенной интенсивности изменения числа зерен в контакте в зависимости от их рабочей высоты. Так, уменьшение рабочей высоты зерен в 5 раз приводит к увеличению числа их в контакте более чем в 100 раз. Таким образом, управляя высотой выступания зерен [9], на самом деле управляют числом их в контакте с обрабатываемым СТМ, а, следовательно, величиной фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ».

Установлено, что величина относительной опорной площади РПК, определяющая на макроуровне величину фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ», зависит не только от высоты выступания зерен $h_{\text{р}}$, но и от критической величины их заделки в связку $h_{\text{кр}}$. При одной и той же рабочей высоте зерен величина фактической площади контакта $A_{\text{г}}$ СТМ с РПК будет разная для различных связок.

Для оценки точности результатов, получаемых по предложенным зависимостям, для сравнения использовали систему 3D моделирования рабочей поверхности круга, разработанную в разделах 1–3.

Отклонение значений количества зерен, полученных по зависимостям 6.10–6.13, от значений, полученных путем статистического моделирования, составляет 4,3–9,7 %.

Таблица 6.4 – Зависимость количества зерен в контакте от их относительной критической заделки и рабочей высоты выступания зерен на участке поверхности площадью 100 мм^2

$\varepsilon_{кр}$	Зернистость	h_{max}, мкм	Количество зерен по глубине от наиболее выступающего зерна				
			$0{,}1h_{max}$	$0{,}2h_{max}$	$0{,}3h_{max}$	$0{,}4_{max}$	$0{,}5h_{max}$
0,2	50/40	51,684	52	353	1411	3248	5620
	80/63	85,021	18	118	468	1202	2159
	100/80	103,118	6	90	331	846	1483
	200/160	202,622	1,8	24	87	226	385
	315/250	321,013	0,8	9	35	90	155
0,3	50/40	44,078	61	382	1348	3033	5143
	80/63	75,299	13	90	362	958	1798
	100/80	88,447	22	103	369	819	1363
	200/160	172,216	6	30	106	223	360
	315/250	275,135	2,2	10	38	87	143
0,4	50/40	39,415	18	189	837	2186	3967
	80/63	62,017	16	112	394	954	1727
	100/80	72,440	33	154	409	825	1314
	200/160	141,945	8	42	112	217	340
	315/250	225,086	3	17	46	88	137
0,5	50/40	31,883	38	247	879	2030	3544
	80/63	53,070	8	69	247	718	1354
	100/80	65,819	2	52	174	499	898
	200/160	127,348	0,5	14	53	143	241
	315/250	202,800	0,1	6	20	55	93
0,6	50/40	25,140	33	215	799	1796	3004
	80/63	41,969	6	69	276	638	1136
	100/80	49,861	17	85	233	498	832
	200/160	96,190	4	28	69	141	225
	315/250	1 53,338	2	10	26	53	86

Примечание: $\varepsilon_{кр}$ – коэффициент относительной критической заделки зерен в связке; h_{max} – высота наиболее выступающего зерна на исследуемом участке поверхности круга.

Таким образом получены теоретические зависимости для расчета и отслеживания изменения по мере износа круга таких параметров, как число зерен на РПК и относительная опорная площадь поверхности t_{ps} в зависимости от зернистости круга $H_з$, концентрации K, свойств связки, степени износа круга, рабочей высоты зерен $h_р$ и критической величины их заделки в связке $h_{кр}$. Полученные зависимости могут быть успешно использованы для практических расчетов и не требуют большого объема памяти ЭВМ. Они использованы при разработке теоретического модуля экспертной системы процесса шлифования СТМ.

Однако динамика изменения относительной опорной площади РПК может служить только приближенным показателем фактической площади ее контакта с СТМ, т. к. не учитывает микронеровностей поверхностей РПК и СТМ, упругих свойств связки (вдавливания зерен в связку), приводящих к увеличению фактической площади контакта за счет увеличения числа зерен в контакте. Поэтому в теоретическом анализе изменения параметров режущего рельефа круга предусмотрели величину Δh как фактор, учитывающий упругое заглубление зерен в связку и через увеличение их количества в контакте влияющий на величину фактической площади контакта СТМ с РПК (см. рис. 6.2 а).

Если зерна упруго вдавливаются в связку на величину $\Delta h = cH_з$, где c – коэффициент упругого вдавливания зерна в связку, то число зерен в контакте определится следующим выражением:

$$n = \frac{S(\alpha + c)K}{a^2}. \quad (6.14)$$

Таким образом, получены теоретические зависимости относительной опорной длины t_p и площади t_{ps} от рабочей высоты зерен $h_р$ и критической величины заделки их в связке $h_{кр}$, и числа зерен на РПК n от уровня вскрытия круга и его износа.

Относительная опорная площадь РПК t_{ps} и динамика ее изменения в процессе износа круга в дальнейшем принята в качестве контурной площади контакта зерен с СТМ A'_c при определении фактической площади контакта.

Поскольку величина фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ» является определяющим параметром эффективности процесса шлифования, проведем ее расчет, используя классическую теорию контактирования шероховатых поверхностей при трении и износе, разработанную Демкиным Н.Б. и Крагельским И.В. [20, 39].

6.2. Фактическая площадь контакта в системе «РПК–СТМ» и ее изменение в процессе приспосабливаемости

Поскольку фактическая площадь контакта «РПК–СТМ» зависит от размеров обрабатываемой заготовки, то в качестве определяющего параметра, характеризующего топографическую приспосабливаемость, приняли относительную величину фактической площади контакта:

$$\eta_з = \frac{A_r}{A_a} = \eta_1 \cdot \eta_2; \quad \eta_1 = \frac{A_r}{A_c}; \quad \eta_2 = \frac{A_c}{A_a}, \qquad (6.15)$$

где η_1 – относительная величина фактической площади контакта на микроуровне;

η_2 – относительная величина фактической площади контакта на макроуровне;

A_a – номинальная площадь контакта;

A_c – контурная площадь контакта;

A_r – фактическая площадь контакта.

Поскольку в производительном процессе шлифования контакт связки с обрабатываемым материалом не желателен, т. к. он уменьшает давление в контакте «зерно–СТМ», для этого типа взаимодействия рассмотрим систему «связка–зерно–СТМ».

Расчетная схема модели взаимодействия системы «РПК–СТМ» представлена на рис. 6.1 а. На схеме СТМ представлен в виде отдельных кристаллитов, поскольку в дальнейшем характер взаимодействия зерен с обрабатываемым материалом будет учитывать анизотропию свойств кристаллитов и алмазных зерен. Различная интенсивность износа «твердых» и «мягких» граней кристаллитов и зерен будет сказываться на величине фактической площади контакта в системе «зерно–СТМ».

Определение фактической площади контакта РПК с СТМ и ее изменение в процессе шлифования представляет интересе не с точки зрения оценки глубины внедрения зерен в обрабатываемый материал (оно практически отсутствует), или определения толщины среза (как это принято для традиционных процессов шлифования), а для определения величины контактных давлений, ответственных за характер и интенсивность взаимного микроразрушения контактирующих тел.

Поскольку в контакте находятся принципиально различные по топографии поверхности: РПК – дискретная и СТМ – квазисплошная, определение фактической площади контакта будем проводить в два этапа. На первом этапе определим фактическую площадь контакта на макроуровне (площадки износа на зернах и поверхность СТМ принимаются идеально гладкими), а на втором этапе, приняв ранее определенную площадь за контурную, определим фактическую площадь контакта на микроуровне с учетом шероховатости СТМ и субмикрорельефа алмазных зерен. Расчетные схемы представлены на рис. 6.4 а, б, в. За контурную площадь контакта на макроуровне («РПК–СТМ») примем опорную площадь рабочей поверхности круга A_c. Она может характеризоваться величиной относительной опорной площади РПК t_{ps}, получаемой лазерным сканированием.

С учетом схожести процесса алмазного шлифования СТМ с функционированием триботехнических систем, воспользовались модернизированными зависимостями для определения фактической площади контакта в этих системах [39]. Демкин Н.Б. показал, что отношение фактической площади контакта A_r к контурной A_c достаточно точно описывается зависимостью [12]:

$$\frac{A_r}{A_c} = ab\varepsilon^{\delta}, \tag{6.16}$$

где b и δ – параметры кривых опорных поверхностей контактирующих тел;

ε – относительное сближение ($\varepsilon = h / h_{\max}$).

Существенные различия в параметрах топографии РПК и СТМ делает зависимости определения параметров опорной кривой [12] для дискретной поверхности РПК не корректными. В связи с этим провели их модернизацию, заключающуюся в искусственном группировании алмазных зерен, т. е. заменив дискретную поверхность РПК квазисплошной, и приняв за контурную площадь контакта величину относительной опорной площади поверхности t_{ps}, значения и динамика изменения которой получена нами ранее. В качестве модуля упругости контактирующих тел использовали не свойства зерен и СТМ (на этом этапе упругими деформациями в зерне и СТМ пренебрегаем), а модуль упругости металлической связки. В результате получили зависимости для определения фактической площади контакта и динамику ее изменения в процессе приспосабливаемости. Причем, эта задача решается как на макроуровне – контакт РПК и СТМ, так и на микроуровне – контакт «СТМ–субмикрорельеф площадки износа на зернах» (рис. 6.4 а, б, в). Шероховатость площадки износа алмазного зерна измеряли методом лазерного сканирования.

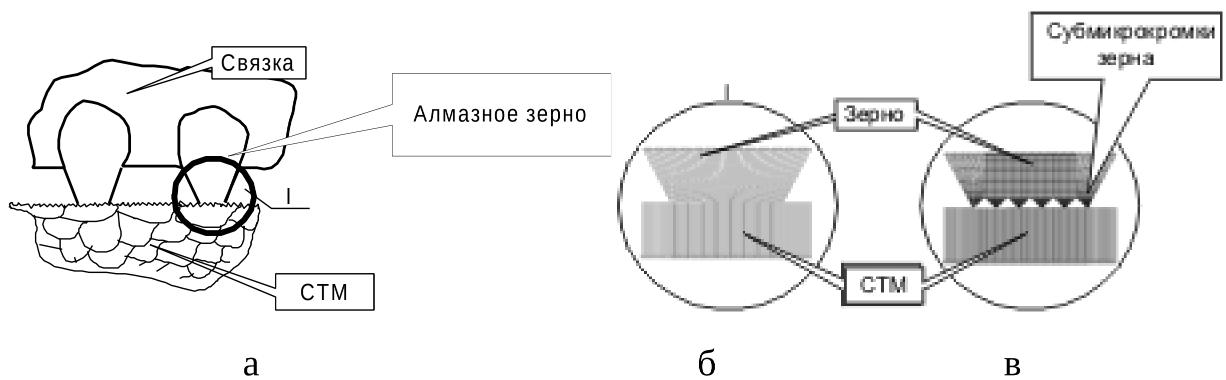


Рис. 6.4. Определение фактической площади контакта в системе «СТМ–РПК»:
а – расчетная схема взаимодействия РПК с поверхностью СТМ;
б, в – конечноэлементная модель системы «зерно–СТМ»

При рассмотрении контактирования РПК и СТМ на макроуровне сделали допущение, что материал зерна и СТМ абсолютно жесткий (что для алмазных структур близко к истине), а изменение фактической площади контакта происходит только за счет изменения параметров опорной поверхности РПК (износа зерен) и упругого вдавливания их в связку круга. Поскольку «шероховатость» РПК на несколько порядков больше шероховатости СТМ, последней на первом этапе пренебрегаем.

С учетом этого формула Демкина Н.Б. для фактической площади контакта будет иметь следующий вид:

$$A_r = A_c \left\{ \frac{2{,}35 b^{\frac{1}{2\delta}} r^{\frac{1}{2}} (1-\mu^2) N}{2^{\frac{1}{2\delta}} K_2 h_{\max}^{\frac{1}{2}} F A_c} \right\}^{\frac{2\delta}{2\delta+1}}, \qquad (6.17)$$

где K_2 – постоянная интегрирования, величина, которая зависит от численного значения δ; N – нормальная нагрузка, Н; μ – коэффициент Пуассона связки;

E – модуль упругости связки, ГПа; r – радиус кривизны вершин зерен, мкм; h_{max} – максимальная высота выступания зерен из связки; b и δ – параметры опорной кривой рельефа РПК.

Для определения величины A_c искусственно заменили существенно дискретную поверхность РПК на непрерывную, т. е. сгруппируем зерна вплотную друг к другу (см. рис. 6.2).

Параметры опорной кривой топографии РПК b и δ определены теоретически:

$$\delta = \frac{3KH_з(H_з - h_{кр} - Kh_р) + 0{,}75Kh_р^2}{H_з^2 - h_р H_з}; \qquad (6.18)$$

$$b = \left(\frac{0{,}25K\left(H_з - h_{кр}\right)}{H_з} - \frac{0{,}25Kh_р}{2H_з} \right) \left(\frac{H - h}{H_з - h_{кр} - 0{,}5h_р} \right)^{\delta}. \qquad (6.19)$$

Радиус округления вершин алмазных зерен равен:

$$r = \frac{\left(0{,}0125K\,(H_з - h_{кр})\right)^2}{8\left(H_з - h_{кр} - 0{,}95h_р\right)}, \qquad (6.20)$$

где обозначения соответствуют (6.3)–(6.11).

Для контроля достоверности разработанных методов расчета использовали систему 3D моделирования рабочей поверхности круга, разработанную в раздеах 1–3 и экспериментальную методику лазерного сканирования рабочих поверхностей круга и СТМ.

Расчетные зависимости величины фактической площади контакта A_r от параметров взаимодействия приведена в табл. 6.5.

Таким образом, разработанная методика и полученные зависимости, основанные на искусственной замене дискретной поверхности РПК – непрерывной и учитывающая упругое заглубление алмазных зерен в связку и ее изменение в процессе износа круга позволяют определять фактическую площадь контакта РПК с СТМ. Двухэтапный метод 3D экспериментально-теоретического определения фактической площади контакта РПК с СТМ в условиях отсутствия внедрения зерен в обрабатываемый материал и контакта его со связкой учитывает субмикрорельеф алмазных зерен и СТМ. На первом этапе рассчитывается фактическая площадь контакта «РПК–СТМ» на макроуровне через относительную опорную площадь профиля, а затем, приняв ее за контурную, применяя модернизированную методику расчета параметров дискретной относительной опорной поверхности РПК (b и γ), проводится расчет фактической площади контакта на микроуровне «СТМ–микрорельеф зерен» по известным зависимостям Демкина Н. Б. и Крагельского И. В. При этом в качестве характеристики жесткости системы используется модуль упругости металлической связки. Результаты расчета приведены в табл. 6.5.

Таблица 6.5 – Результаты расчета фактической площади контакта

E	70	90	110	130	150	200
A_r	4,08	3,23	2,77	2,4	2,13	1,44
r	10	20	30	40	50	100
A_r	0,77	1,29	1,75	2,17	2,57	4,32
N	10	20	30	40	50	100
A_r	1,98	2,51	3,11	3,98	4,8	5,64
$h_р$	5	10	20	30	40	50
A_r	7,27	4,32	2,57	1,9	1,53	1,1

Примечание: E – модуль упругости связки, ГПа;
r – радиус кривизны вершин зерен, мкм;
N – нормальная нагрузка, Н;
$h_р$ – рабочая высота зерен.

Сравнение результатов расчета с результатами лазерного сканирования поверхности круга и СТМ показал достоверность принятой расчетной схемы для определения фактической площади контакта РПК с обрабатываемым СТМ. Установлено, что в процессе приспосабливаемости с изменением параметров режущего рельефа круга фактическая площадь контакта A_r может изменяться на несколько порядков, соответственно будет меняться и удельное давление в контакте алмазных зерен с СТМ, и, следовательно, характер и интенсивность их взаимного разрушения.

Если сравнить величину фактической площади контакта A_c, полученную расчетным путем, с величиной относительной опорной площади профиля t_{ps}, полученной методом лазерного сканирования, можно отметить, что различие в этих величинах определяется величиной упругого вдавливания алмазных зерен в связку. Достаточно высокая сходимость результатов расчетов по этим различным методикам доказывает, что характер износа алмазных зерен приводит к образованию площадок износа, и зерна из связки после начала шлифования (5–10 с) практически не выпадают.

Полученные зависимости для определения фактической площади контакта РПК с СТМ могут быть использованы при моделировании процессов разрушения зерен и обрабатываемого материала при шлифовании и в теоретическом модуле экспертной системы процесса шлифования СТМ. Управляя рабочей высотой зерен $h_{\text{р}}$, можно управлять величиной фактической площади контакта, а, следовательно, и характером и интенсивностью взаимного хрупкого микроразрушения алмазных зерен и припуска под обработку СТМ.

Результаты расчетов показали, что фактическая величина относительной площади контакта на макроуровне (в случае идеально гладкой поверхности СТМ и площадок износа зерен) не превышает 12,5 %, а после расчетов по зависимостям Демкина Н.Б. и Крагельского И.В. эта величина на микроуровне не превышает 0,125 %. Исходя из этого установлено, что при шлифовании по упругой схеме при номинальном нормальном давлении $P_{\text{н}}$ = 2 МПа величина фактического давления в контакте «зерно–СТМ» будет не менее $P_{\text{факт}}$ = 1600 МПа. С учетом динамичности процесса величина контактных напряжений будет значительно выше. Если учесть, что трещины в алмазе образуются при растягивающих напряжениях в 5000 МПа [33], то, очевидно, что при таких условиях поликристалл может разрушиться при одноактном взаимодействии.

Таким образом, предложенный подход позволяет оценить не только величину фактической площади контакта РПК с СТМ (а, следовательно, и удельные контактные давления), но и проследить динамику ее изменения по мере износа круга.

Проведенный анализ позволяет оценить среднюю удельную нагрузку на единичное зерно $P_з$.

Контактное давление на единичное зерно $P_з$ будет равно:

$$P_з = \frac{N}{S_K} = \frac{4N}{KaS}, \tag{6.21}$$

$$P_з = \frac{4N}{K(a+c)S}. \tag{6.22}$$

Таким образом, установлена величина $P_з$, которая является важнейшим параметром эффективности процесса алмазного шлифования СТМ и определяет границу трансформации процесса шлифования из производительного в прецизионное: $P_з \geq P_{хр}$ – характеризует производительное, а $P_з < P_{хр}$ – прецизионное (истирание), где $P_{хр}$ – нагрузка на зерно, обеспечивающая его хрупкое микроразрушение.

На основании анализа полученных зависимостей сформулировано и доказано положение о том, что уменьшением рабочей высоты зерен практически до уровня связки – исключая ее контакт с СТМ (для производительного шлифования) с одновременным уменьшением концентрации алмазов в круге, можно не только сохранять величину фактической площади контакта, т. е. выходные показатели процесса шлифования СТМ, но и существенно снизить себестоимость обработки, уменьшив удельный расход и сохранив величину удельного износа, т. е. повысить коэффициент использования потенциальных режущих свойств алмазных зерен.

6.3. Экспериментальное исследование изменения параметров топографии поверхности круга и СТМ путем лазерного сканирования

Экспериментальное исследование параметров топографии РПК и обработанной поверхности СТМ проводились методом лазерного сканирования.

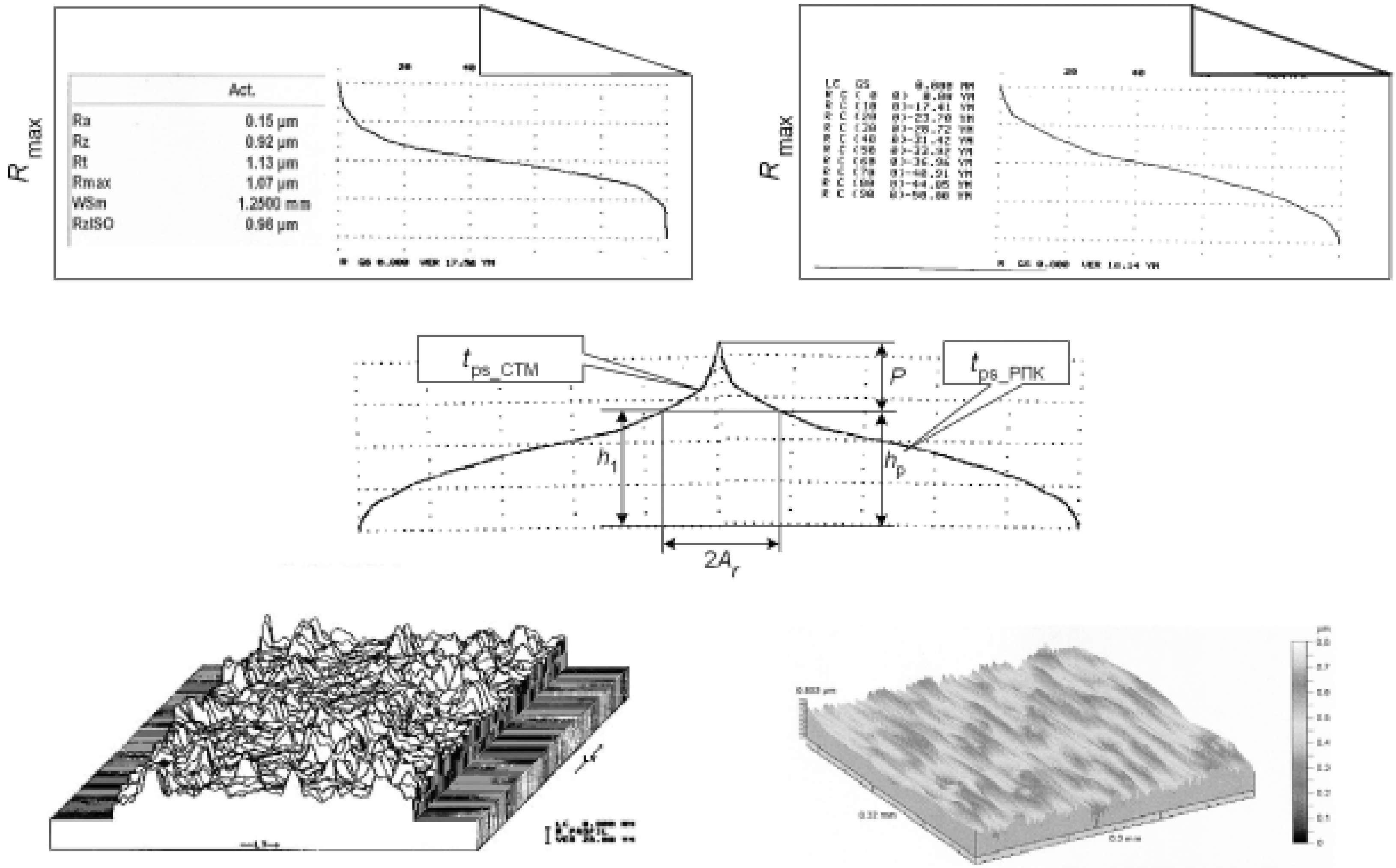
Одним из важнейших достоинств данного метода – возможность в 3-х мерном измерении и компьютерном режиме анализировать динамику изменения 86 параметров, в том числе такого важного для нашего процесса, как относительная опорная площадь поверхности t_{ps}. При этом можно определять величину t_{ps} как на макроуровне (РПК поверхности круга), так и на микроуровне – микрорельеф отдельных алмазных зерен. Величина субмикрорельефа отдельных алмазных зерен является важным параметром при определении фактической площади контакта в системе «СТМ–зерно», который трудно получить другими способами. А поскольку именно субмикрорельеф алмазных зерен определяет эффективность микроразрушения обрабатываемого СТМ, исследование этого параметра представляется чрезвычайно важным. Результаты исследования изменения 3D параметров рабочей поверхности круга в процессе приспосабливаемости представлены на рис. 4.1–4.3.

Если проанализировать динамику изменения параметра t_{ps} на уровне P = 5 %, что адекватно фактической площади контакта в системе «СТМ–зерно», то у вновь заправленного электрохимическим методом круга (см. рис. 4.4) t_{ps} медленно возрастает, что говорит о высокой развитости субмикрорельефа алмазных зерен. Анализировали изменение параметра t_{ps} по глубине профиля одного и того же круга, но работающего в различных условиях. Так, на рис. 4.5 видно, что t_{ps} до глубины профиля 25 мкм возрастает незначительно от 0 до 5 % и слабый рост t_{ps} на максимальной глубине профиля показывает, что износ зерен происходил преимущественно за счет микросколов вершин алмазных зерен, связка прочно удерживает зерна, т. к. глубокие лунки от выпавших зерен редки. Тот же круг после 1 минуты работы имеет множество площадок износа и t_{ps} резко возрастает и уже на глубине 11 мкм достигает 20 %, а на максимальной глубине профиля t_{ps} растет менее интенсивно (см. рис. 4.5). На представленной зависимости величины t_{ps} от высоты зерен можно отчетливо выделить 4 характерных участка. Высота зерен от линии выступов размером около 5 мкм h_1 характеризуется массовым образованием на зернах площадок износа, участок h_2 – равномерная разновысотность зерен, h_3 – сказываются микронеровности связки и участок h_4 – незначительное количество лунок от выпавших зерен.

А на рис. 4.5 t_{ps} монотонно возрастает до глубины профиля 29 мкм и достигает 20 %, затем в топографию включаются микронеровности связки, t_{ps} растет более интенсивно до глубины 45 мкм, вместе с тем связка обладает слабым алмазоудержанием и t_{ps} монотонно возрастает до полной глубины топографии, что свидетельствует о значительном количестве и глубине лунок от выпавших зерен.

Результаты синхронного исследования изменения 3D параметров обработанной поверхности СТМ методом лазерного сканирования представлены на рис. 6.5. Анализ результатов показывает, что за 60 секунд шлифования величина t_{ps} поверхности СТМ может изменяться в 4–5 раз. Можно предположить, что параметр t_{ps} является наиболее эффективным при оценке качества обработанной поверхности СТМ по сравнению с традиционно используемыми параметрами R_z и R_a.

Синхронное изучение изменения относительной опорной площади РПК и СТМ в процессе шлифования позволяет по этим параметрами проследить изменение величины фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ» (см. рис. 6.5). По полученным методом лазерного сканирования зависимостям изменения величины относительной опорной площади поверхностей РПК (см. рис. 6.5 г, б) и СТМ (см. рис. 6.5 а, д) можно проследить изменение величины фактической площади их контакта в процессе приспосабливаемости. Для этого использовали методику, предложенную Я. Качмареком [46] (см. рис. 6.5 в).



а – относительная опорная площадь топографии СТМ; б – относительная опорная площадь топографии РПК;
в – суммарные графики относительной опорной площади РПК и СТМ; г – топография РПК; д – топография СТМ

Результаты экспериментальных исследований изменения величины фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ» использованы в качестве поправочных коэффициентов в теоретическом модуле экспертной системы процесса шлифования СТМ.

6.4. Вопросы для самостоятельной подготовки

1. Понятие топографической приспосабливаемости.
2. Роль фактической площади контакта в системе «РПК–обрабатываемый материал».
3. Изменение параметров топографии РПК и обработанной поверхности в процессе приспосабливаемости.
4. Относительная опорная площадь поверхности круга как критерий оценки уровня его приспосабливаемости.
5. Дать анализ влияния фактической площади контакта в системе «РПК–обрабатываемый материал» на выходные показатели процесса шлифования.
6. Объяснить суть методологии определения фактической площади контакта через величину t_{ps} круга и обработанной поверхности.
7. Поясните особенности использования зависимостей Демкина-Крагельского для определения величины фактической площади контакта в системе «РПК–ОМ».
8. Суть двухэтапного метода определения фактической площади контакта в системе «РПК–ОМ».
9. Привести пример сравнения результатов расчетного и экспериментального определения фактической площади контакта в системе «РПК–ОМ».
10. Провести расчет величины фактической площади контакта в системе «Связка–ОМ» для кругов различной зернистости и концентрации.

ГЛАВА 7. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА И ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ

Excudent alii, spirantia mollius aera. –
Другие искуснее выкуют изваянья живые из бронзы.

Как много дел считались невозможными, пока они не были осуществлены.
Плиний Старший

В настоящем разделе представлен комплекс примеров практического использования методологии 3D моделирования алмазно-абразивного инструмента и процесса шлифования. Приведены результаты модельных и теоретических исследований статистических механизмов формирования рабочей поверхности алмазно-абразивных инструментов. Изложена 3D методология определения оптимальных характеристик алмазных кругов на этапах изготовления и эксплуатации. Произведена оценка влияния модуля упругости связки на эффективность взаимного микроразрушения элементов системы «СТМ–зерно–связка». Выполнен анализ основных закономерностей износа алмазных зерен и удельного расхода кругов в процессе шлифования и определены путы их сокращения. Рассмотрен вопрос практического использования методологии 3D моделирования для обеспечение надежности лезвийного инструмента из сверхтвердых материалов на стадии его изготовления.

7.1. Статистические механизмы формирования рабочей поверхности алмазно-абразивных инструментов

В данном подразделе рассмотрены основные статистические механизмы формирования рабочей поверхности алмазно-абразивных инструментов. В качестве базовых использованы научные положения [1, 4, 21, 26, 38] и др. Параллельно с формулированием и анализом теоретических положений рассматриваются результаты статистического объектно-ориентированного 3D моделирования алмазно-абразивных инструментов.

7.1.1. Алмазосодержащий слой и его характеристики

Алмазосодержащий слой. Рассмотрим исходный алмазосодержащий слой, который для простоты дальнейших рассуждений представим как параллелепипед со сторонами $X_{а\ (max)}$, $Y_{а\ (max)}$, $Z_{а\ (max)}$. Для модельного исследования выбран алмазосодержащий слой, имеющий следующие размеры: длина L = 170; ширина B = 10; толщина S = 1 мм (рис. 7.1).

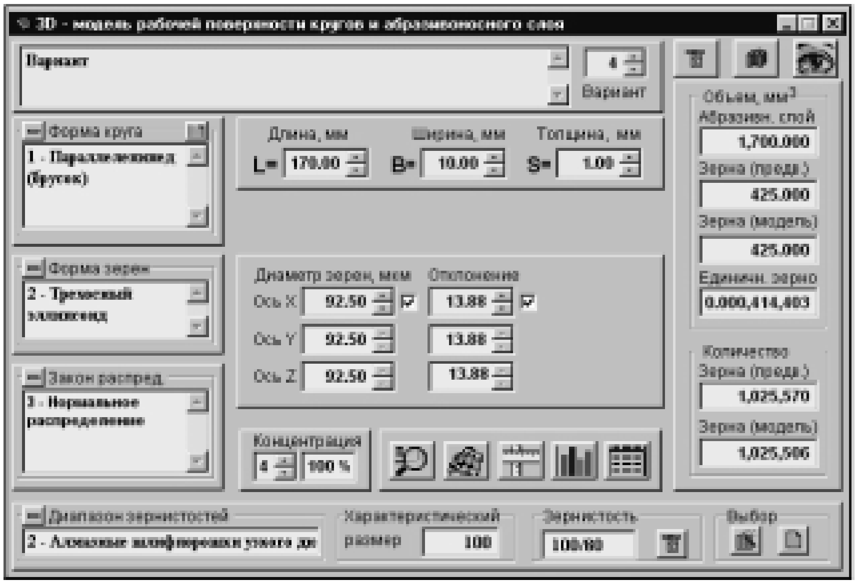


Рисунок 7.1 – Главная форма системы статистического объектно-ориентированного 3D моделирования абразивно-алмазных инструментов

Навеска зерен. В объеме алмазосодержащего слоя располагается навеска зерен в количестве $n_а$. Каждое i-е зерно (i = 1, ..., $n_а$) в общем виде представляет собой трехосный эллипсоид с размерами по соответствующим координатным осям, равными $d_{X\ (i)}$, $d_{Y\ (i)}$, $d_{Z\ (i)}$. Законы распределения размеров зерен являются одномерными, непрерывными и независимыми: D_X, D_Y, D_Z.

Количество зерен в навеске составляло $n_а$ = 1025506 шт. Формирование навески зерен в форме трехосного эллипсоида с распределением размеров по нормальному закону осуществлялось по методике 2.3. Параметры законов распределения по координатным осям были одинаковыми и соответствовали: математическое ожидание μ = 92,50 мкм; среднеквадратическое отклонение σ = 13,88 мкм (см. рис. 7.1). Данные параметры соответствуют зернистости 100/80. Модифицированные параметры имеют следующие значения: характеристический размер (масштабный коэффициент – для шлифпорошков, размер ячейки верхнего сита в свету) a_0 = 100 мкм; коэффициент смещения математического ожидания относительно характеристического размера (коэффициент относительного положения) $k_m = \mu / a_0 = 0{,}925$; коэффициент вариации (коэффициент формы) $k_v = \sigma / \mu = 0{,}15$. Использование модифицированных параметров позволяет распространить выводы на другие зернистости абразивных порошков. Имитационный контроль зернового состава полученной навески подтверждает ее соответствие требованиям ГОСТ (рис. 7.2). Контроль закона распределения размеров зерен в модельной навеске дал следующие результаты: коэффициент относительного положения $k_m = X \rightarrow 0{,}9248$, $Y \rightarrow 0{,}9251$, $Z \rightarrow 0{,}9252$; коэффициент вариации $k_v = X \rightarrow 0{,}1489$, $Y \rightarrow 0{,}1489$, $Z \rightarrow 0{,}1487$; среднеквадратическое относительное отклонение теоретического закона от модельного $\delta_{\text{отн}}$, % = $X \rightarrow 1{,}52$, $Y \rightarrow 1{,}65$, $Z \rightarrow 1{,}64$. Пример визуализации результатов контроля представлен на рис. 7.3. Результаты контроля показывают достаточно высокую точность формирования навески в соответствии с заданными исходными параметрами.

Центры зерен. Центры зерен равновероятно (по закону равной вероятности) распределены в пространстве алмазосодержащего слоя. Каждое отдельное зерно характеризуется значениями координат центра трехосного эллипсоида $x_{\text{ц}\,(i)}$, $y_{\text{ц}\,(i)}$, $z_{\text{ц}\,(i)}$. Законы распределения значений координат центров зерен являются одномерными, непрерывными и независимыми: $X_{\text{ц}}$, $Y_{\text{ц}}$, $Z_{\text{ц}}$.

Формирование координат отдельных зерен производится по закону равной вероятности с учетом границ алмазосодержащего слоя и его размеров по осям *X*, *Y*, *Z* в соответствии с обобщенной зависимостью:

$$\varphi_{\text{ввρп}}(y_{\text{ввρп}}) = \begin{cases} k\,\dfrac{1}{\delta}\left[\Phi\left(\dfrac{\Delta_{\max} - y_{\text{ввρп}} + \delta}{\sigma}\right) - \Phi\left(\dfrac{\Delta_{\max} - y_{\text{ввρп}} - \delta}{\sigma}\right)\right], \\ \text{если} \quad 0 \le y_{\text{ввρп}} \le \Delta_{\max}; \quad 0, \quad \text{иначе,} \end{cases} \qquad (7.1)$$

где $d_{X,\,Y,\,Z\,(i)} \Rightarrow d_{X\,(i)}, d_{Y\,(i)}, d_{Z\,(i)}$ – размеры *i*-го зерна по координатным осям;

$X, Y, Z_{\text{a (max)}} \Rightarrow X_{\text{a (max)}}, Y_{\text{a (max)}}, Z_{\text{a (max)}}$ – границы алмазосодержащего слоя;

Rand (0, 1) – функция, возвращающая равномерно распределенное число, находящееся в интервале 0 ... 1.

Законы распределения координат центров зерен, строго говоря, не будут являться равномерно распределенными по всему объему алмазосодержащего слоя. Изменение плотности распределения центров зерен будет наблюдаться у границ алмазосодержащего слоя, что соответствует реальной картине при изготовлении алмазно-абразивного инструмента. Такое изменение плотности будет характерным для зерен, находящихся в непосредственной близости к границам алмазосодержащего слоя, когда расстояние от центров зерен до границы соизмеримо с размерами зерен. Так как на практике размеры алмазосодержащего слоя многократно превосходят размеры зерен, то такой погрешностью можно пренебречь. Для рассматриваемого случая с достаточной для практики точностью можно принять допущение о равномерном распределении центров зерен в следующих интервалах по координатным осям *X*, *Y*, *Z*:

$$X_{\text{ц}}, Y_{\text{ц}}, Z_{\text{ц}} = \begin{cases} f_{\text{Rand}\,X,Y,Z}\left(\dfrac{1}{X,Y,Z_{\text{a(max)}} - E_{D_{X,Y,Z}}}\right); \\ \text{если} \quad \dfrac{E_{D_{X,Y,Z}}}{2} \le x, y, z \le X, Y, Z_{\text{a(max)}} - \dfrac{E_{D_{X,Y,Z}}}{2}; \quad \text{иначе } 0, \end{cases} \tag{7.2}$$

где f_{Rand} – плотность равномерного распределения по соответствующим осям, со значением $1 \big/ X, Y, Z_{\text{a(max)}} - E_{D_{X,Y,Z}}$;

$X, Y, Z_{\text{a(max)}} \Rightarrow X_{\text{a (max)}}, Y_{\text{a (max)}}, Z_{\text{a (max)}}$ – границы алмазосодержащего слоя;

$E_{D_{X,Y,Z}} \Rightarrow E_{D_X}, E_{D_Y}, E_{D_Z}$ – математические ожидания законов распределения диаметров трехосного эллипсоида (размеров зерен).

Рисунок 7.2 – Результаты имитационного контроля зернового состава навески

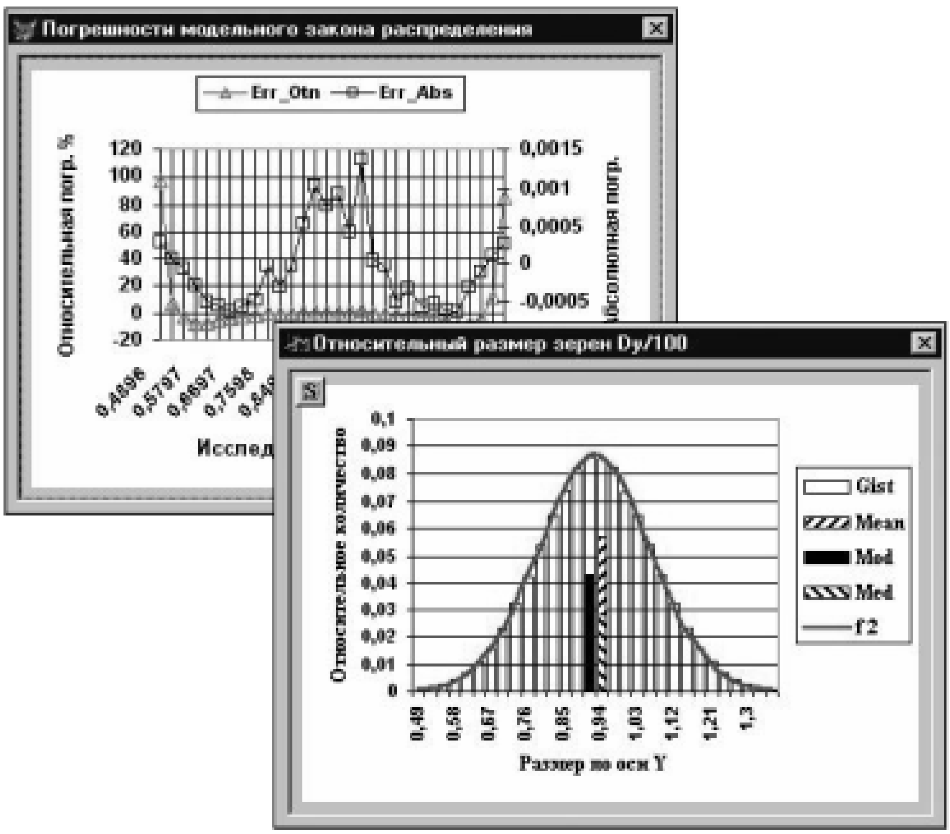


Рисунок 7.3 – Формы визуализации результатов контроля закона распределения размеров зерен в модельной навеске

На рис. 7.4 представлены гистограммы результатов контроля закона распределения координат центров зерен в алмазосодержащем слое по осям *Z* и *Y*. Для координат центров по оси *X* гистограмма будет иметь промежуточный вид. Наличие на гистограмме (ось *Y*) крайних интервалов с пониженным значением плотности вероятности подтверждает гипотезу об изменении плотности распределения центров зерен у границ алмазосодержащего слоя. Отношение размеров алмазосодержащего слоя к характеристическому размеру зерен, для рассматриваемого случая, имеет следующие значения: $X \to B / a_0 = 100$; $Y \to S / a_0 = 10$; $Z \to L / a_0 = 1700$. Среднеквадратическое относительное отклонение теоретического закона от модельного $\delta_{отн}$, % = $X \to 1{,}44$, $Y \to 17{,}31$, $Z \to 0{,}40$. То есть наблюдается обратная зависимость между размерами алмазосодержащего слоя и погрешностью модельного распределения.

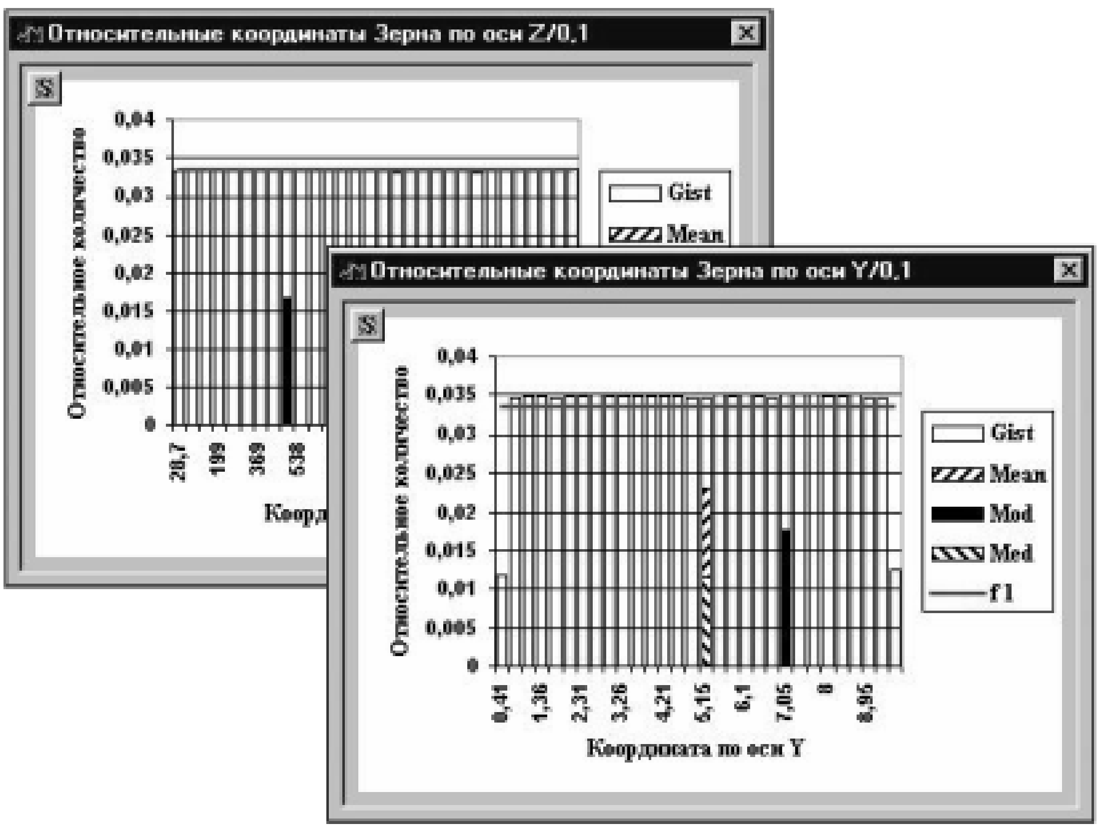


Рисунок 7.4 – Формы визуализации результатов контроля закона распределения координат центров зерен в алмазосодержащем слое

7.1.2. Поверхность связки и статистические механизмы ее трансформации

Поверхность связки. В алмазосодержащем слое расположим (определим) поверхность связки, пересекающую его. Поверхность связки в общем виде определим аддитивным соотношением:

$$y_{\text{с}} = y_{\text{с}0} + f_X\ (x)\ + f_Z\ (z), \tag{7.3}$$

где $y_{\text{с}0}$ – исходный уровень поверхности связки по оси Y (по глубине алмазосодержащего слоя), определяемый как точка на поверхности связки, имеющая минимальное значение координаты по оси или минимальное расстояние поверхности связки от номинальной (исходной) поверхности алмазосодержащего пространства; $f_X\,(x)$ – функция неравномерности поверхности связки (от точки $y_{\text{с}0}$) по оси X (поперечный профиль); $f_Z\,(z)$ – функция неравномерности поверхности связки по оси Z (продольный профиль).

Необходимо отметить, что такая поверхность (или экземпляр поверхности) после ее задания носит детерминированный характер.

Поперечный профиль поверхности связки. Поперечный профиль поверхности связки представим в виде поднутрения или заборного конуса:

$$f_X\left(x;\varphi,l\right)=\begin{cases}0 & \varphi = \\ x\,\mathrm{tg}\,\varphi & \varphi > \quad x\le l \\ l\,\mathrm{tg}\,\varphi & \varphi > \quad x\ge l \\ \left(x-l\right)\mathrm{tg}\,\varphi & \varphi < \quad x\le l \\ 0 & \varphi < \quad x\ge l\end{cases} \tag{7.4}$$

где φ – угол поднутрения связки круга (φ > 0) или заборного конуса (φ < 0), φ = 0 соответствует случаю отсутствия неравномерности поперечного профиля; x – координата по оси X (по ширине рабочей поверхности); l – длина поднутрения (φ > 0) или заборного конуса (φ < 0).

Продольный профиль поверхности связки. Продольный профиль поверхности связки представим функцией волнистости:

$$f_Z(z; H, L, F) = \frac{H}{2}\left\{1 + \sin\left[2\pi\left(\frac{z}{L} - \frac{F}{100}\right)\right]\right\}, \tag{7.5}$$

где H – высота волнистости связки; L – шаг волнистости; F – сдвиг фазы волнистости связки, %.

Проекции центров зерен на поверхность связки. Спроектируем центры зерен на поверхность связки. Для координат x, z будет выполняться равенство:

$$x_{п(i)} = x_{ц(i)}; \quad z_{п(i)} = z_{ц(i)}, \tag{7.6}$$

где $x_{п\,(i)}$, $z_{п\,(i)}$ – координаты проекций центров зерен на поверхность связки по осям X, Z; $x_{ц\,(i)}$, $z_{ц\,(i)}$ – координаты центров зерен.

Координаты проекций центров зерен по оси Y будут определяться уравнением (7.3) с учетом равенств (7.6):

$$y_{сп(i)} = y_{с0} + f_X\ (x_{ц(i)}) + f_Z\ (z_{ц(i)}), \tag{7.7}$$

где $y_{с0}$ – исходный уровень поверхности связки; $f_X(x)$, $f_Z(z)$ – функции неравномерности поперечного и продольного профилей поверхности связки по осям X, Z; $x_{ц\,(i)}$, $z_{ц\,(i)}$ – координаты центров зерен.

Возникает вопрос о законах распределения проекций центров зерен на поверхность связки. С учетом равенства (7.6) можно сделать заключение о тождественности законов распределения центров зерен и их проекций по осям X, Z. Тогда имеем:

$$X_п = X_ц; \quad Z_ц = Z_ц, \tag{7.8}$$

где $X_п$, $Z_п$ – законы распределения координат проекций центров зерен на поверхность связки по осям X, Z; $X_ц$, $Z_ц$ – законы распределения координат центров зерен

Закон распределения проекций центров зерен по оси Y можно получить подстановкой законов распределения проекций центров зерен (7.8) в уравнение (7.7):

$$Y_{сп} = y_{с0} + f_X\ (X_ц) + f_Z\ (Z_ц), \tag{7.9}$$

где $Y_{сп}$ – закон распределения проекций центров зерен по оси Y; y_{c0} – исходный уровень поверхности связки; $f_X\,(X_ц)$ – функция неравномерности поперечного профиля поверхности связки по оси X с аргументом, представляющим собой закон распределения центров зерен по оси X; $f_Z\,(Z_ц)$ – функция неравномерности продольного профиля поверхности связки по оси Z с аргументом, представляющим собой закон распределения центров зерен по оси Z; $X_ц$, $Z_ц$ – законы распределения координат проекций центров зерен на поверхность связки по осям X, Z.

Анализ выражения (7.9) позволяет сделать выводы о статистическом механизме формирования закона распределения координат проекций центров зерен на поверхность связки по оси Y (по глубине алмазосодержащего слоя):

1. При формировании результирующего закона распределения координат проекций центров зерен на поверхность связки имеет место трансформация исходных законов распределения центров зерен в соответствии с выбранными (заданными) функциями, определяющими поверхность связки.

2. Закон распределения координат проекций центров зерен на поверхность связки $Y_{сп}$ зависит от следующих факторов: y_{c0} – исходного уровня поверхности связки представляющего собой постоянную величину (y_{c0} = const); $X_ц$, $Z_ц$ – законов распределения координат центров зерен по осям X, Z имеющих исходное равномерное распределение; $f_X\,(X_ц)$, $f_Z\,(Z_ц)$– функциональных преобразований исходных законов распределения координат центров зерен в соответствии с законами определяющими поперечный и продольный профили связки. Закон распределения координат проекций центров зерен на поверхность связки $Y_{сп}$ представляет собой композицию двух законов распределения и постоянного числа.

3. Функциональные преобразования $f_X\,(X_ц)$ и $f_Z\,(Z_ц)$ можно определить как неравномерность поперечного Y_{cX} и продольного Y_{cZ}, профилей поверхности связки. Тогда зависимость (7.9) можно записать в следующем виде:

$$Y_{сп} = y_{c0} + Y_{cX} + Y_{cZ}\,. \qquad (7.10)$$

Определение закона распределения функции случайной величины аналитическим методом. Теоретический закон распределения функции $U(X)$ случайной величины X, закон распределения которой задан плотностью вероятности $\varphi_1(x)$, определяется по следующим основным формулам [38]:

1. Если функция $U(X)$ однозначна, непрерывна, монотонна и имеет отличную от нуля производную при всех значениях X аргумента:

$$\varphi(u) = \left[\frac{d\left[x(u)\right]}{du}\right] \varphi_1\left[x(u)\right], \tag{7.11}$$

где $x(u)$ – функция обратная $u(x)$.

2. Если функция $U(X)$ однозначна, непрерывна, имеет отличную от нуля производную при всех значениях x аргумента, но не монотонна:

$$\varphi(u) = \sum_f \left|\frac{d\left[x(u)\right]}{du}\right| \varphi_1\left[x_f(u)\right]. \tag{7.12}$$

Для этого случая немонотонная функция разбивается на участки монотонности (возрастания или убывания) и суммирование производится по всем тем f участкам монотонности функции $u(x)$, внутри которых имеются значения функции, равные u.

Определение закона распределения неравномерности поперечного профиля связки. Закон распределения неравномерности поперечного профиля связки для случая поднутрения или заборного конуса в общем виде определяется уравнением (7.4). Рассмотрим случай, когда длина поднутрения или заборного конуса l равна ширине рабочей поверхности круга или ширине исследуемого участка рабочей поверхности. Тогда уравнение (7.4) примет следующий вид:

$$f_X(x;\varphi,l) = \begin{cases} x\,\mathrm{tg}\,\varphi & \varphi > \quad x \le l \\ (x-l)\,\mathrm{tg}\,\varphi & \varphi < \quad x \le l \end{cases} \tag{7.13}$$

где φ – угол поднутрения связки круга ($\varphi > 0$) или заборного конуса ($\varphi < 0$);

x – координата по оси X (по ширине рабочей поверхности); l – длина поднутрения ($\varphi > 0$) или заборного конуса ($\varphi < 0$).

Для данного случая функция $f_X(x;\varphi,l)$ однозначна, непрерывна, монотонна и имеет отличную от нуля производную при всех значениях x аргумента. Поиск решения для плотности распределения неравномерности поверхности связки, вызванной наличием поднутрения или заборного конуса, по формуле (7.11) приводит к следующему выражению:

$$Y_{cX} = f_X\ (X_{ц}) = f_{\text{Rand}}(y_{cX};H_{поп}) = \begin{cases} \dfrac{1}{H_{поп}}; \\ \text{если } 0 \le y_{cX} \le H_{поп};\ \text{иначе } 0, \end{cases} \tag{7.14}$$

где y_{cX} – текущее значение рассматриваемого признака; $H_{поп} = |l\ \text{tg}\ (\varphi)|$ – максимальная глубина поперечного профиля.

На рис. 7.5 представлены формы визуализации поперечного профиля шлифовального круга, имеющего заборный конус: $\varphi = –0{,}3$ град.; $l = 10$ мм; $H_{поп} = |l\ \text{tg}(\varphi)| = 52$ мкм. Результаты статистического анализа плотности распределения неравномерности поверхности связки подтверждают ее соответствие уравнению (7.14).

Определение закона распределения неравномерности продольного профиля связки. Закон распределения неравномерности продольного профиля связки для случая волнистости в общем виде определяется уравнением (7.5). Решение следует искать, используя формулу (7.12). Используем решение такой задачи, приведенное в [38] для упрощенного случая, когда область возможных значений аргументов $\sin\left[2\pi\left(\dfrac{z}{L}-\dfrac{F}{100}\right)\right]$ кратна 2π, т. е. для нашего случая: $F = 0$ – сдвиг фазы волнистости связки; L – шаг волнистости укладывается целое число раз в длину рабочей поверхности или длину исследуемого участка. При этих условиях плотность распределения неравномерности поверхности связки, вызванной наличием волнистости продольного профиля связки, будет иметь следующий вид:

$$Y_{cZ}=f_Z\ (Z_ц)=f_{\text{ArcSin}}\left(y_{cZ};H_{пр}\right)=\begin{cases}\dfrac{1}{\pi\sqrt{H_{пр}^2-\left(y_{cZ}-\dfrac{H_{пр}}{2}\right)^2}};\\ \text{если }\ 0\le y_{cZ}\le H_{пр};\ \text{иначе }\ 0,\end{cases}\qquad(7.15)$$

где y_{cZ} – текущее значение рассматриваемого признака; $H_{пр}$ – высота волнистости продольного профиля связки.

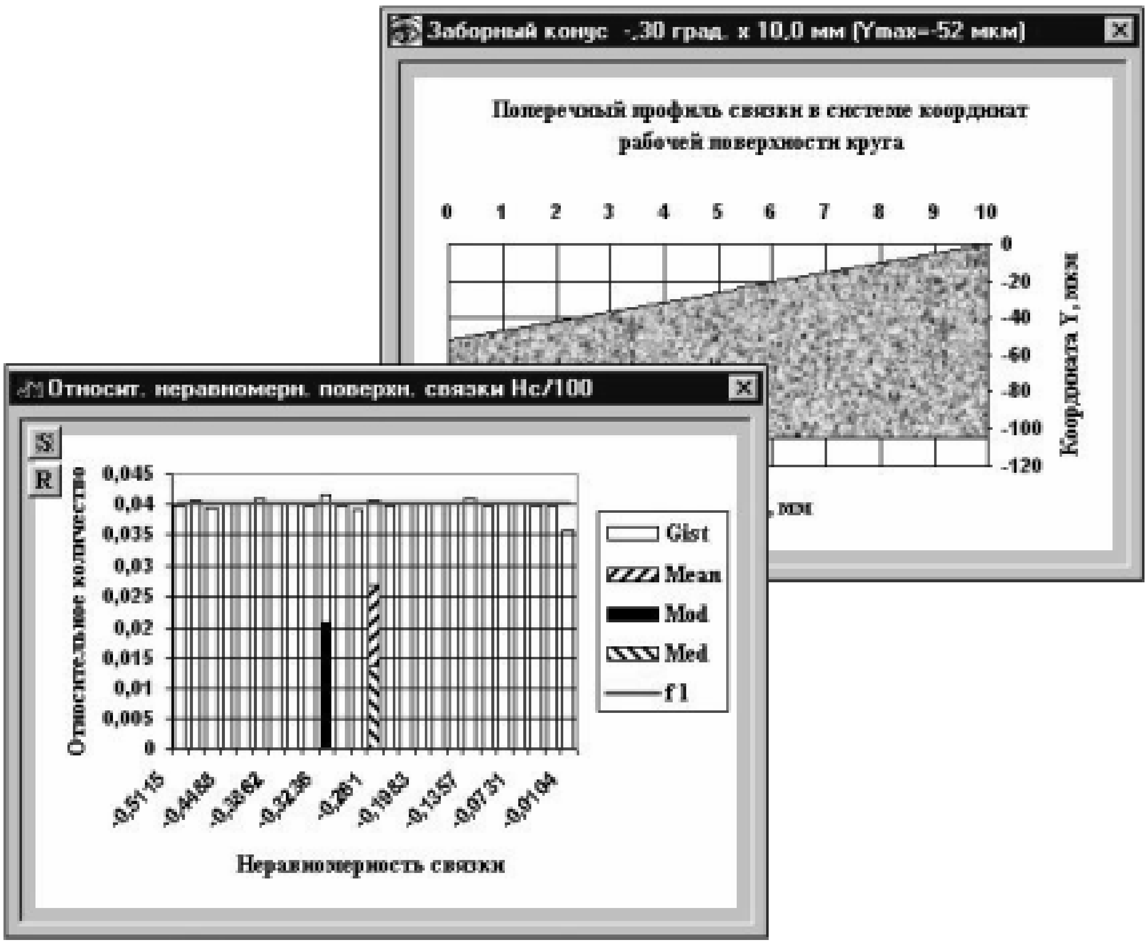


Рисунок 7.5 – Плотность распределения неравномерности поверхности связки при формировании поперечного профиля

В общем случае плотность распределения по закону арксинуса (функция arcsin входит в уравнение интегральной функции распределения) в центрированном виде и записывается следующим образом [38]:

$$f_{\text{ArcSin}}(a,l,u)=\begin{cases}\dfrac{1}{\pi\sqrt{l^2-(u-a)^2}};\\ \text{если } a-l\le u\le a+l; \text{ иначе } 0,\end{cases} \tag{7.16}$$

где параметр a – середина области возможных значений; l – интервал возможных значений. Математическое ожидание $E_{\text{ArcSin}} = a$, дисперсия $D_{\text{ArcSin}} = l^2/2$.

На рис. 7.6 представлены формы визуализации продольного профиля шлифовального круга, имеющего волнистость: H = 40 мкм; L = 34 мм; F = 0. Результаты статистического анализа плотности распределения неравномерности поверхности связки подтверждают ее соответствие уравнению (7.15).

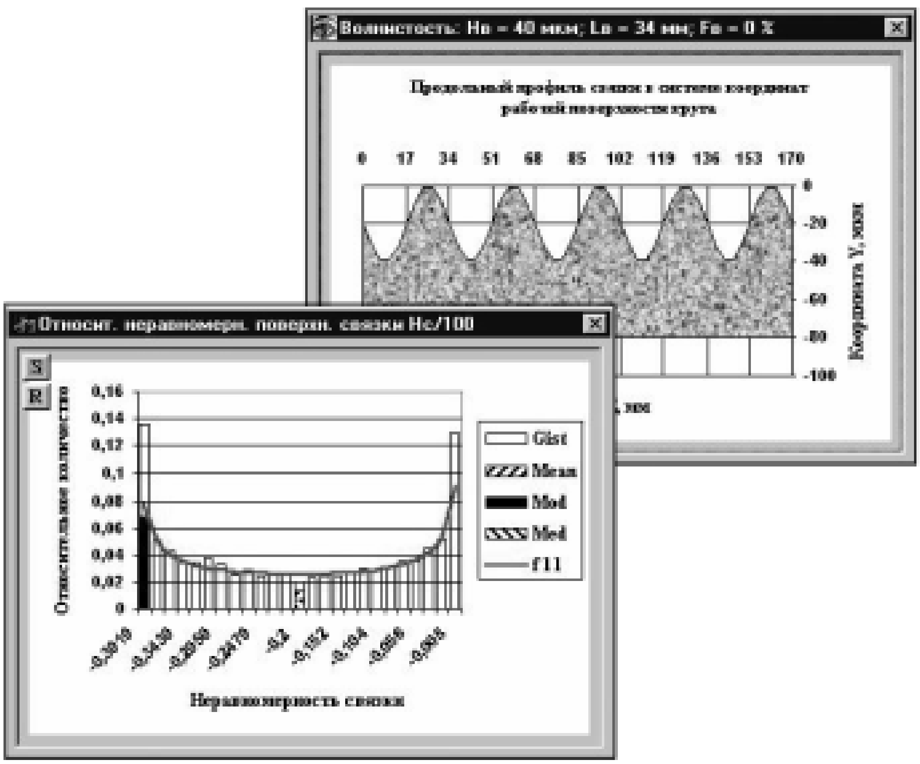


Рисунок 7.6 – Плотность распределения неравномерности поверхности связки при формировании продольного профиля

Определение плотности закона распределения неровностей связки при наличии поперечного и продольного профиля. Если величина U является суммой нескольких других взаимно независимых случайных величин

(X, Y, Z ...), то закон распределения суммы U называется композицией законов распределения слагаемых (X, Y, Z ...). Операция нахождения композиции законов распределения называется компонированием и обозначается символом * [38].

В случаях, когда суммируемые слагаемые X, Y, Z ... заданы плотностями вероятности $\varphi_1(x)$, $\varphi_2(y)$, $\varphi_3(z)$ ..., формулы компонирования в общем виде записываются следующим образом:

$$\varphi(u) = \varphi_1(x) * \varphi_2(y) * \varphi_3(z) \ldots \tag{7.17}$$

Плотность вероятности суммы U двух независимых непрерывных одномерных случайных величин X и Y, заданных их плотностями вероятности $\varphi_1(x)$ и $\varphi_2(y)$, определяется по формуле:

$$\varphi(u) = \varphi(x + y) = \varphi_1(x) * \varphi_2(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_1(x)\varphi_2(u - x)\, dx \,. \tag{7.18}$$

Исследование по оценке статистического механизма формирования плотности закона распределения неровностей связки при наличии поперечного и продольного профиля производилось при различных формах поверхности связки. На рис. 7.7 представлены результирующие гистограммы. Вид кривых плотности распределения неравномерности связки довольно разнообразен в зависимости от соотношений параметров продольного и поперечного профиля. Прослеживается достаточно четкая взаимосвязь: при относительном увеличении $H_{пр}$ (волнистость продольного профиля) кривая результирующего распределения стремится к форме определяемой уравнением (7.15); при относительном увеличении $H_{поп}$ (заборный конус или поднутрение поперечного профиля) – к равномерному распределению.

Проведенные теоретические и модельные исследования подтверждают функционально-композиционную природу механизма формирования статистических характеристик. Закон распределения проекций зерен на поверхность связки формируется на основе композиции функциональных преобразований распределений зерен, зависящих от поперечного и продольного профилей поверхности связки.

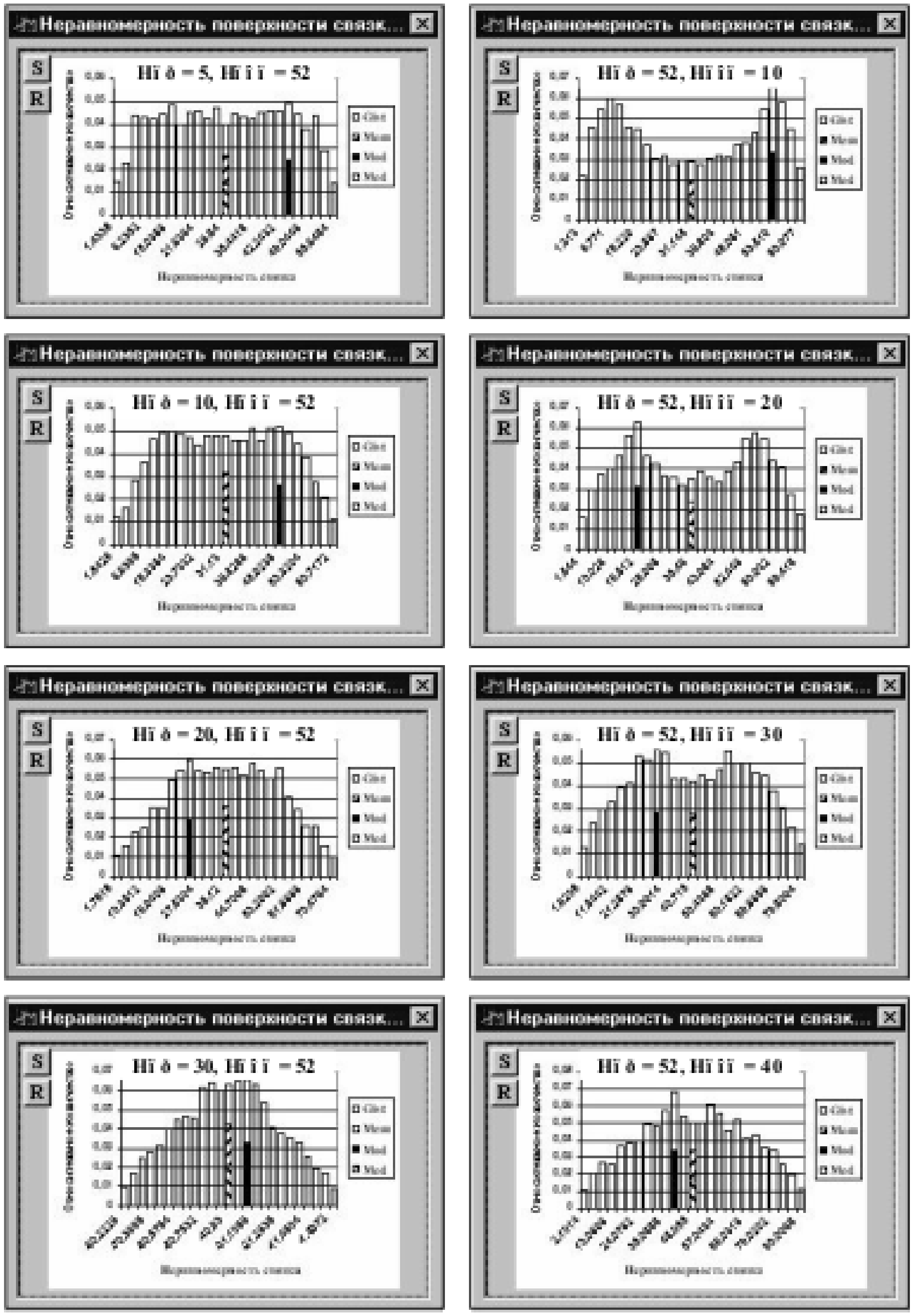


Рисунок 7.7 – Плотность распределения неравномерности поверхности связки при формировании продольного и поперечного профилей рабочей поверхности:

$H_{пр}$ – волнистость продольного профиля, мкм;

$H_{поп}$ – заборный конус или поднутрение поперечного профиля, мкм

7.1.3. Статистический механизм формирования 3D модели рабочей поверхности

Рассмотрев вопросы определения законов распределения проекций центров зерен на поверхность связки можно, перейти к вопросам формирования 3D рабочей поверхности. Сформулируем условия принадлежности отдельных зерен к экземпляру 3D модели:

1. Условие нахождения в интервале по оси X (по ширине рабочей поверхности). Данное условие будет возникать в общем случае, когда размер области 3D модели поверхности меньше размеров алмазосодержащего слоя: $X_{\text{рп(min)}} > 0$, $X_{\text{рп(max)}}$, $< X_{\text{а(max)}}$.

$$X_{\text{рп(min)}} - \frac{d_{X(i)}}{2} \le x_{\text{ц}(i)} \le X_{\text{рп(min)}} + \frac{d_{X(i)}}{2}, \qquad (7.19)$$

где $x_{\text{ц}(i)}$ – координата центра зерна по оси X; $X_{\text{рп(min)}}$, $X_{\text{рп(max)}}$ – границы области рабочей поверхности по оси X; $X_{\text{а(max)}}$ – границы алмазосодержащего слоя по оси X; $d_{X(i)}$ – размеры зерна по оси X.

2. Условие нахождения в интервале по оси Z (по длине рабочей поверхности) задается аналогично условию для оси X:

$$Z_{\text{рп(min)}} - \frac{d_{Z(i)}}{2} \le z_{\text{ц}(i)} \le Z_{\text{рп(min)}} + \frac{d_{Z(i)}}{2}, \qquad (7.20)$$

где $z_{\text{ц}(i)}$ – координата центра зерна по оси Z; $Z_{\text{рп(min)}}$, $Z_{\text{рп(max)}}$ – границы области рабочей поверхности по оси Z; $Z_{\text{А(max)}}$ – границы алмазосодержащего слоя по оси Z; $d_{Z(i)}$ – размеры зерна по оси Z.

Корректировка границ областей на половину размера зерна по осям X – уравнение (7.19) и Z – уравнение (7.20) производится для учета всех зерен, той или иной частью входящих в пространство модели рабочей поверхности.

3. Условие принадлежности зерна к данному экземпляру 3D модели рабочей поверхности. Для создания 3D модели рабочей поверхности необходимо отобрать из всей совокупности зерен алмазосодержащего слоя

(i = 1 ... $n_а$) те, которые принадлежат поверхности связки. К зернам, принадлежащим поверхности связки можно отнести зерна, которые тем или иным образом с ней пересекаются. Если рассматривать условие принадлежности без учета деления зерен на выступающие из связки – «зерно» и покинувшие связку – «лунка», то это условие будет иметь следующий вид:

$$\left| y_{п(i)} - y_{ц(i)} \right| < \frac{d_{Y(i)}}{2}, \tag{7.21}$$

где $y_{п(i)}$ – координата поверхности связки (в системе координат алмазосодержащего слоя); $y_{ц(i)}$ – координата центра зерна (в системе координат алмазосодержащего слоя); $d_{Y(i)}$ – размер зерна по оси Y.

Это условие можно сформулировать следующим образом – i-й экземпляр модели зерна принадлежит экземпляру 3D модели рабочей поверхности, если расстояние от центра зерна до поверхности связки меньше половины его диаметрального размера по оси Y.

Программная реализация рассмотренных условий (7.19) – (7.21) при 3D моделировании в среде управления базами данных не вызывает особых проблем. При ее осуществлении на основе базы данных алмазосодержащего слоя (i = 1 ... $n_а$) создается база данных 3D рабочей поверхности (j = 1 ... $n_{рп}$) в соответствии с условиями отбора записей, отражающих свойства зерен.

При формировании 3D модели целесообразно перейти от абсолютной системы координат алмазосодержащего слоя к системе координат, связанной с поверхностью связки. Такой переход предполагает следующие преобразования:

1. Изменение направления оси Y на обратное:

$$Y_{рп} = -Y_а. \tag{7.22}$$

Это связано с целесообразностью отсчета положительных значений «вверх» от поверхности связки, что обеспечивает большую наглядность результатов моделирования.

2. Определение координат поверхности связки в системе координат 3D модели:

$$y_{срп(j)} = -\left[f_X(x_{ц(j)}) + f_Z(z_{ц(j)}) \right], \tag{7.23}$$

где $f_X(x_{ц(j)})$ – функция неравномерности поверхности связки по оси X (поперечный профиль), определяемая уравнением (7.4) – $f_X(\varphi, l, x)$, $x = x_{ц(j)} = x_{ц(i)}$; $f_Z(z_{ц\,(j)})$ – функция неравномерности поверхности связки по оси Z (продольный профиль), определяемая уравнением (7.5) – $f_Z(H, L, F, z)$, $z = z_{ц\,(j)} = z_{ц\,(j)}$; $x_{ц\,(i)}$, $z_{ц\,(i)}$ – координаты центров зерен по осям X, Z.

3. Определение координат центров зерен относительно поверхности связки в системе координат 3D модели:

$$y_{црп(j)} = y_{ц(j)} - \left[y_{c0} + f_X(x_{ц(j)}) + f_Z(z_{ц(j)}) \right], \qquad (7.24)$$

где $y_{ц\,(j)} = y_{ц(i)}$ – координата центра зерна в системе координат абразивного слоя; y_{c0}– исходный уровень поверхности связки по оси Y (по глубине абразивного слоя); остальные обозначения соответствуют (7.23).

4. Разделение номинальных зерен, принадлежащих рабочей поверхности, на закрепленные в связке – «зерна» и покинувшие связку – «лунки». Такое разделение может быть проведено с использованием понятия коэффициента относительной критической заделки зерна в связке. Этот коэффициент учитывает заделку зерна в связке и определяется как минимально возможное значение отношения величины заделки зерна в связке к размеру зерна по оси Y, при котором зерно закреплено в связке алмазно-абразивного инструмента:

$$\varepsilon_{кр} = \frac{d_{Y(j)}}{h_{кр(j)}}, \qquad (7.25)$$

где $d_{Y\,(j)}$, $h_{кр\,(j)}$ – размер и критическая заделка j-го зерна по оси Y.

С учетом уравнения (7.21) идентификация «зерно–лунка» производится по следующему логическому выражению:

$$\begin{cases} \text{если} \quad 0{,}5 - \dfrac{y_{црп(j)}}{d_{Y(j)}} > \varepsilon_{кр} \quad << \text{зерно} >>; \\ \text{иначе} \qquad\qquad\qquad\qquad << \text{лунка} >>, \end{cases} \qquad (7.26)$$

где $y_{\text{црп}\,(j)}$ – координата центра j-го зерна относительно поверхности связки; $d_{Y\,(j)}$ – размер j-го зерна по оси Y; $\varepsilon_{\text{кр}}$ – коэффициент относительной критической заделки зерна в связке.

7.1.4. Распределение вершин зерен на рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента

Распределение вершин зерен для абразивного пространства. Рассмотрим распределение вершин зерен для абразивного пространства по координате Y (толщина абразивного слоя).

Центра зерен в абразивном пространстве распределены в соответствии с законом равной вероятности. Для задания закона распределения необходимо задать область возможных значений случайной величины. Рассечем абразивное пространство плоскостью перпендикулярной оси Y и примем точку пересечения за начало координат. Координаты центров зерен $y_{\text{ц}}$ расположенных выше секущей плоскости будут положительными, а ниже – отрицательными. Зададим область значений координат центров зерен $-\delta \le y_{\text{ц}} \le \delta$. Тогда плотность вероятности для закона равномерного распределения центров зерен в центрированном виде задается формулой:

$$\varphi_{\text{ц}}(y_{\text{ц}}) = \frac{1}{2\delta}; \qquad -\delta \le y_{\text{ц}} \le \delta \qquad , \tag{7.27}$$

Размеры зерен имеют нормальный закон распределения. Плотность вероятности распределения диаметров зерен по оси Y определяется формулой:

$$\varphi_{\text{д}}(y_{\text{д}}) = \frac{1}{\sigma_{\text{д}}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\frac{(y_{\text{д}}-\mu_{\text{д}})^2}{\sigma_{\text{д}}^2}\right], \ (-\infty < y_{\text{д}} < \infty), \tag{7.28}$$

где $\mu_{\text{д}}, \sigma_{\text{д}}$ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение диаметров зерен.

Распределение размеров радиусов зерен соответствует закону распределения диаметров их диаметров, но с другими значениями параметров:

$$\varphi_{\text{р}}(y_{\text{р}}) = \frac{1}{\sigma_{\text{р}}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\frac{(y_{\text{р}} - \mu_{\text{р}})^2}{\sigma_{\text{р}}^2}\right], \quad (-\infty < y_{\text{р}} < \infty), \tag{7.29}$$

где $\mu_{\text{р}}$, $\sigma_{\text{р}}$ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение радиусов зерен.

Соотношение между параметрами распределений радиусов и диаметров зерен определяется теоремами о математических ожиданиях и дисперсиях [38] для случая их умножения на постоянную величину и соответствует делению на две равные части:

$$\mu_{\text{р}} = \mu_{\text{д}}/2; \quad \sigma_{\text{р}} = \sigma_{\text{д}}/2. \tag{7.30}$$

Рассмотрим статистический механизм формирования расстояний от плоскости, рассекающей абразивное пространство до вершин зерен. Под вершиной будем понимать точку на поверхности зерна, максимально удаленную от секущей плоскости. Координата вершины каждого зерна будет являться суммой координаты центра и значения радиуса зерна. Основным свойством, которым должно обладать распределения вершин зерен – симметричность плотности вероятности относительно секущей плоскости. Тогда плотность закона распределения вершин зерен относительно секущей плоскости в абразивном пространстве $\varphi_{\text{в}}(y_{\text{в}})$ будет являться композицией двух законов распределения:

$$\varphi_{\text{в}}(y_{\text{в}}) = \varphi_{\text{ц}}(y_{\text{ц}}) * \varphi_{\text{р}}(y_{\text{р}}), \tag{7.31}$$

где $\varphi_{\text{ц}}(y_{\text{ц}})$ – распределение центров зерен по центрированному закону равной вероятности (7.27); $\varphi_{\text{р}}(y_{\text{р}})$ – распределение радиусов зерен по центрированному закону Гаусса (7.29) для $\mu_{\text{р}} = 0$.

Определение композиции двух законов распределения $\varphi_{\text{ц}}(y_{\text{ц}}) * \varphi_{\text{р}}(y_{\text{р}})$ производится по формуле (7.18) [38] для пределов интегрирования по $y_{\text{ц}}$ от $(y_{\text{в}} - \delta)$ до $(y_{\text{в}} + \delta)$:

$$\varphi_{\text{в}}(y_{\text{в}}) = \frac{1}{2\delta}\frac{1}{\sigma_{\text{р}}\sqrt{2\pi}} \int_{y_{\text{в}}-\delta}^{y_{\text{в}}+\delta} \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{y_{\text{ц}}^2}{\sigma_{\text{р}}^2}\right) dy_{\text{ц}}, \quad (-\infty < y_{\text{в}} < \infty). \tag{7.32}$$

Более компактный и удобный для расчетов вид уравнения (7.32) можно получить, используя функцию Лапласа [2]:

$$\Phi(z) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) = \Phi(x;\mu,\sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{x}\exp\left[-\frac{1}{2}\frac{(x-\mu)^2}{\sigma}\right]dx, \quad (7.33)$$

где для нашего случая $x \equiv y_{\text{в}}$; $\mu \equiv \delta$; $\sigma \equiv \sigma_{\text{р}}$.

Тогда плотность распределения вершин зерен относительно секущей плоскости в абразивном пространстве примет окончательный вид:

$$\varphi_{\text{ва}}(y_{\text{ва}}) = \frac{1}{2\delta}\left[\Phi\left(\frac{y_{\text{ва}}+\delta}{\sigma_{\text{р}}}\right) - \Phi\left(\frac{y_{\text{ва}}-\delta}{\sigma_{\text{р}}}\right)\right], \quad (-\infty < y_{\text{ва}} < \infty), \quad (7.34)$$

где $\sigma_{\text{р}}$ – среднеквадратическое отклонение радиусов зерен ($\sigma_{\text{р}} = 0{,}5\sigma_{\text{д}}$);
δ – параметр, зависящий от свойств абразивного пространства.

Вычисление функции Лапласа $\Phi(z)$ производится по специальным таблицам или аппроксимационным формулам. Для дальнейших расчетов использовалась формула [36], обеспечивающая погрешность $|\varepsilon(z)| < 1{,}5\cdot 10^{-7}$ в интервале $0 \le z < \infty$:

$$P(z) = 1 - \frac{1}{2}\left(1 + d_1 z + d_2 z^2 + d_3 z^3 + d_4 z^4 + d_5 z^5 + d_6 z^6\right)^{-16}, \quad (7.35)$$

где d_1 = 0,0498673470, d_2 = 0,0211410061, d_3 = 0,0032776263,
d_4 = 0,0000380036, d_5 = 0,0000488906, d_6 = 0,0000053830.

С учетом свойства функции Лапласа $\Phi(-z) = 1 - \Phi(z)$, определение ее значений в интервале $-\infty < z < \infty$ с использованием аппроксимационной формулы (7.35) производилось по выражению:

$$\Phi(z) = P(z);\ \Phi(-z) = 1 - P(z).$$

На рис. 7.8 представлены графики плотности вероятности теоретического закона распределения вершин зерен в алмазосодержащем слое (7.34) для δ = 0,5 ... 4 при σ = 0,1. Из этих графиков видно, что при увеличении отношения δ / σ центральная часть кривых представляет собой прямую линию, т. е. преобладает составляющая равномерного распределения центров зерен.

На краях графиков преобладает составляющая нормального распределения радиусов зерен.

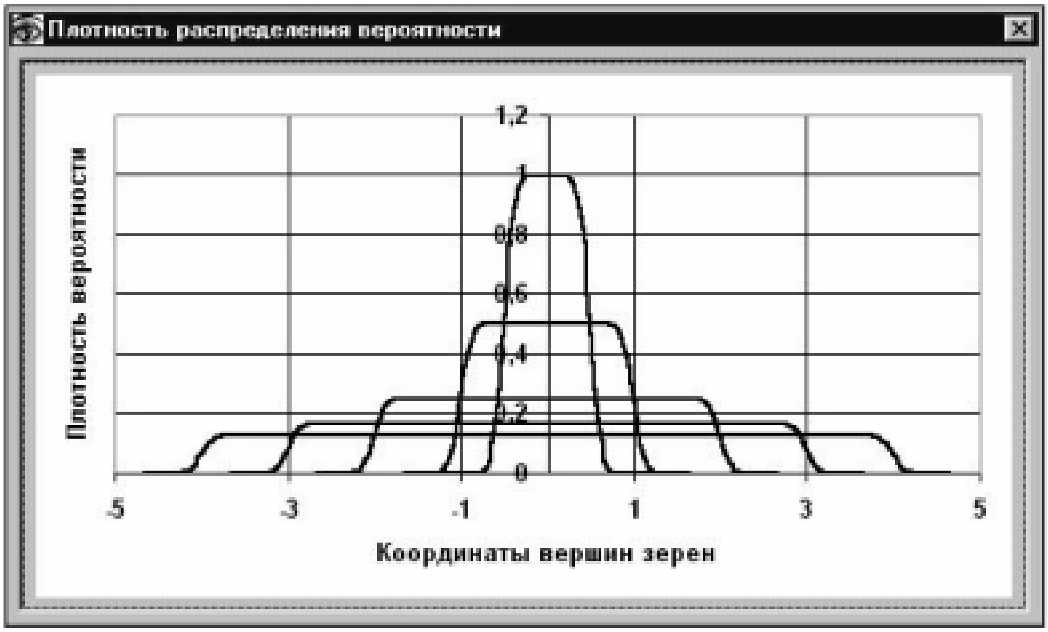


Рисунок 7.8 – Плотность композиционного закона распределения вершин зерен для алмазосодержащего пространства: (равномерный закон распределения центров зерен) * (нормальный закон распределения размеров зерен)

Распределение вершин зерен над поверхностью связки для абразивного полупространства. Переход от закона распределения вершин зерен для абразивного пространства к закону их распределения над поверхностью связки не представляет особой сложности. Для этого перейдем от абразивного пространства (7.34) к абразивному полупространству. Переход производится усечением исходного закона распределения (7.34) для отрицательных значений координат вершин зерен:

$$\varphi_{\text{в с}}(y_{\text{в с}}) = \frac{1}{\delta}\left[\Phi\left(\frac{y_{\text{в с}}+\delta}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{y_{\text{в с}}-\delta}{\sigma}\right)\right], \quad (0 \le y_{\text{в с}} < \infty), \qquad (7.36)$$

где δ, σ – параметры, зависящие от математического ожидания и среднеквадратического отклонения размеров зерен в навеске.

Особый интерес представляет взаимосвязь параметров закона распределения вершин зерен δ, σ со значениями математического ожидания E и среднеквадратического отклонения s исходной навески зерен. Как показали модельные исследования, для нормального закона распределения диаметров зерен ($\mu_д = E$, $\sigma_д = s$) эта взаимосвязь имеет следующий вид:

$$\delta = E\,(1 - \varepsilon_{кр}); \quad \sigma = s\,(1 - \varepsilon_{кр}), \tag{7.37}$$

где $\varepsilon_{кр}$ – коэффициент критической заделки зерен в связке.

Полученный теоретический закон распределения вершин зерен над поверхностью связки задан на интервале от 0 до ∞. Графики плотности вероятности для значений $\delta = 0{,}5 \ldots 4$ при $\sigma = 0{,}1$ представлены на рис. 7.9. Вид графиков для уравнения (7.36) соответствует правым половинам графиков (7.34) с удвоенными ординатами.

Рисунок 7.9 – Плотность композиционного закона распределения высоты выступания вершин зерен над уровнем связки для алмазосодержащего полупространства

Распределение вершин зерен над поверхностью связки для рабочей поверхности. Для этого случая распределение вершин зерен над поверхностью связки будет соответствовать ранее полученному закону (7.36), но ограничено интервалом $0 \le y_{в\,с\,рп} \le y_{в\,с\,рп\,(max)}$. Тогда требуемый закон распределения может быть получен усечением справа уравнения (7.36) до координаты вершины максимально выступающего зерна:

$$\varphi_{в\,с\,рп}(y_{в\,с\,рп}) = \begin{cases} k\dfrac{1}{\delta}\left[\Phi\left(\dfrac{y_{в\,с\,рп} + \delta}{\sigma}\right) - \Phi\left(\dfrac{y_{в\,с\,рп} - \delta}{\sigma}\right)\right], \\ \text{если } 0 \le y_{в\,с\,рп} \le y_{в\,с\,рп\,(max)}; \quad 0, \text{ иначе}, \end{cases} \tag{7.38}$$

где k – коэффициент, компенсирующий усечение (k > 1, для практических расчетов k ≅ 1).

Для рассмотренного теоретического распределения:

$$k = 1 \Bigg/ \int\limits_{0}^{y_{\text{в с рп (max)}}} \frac{1}{\delta}\left[\Phi\left(\frac{y_{\text{в с рп}} + \delta}{\sigma_{\text{р}}}\right) - \Phi\left(\frac{y_{\text{в с рп}} - \delta}{\sigma_{\text{р}}}\right)\right]. \tag{7.39}$$

Значения максимально выступающего зерна $y_{\text{в с рп (max)}} \equiv \Delta_{max}$ могут быть определены экспериментально или ориентировочно рассчитаны по формуле [1] для случая нормального распределения размеров зерен:

$$\Delta_{max} \approx d_{Y max}(1 - \varepsilon_{\text{кр}}) = (\mu_{\text{д}} + 3\sigma_{\text{д}})(1 - \varepsilon_{\text{кр}}), \tag{7.40}$$

где $d_{Y\,max}$ – наибольший размер зерна (из зерен принадлежащих данному экземпляру рабочей поверхности); $\varepsilon_{\text{кр}}$ – коэффициент критической заделки зерен в связке; $\mu_{\text{д}}$, $\sigma_{\text{д}}$ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение размеров зерен по оси Y.

Графики плотности вероятности закона распределения вершин зерен по глубине рабочей поверхности представлены на рис. 7.10. Значения параметров δ и σ соответствуют приведенным на рис. 7.8, 7.9. Интервалы задания плотности распределения имеют значения, зависящие от параметра δ = 0.5, 1, 2, 3, 4 и соответствуют Δ_{max} = 1, 2, 3, 4, 5.

Оценка применимости предложенных законов распределения (7.36), (7.38) производилась в системе 3D моделировании. Дополнительно к вышеизложенным условиям в системе моделирования устанавливался коэффициент критической заделки зерен в связке $\varepsilon_{\text{кр}}$ = 0,1 ... 0,9. Рассмотрим примеры для $\varepsilon_{\text{кр}}$ = 0,5 (для прочих значений критической заделки общие тенденции не изменяются). Число интервалов гистограмм соответствовало 25. Количество зерен на рабочей поверхности связки составляло 52134 шт., лунок – 52031 шт. Максимальная высота выступания зерен над уровнем связки соответствовала 65,827 мкм. Параметры нормального распределения радиусов зерен: выборочное среднее $\mu_{\text{р}}$ = 47,415 мкм; выборочное среднеквадратическое отклонение $\sigma_{\text{р}}$ = 6,794 мкм.

Рисунок 7.10 – Плотность композиционного закона распределения глубины залегания вершин зерен относительно наиболее выступающего на рабочей поверхности

Результаты статистического анализа модельного распределения высоты выступания вершин зерен над уровнем связки представлены на рис. 7.11. Погрешности замены эмпирического распределения теоретическим (7.36): абсолютная ошибка (максимальное значение) 0,001779 (интервал № 6); относительная ошибка (максимальное значение) 93,01 % (интервал № 25); среднее относительное отклонение 1,396 %; среднеквадратическое относительное отклонение 1,894 %.

Распределение вершин зерен по глубине рабочей поверхности. Получив статистически-обоснованный закон распределения вершин зерен относительно поверхности связки (7.38), можно от него перейти к закону распределения зерен относительно наиболее выступающих (выступающего). Для этого необходимо перейти от переменной $y_{\text{в с рп}}$ (высота вершин зерен на рабочей поверхности относительно уровня связки) к расстоянию вершин зерен относительно наиболее выступающих – $y_{\text{в с рп}}$. Такой переход возможен при использовании известного значения высоты максимально выступающего зерна над уровнем связки $y_{\text{в с рп (max)}} \equiv \Delta_{\max}$ (7.40). Зная высоту зерна максимально выступающего над уровнем связки Δ_{max}, можно перейти к глубине залегания вершин зерен:

$$y_{\text{в в рп (max)}} \equiv \Delta_{max} - y_{\text{в с рп (max)}} \qquad (7.41)$$

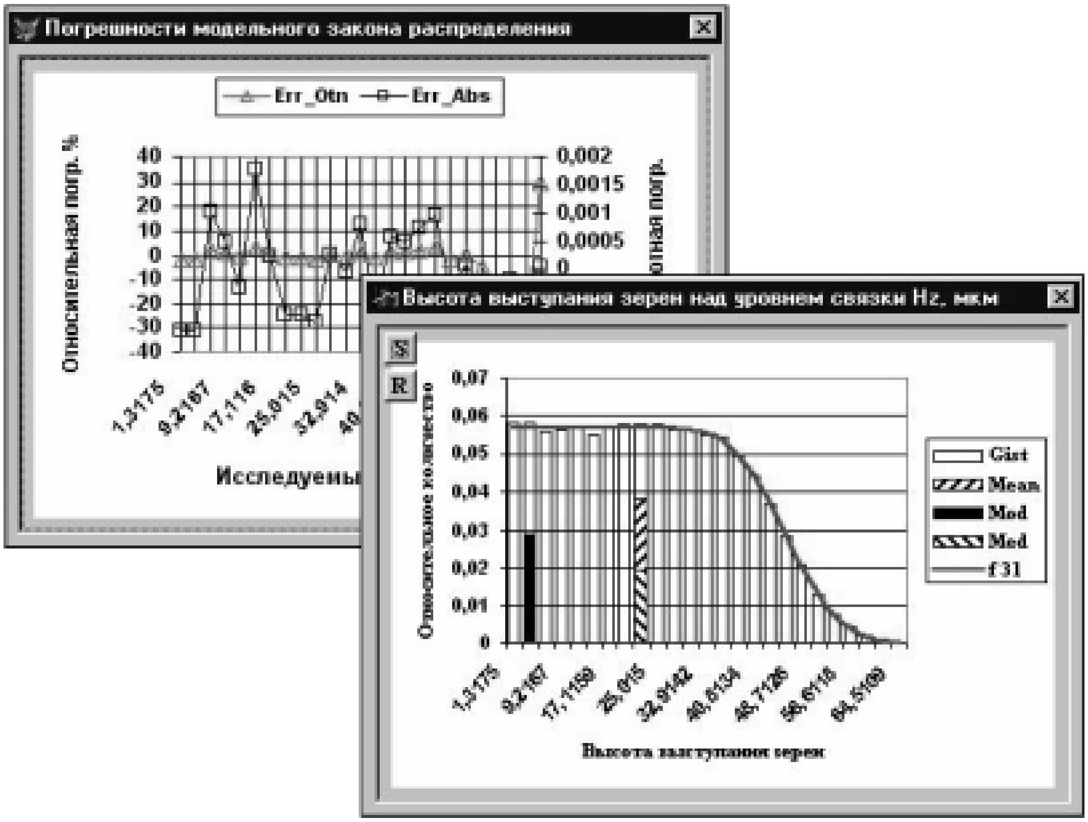


Рисунок 7.11 – Результаты статистического анализа модельного распределения высоты выступания зерен над уровнем связки

Тогда закон распределения вершин зерен по глубине рабочей поверхности будет иметь следующий вид:

$$\varphi_{\text{вврп}}(y_{\text{вврп}}) = \begin{cases} k\dfrac{1}{\delta}\left[\Phi\left(\dfrac{\Delta_{max} - y_{\text{вврп}} + \delta}{\sigma}\right) - \Phi\left(\dfrac{\Delta_{max} - y_{\text{вврп}} - \delta}{\sigma}\right)\right], \\ \text{если} \quad 0 \le y_{\text{вврп}} \le \Delta_{max}; \quad 0, \quad \text{иначе}, \end{cases} \qquad (7.42)$$

где k – коэффициент, компенсирующий усечение ($k > 1$, для практических расчетов $k \cong 1$); Δ_{max} – высота зерна максимально выступающего над уровнем связки; δ – параметр, зависящий от распределения центров зерен в абразивном пространстве; σ – параметр, зависящий от среднеквадратического отклонения размеров зерен.

Результаты статистического анализа модельного распределения глубины залегания вершин зерен по глубине рабочей поверхности представлены на рис. 7.12. Погрешности замены эмпирического распределения теоретическим: абсолютная ошибка (максимальное значение) 0,001836 (интервал № 20); относительная ошибка (максимальное значение) 34,12 % (интервал № 1); среднее относительное отклонение 1,461 %; среднеквадратическое относительное отклонение 1,90 %. Проведенный анализ показал высокую степень соответствия модельных распределений теоретическим. Такая взаимная проверка подтверждает правильность выбора методологии 3D моделирования и обоснованность функционально-композиционного статистического механизма формирования законов распределения вершин зерен в абразивном слое и на рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента.

Таким образом, теоретически обоснован и подтвержден модельными исследованиями композиционный закон распределения вершин зерен на рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента. Он одновременно объединяет законы распределения размеров зерен в навеске, распределение их центров в алмазосодержащем слое с учетом коэффициента относительной критической заделки зерен в связке. Проведенные исследования выявили применимость композиционных законов для всего диапазона возможных значений относительной критической заделки зерен в связке (0,1 – 0,9), что создает предпосылки их использования при описании рабочей поверхности абразивно-алмазного инструмента в процессе работы.

7.1.5. Влияние неравномерности поверхности связки на распределение вершин зерен

Модельные исследования по оценке влияния неравномерности поверхности связки на распределение вершин зерен показали, что плотность распределения высоты выступания вершин зерен из связки не зависит от неравномерности ее поверхности. Это связано с однородностью абразивного пространства и выбором в качестве базы отсчета поверхности связки. Распределение высоты вершин зерен по глубине рабочей поверхности в полной мере зависит от распределения неравномерности поверхности связки. Примеры, иллюстрирующие такую взаимосвязь, представлены на рис. 7.13. Неравномерность связки отсутствует (рис. 7.13 а), тогда закон распределения вершин зерен соответствует (7.38). При наличии неравномерности связки (рис. 7.13 б, в, г) вид плотности распределения вершин зерен существенно изменяется. Это позволяет выдвинуть доказательную гипотезу о возможности регулирования статистических характеристик распределения вершин зерен путем изменения статистических характеристик поверхности связки.

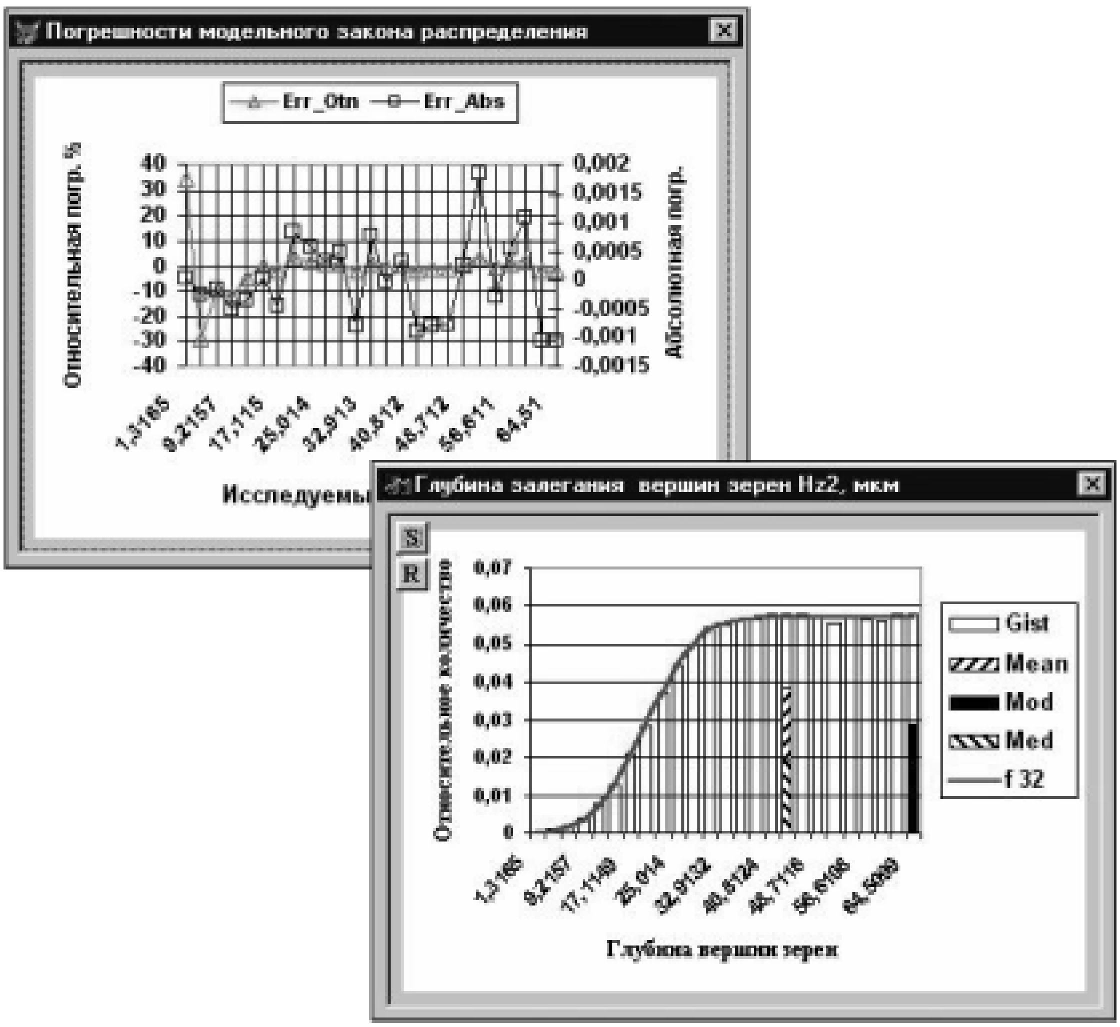


Рисунок 7.12 – Результаты статистического анализа модельного распределения вершин зерен по глубине рабочей поверхности

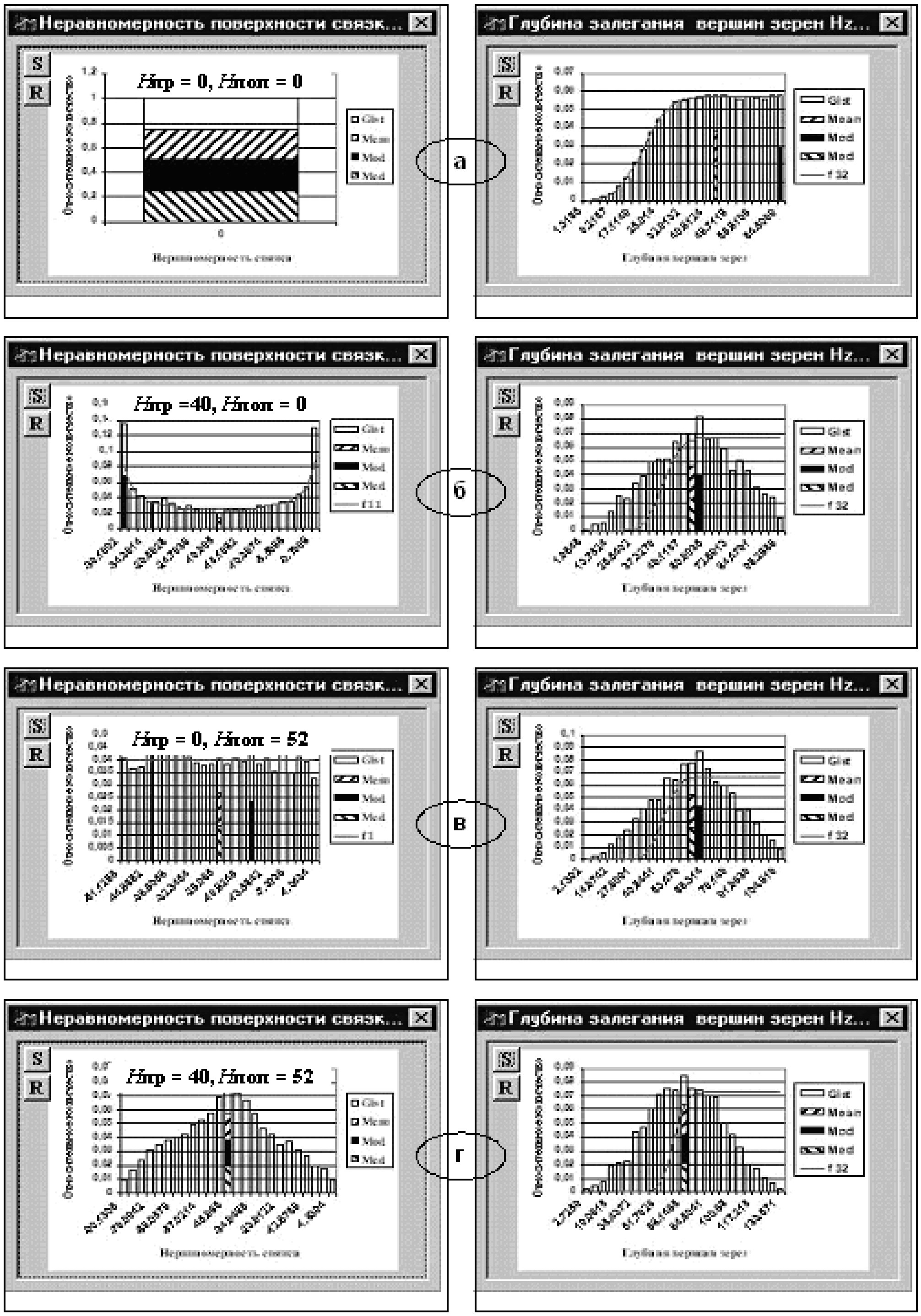


Рисунок 7.13 – Влияние плотности распределения неравномерности поверхности связки на плотность распределения глубины залегания вершин зерен по глубине рабочей поверхности:

$H_{пр}$ – волнистость продольного профиля, мкм;

$H_{поп}$ – заборный конус или поднутрение поперечного профиля, мкм

7.2. 3D методология определения оптимальных характеристик алмазных кругов на этапах изготовления и эксплуатации

Эффективность процесса алмазного шлифования определяется качеством и характеристиками алмазных кругов и правильностью выбора условий шлифования. Первое условие в большой степени обеспечивается на стадии изготовления алмазных кругов, второе – на стадии их эксплуатации.

В процесса шлифования материалов, твердость которых не позволяет обеспечить классическое требование теории резания о 2-х кратном превышении твердости инструментального материала (ИМ) над обрабатываемым (ОМ), определяющим может являться соотношение прочностей элементов системы «обрабатываемый материал–алмазное зерно–связка круга». Например, при алмазном шлифовании сверхтвердых материалом (СТМ), когда твердости ИМ и ОМ практически одинаковы, эффективность процесса полностью определяется оптимальностью выбора соотношения прочностей СТМ, алмазных зерен и связки круга [1].

В настоящее время в Украине существует несколько сотен марок связок применяемых в алмазных кругах. Эти связки существенно различаются по своим прочностным свойствам. Например, только металлические связки имеют довольно широкий диапазон прочности – от алюминиевых до твердосплавных.

Таким же широким прочностным диапазоном характеризуются прочностные свойства алмазных шлифпорошков от АС2 до АС160Т, различающимися по прочности в сотни раз.

Однако в настоящее время отсутствует методология выбора оптимального сочетания прочностных свойств алмазных зерен и металлической связки применительно к обработке конкретного обрабатываемого материала.

Существующие в литературе рекомендации по применению тех или иных алмазных зерен и металлических связок носят общий характер и имеют большие диапазоны. Такие рекомендации, с учетом высокой стоимости алмазных зерен (различающейся в зависимости от марки зерна в сотни раз), приводят к низкой эффективности их использования и, как следствие, – высокой себестоимости процесса алмазного шлифования, что существенно сдерживает его применение в процессах обработки. К нерациональному использованию алмазных зерен приводит также не всегда обоснованное назначение уровня их концентрации в алмазных кругах. Традиционно применяемая в серийно выпускаемых кругах концентрация алмазных зерен (25, 50, 100, 150, 200 %) требует существенного уточнения. Для обработки конкретного обрабатываемого материала должны быть выбраны конкретные по прочности (и цене) алмазные зерна, они должны быть заложены в определенную, по своим прочностным свойствам, связку, и их концентрация в круге должна быть строго определенной. При этом с целью экономии алмазных зерен их концентрация не должна ограничиваться серийно выпускаемой. При этом должна решаться также задача оптимального сочетания прочностных свойств металлической связки и алмазных зерен с точки зрения сохранения их целостности в процессе спекания алмазных кругов.

Методология решения данной проблемы базируется на 3D моделировании напряженно-деформированного состояния зоны шлифования и анализе процессов разрушения, происходящих в этой зоне в зависимости от прочностных свойств алмазных зерен, связки и обрабатываемого материала.

С использованием разработанной методологии 3D моделирования НДС проведены исследования процесса спекания алмазных кругов на металлических связках и зоны шлифования различных труднообрабатываемых материалов с целью определения оптимального сочетания прочностных свойств алмазных зерен, обрабатываемого материала и металлической связки как на стадии изготовления алмазных кругов, так и на стадии их эксплуатации (рис. 7. 14).

Задачей процесса 3D моделирования НДС зоны спекания алмазоносного слоя круга на металлической связке является определение оптимального сочетания прочностных свойств алмазных зерен и связки, при которых обеспечивается сохранение целостности алмазных зерен в процессе спекания алмазного круга.

Вопреки существующим представлениям о модели алмазоносного слоя кругов как совершенной [14], нами установлено, что структура этого слоя кругов содержит исходную дефектность в виде поврежденных алмазных зерен, которая количественно определяется безразмерной величиной степени повреждения алмазных зерен [25].

Рисунок 7.14 – Последовательность определения оптимального сочетания прочностных свойств обрабатываемого материала, металлической связки, алмазных зерен и их концентрации

Гранулометрический анализ зерен синтетических алмазов АС50 400/315, извлеченных рекуперацией из образца твесала, показал, что в процессе спекания остаются неразрешенными только около 10–20 % зерен. При этом показано, что на степень повреждаемости алмазных зерен в процессе спекания КАМ существенное влияние оказывает концентрация в них алмазных зерен. Так, увеличение концентрации с 50 до 150 % повышает повреждаемость алмазных зерен в процессе спекания в 2,8 раза.

Поскольку технология спекания алмазоносного слоя круга, например, на твердосплавной связки типа ВК, практически идентична с технологией спекания композиционных алмазных материалов (КАМ), объективно предположить, что и при спекании алмазных кругов часть зерен разрушается.

Показано, что в процессе спекания алмазных кругов процент основной фракции (крупных зерен) уменьшается на 20–30 % [17].

Причем, алмазные зерна различной прочности, очевидно, будут подвергаться разрушению в процессе спекания по-разному. Состав металлической связки и, как следствие, технологические параметры спекания кругов будут существенно сказываться на степени повреждаемости алмазных зерен.

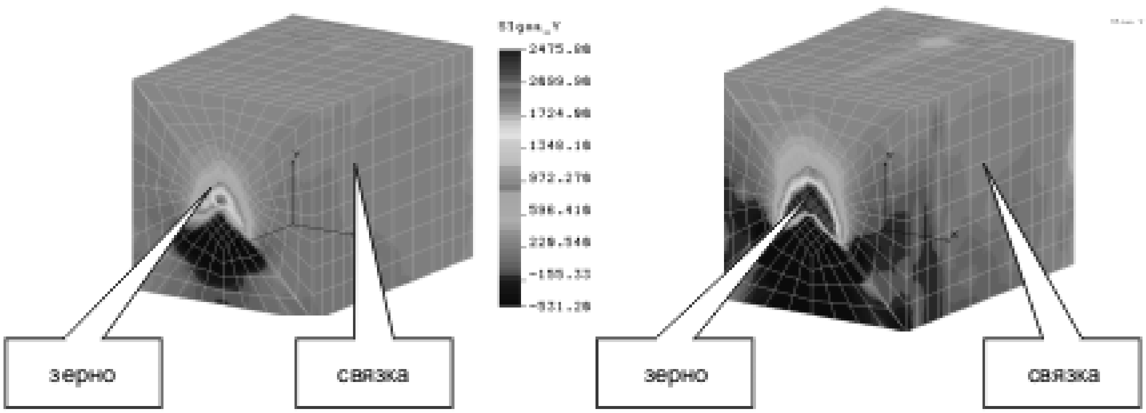
При 3D моделировании процесса спекания фрагмент алмазоносного слоя круга моделировался кубом с размерами 300x300x300 мкм, с помещенным в центре алмазным зерно в форме октаэдра с размерами 100x100 мкм, что соответствует 100 % концентрации алмазного круга. При моделировании круга с 50 % концентрацией алмазных зерен размер куба увеличивался в два раза и т. д.

Металлофаза в алмазном зерне моделировалась в виде прослойки толщиной 5–10 мкм различной формы и длины.

Давление и температура соответствовала реальному процессу спекания алмазных кругов. Принято, что если приведенные напряжения в алмазном зерне превышали предел его прочности, оно считалось разрушенным (дефектным). Моделировался процесс спекания алмазоносного слоя на различных металлических связках – от алюминиевых до твердосплавных с различными по прочности алмазными зернами, – от АС2 до АС160Т.

Результаты 3D моделирования НДС зоны спекания алмазных кругов представлены на рис. 7.15.

Путем варьирования сочетанием прочности алмазных зерен и их концентрации в круге для различных металлических связок определялось такое их сочетания, при котором обеспечивалось сохранение целостности алмазных зерен, т.е. они не должны разрушаться в процессе спекания. Установлено, что далеко не все серийно выпускаемые круги с используемым сочетанием марки алмазных зерен и марки металлической связки могут быть изготовлены со стандартной концентрацией алмазных зерен без нарушения их целостности. Так например, при спекании круга на связке М6-14 с алмазными зернами марки АС6 концентрация их в круге не должна превышать 7 %, в противном случае они будут разрушаться уже в процессе изготовления круга. Показано, что для гарантийного сохранения целостности алмазных зерен практически во всех серийно выпускаемых кругах их концентрация должна быть существенно меньше применяемой. Такая тенденция хорошо увязывается с возможностью и необходимостью снижения концентрации алмазных зерен в круге до уровня 10–15 % при шлифовании сверхтвердых материалов.



а б

Рисунок 7.15 – Величина приведенных напряжений в системе «зерно–связка» при 3D моделировании процесса спекания алмазных кругов:
а – связка М1-01; б – связка ВК8

Установлено, что для сохранения целостности алмазных зерен в процессе спекания круга должно быть строго соблюдено сочетания марки алмазных зерен и марки металлической связки. Так, для круга 100 % концентрации зерен в различные металлические связки могут быть заложены алмазные зерна по прочности не ниже указанных в табл. 7.1.

Таблица 7.1 – Предельно допустимые прочности алмазных зерен для различных связок

Связка	М1-01	М2-09	М6-14	ВК
Зерно	АС6	АС32	АС50	АС160

Таким образом, на первом этапе исследований установлены оптимальные сочетания прочностей металлической связки и алмазных зерен с предельно допустимой концентрацией их в круге, обеспечивающие сохранение целостности алмазных зерен в процессе изготовления алмазных кругов. Полученные на первом этапе оптимальное соотношение прочностей связки, алмазных зерен и их концентрация являются лишь ограничивающими параметрами (характеристиками) и должны быть уточнены для процесса алмазного шлифования в зависимости от прочностных свойств обрабатываемого материала.

После получения установленных ограничений определяем оптимальное сочетания прочности обрабатываемого материала, связки, алмазных зерен и их концентрации в круге, обеспечивающее максимальную эффективность процесса шлифования. В процессе эксплуатации оптимальное сочетание прочностей связки, алмазных зерен и их концентрации определяем в зависимости от прочностных свойств обрабатываемого материала. Для этого также используется методология 3D моделирования НДС для зоны шлифования.

Оптимальное сочетание прочностей связки, зерен и их концентрация должно обеспечивать такой уровень НДС в зоне шлифования, при котором:

– обеспечивается удержание алмазных зерен в связке;

– исключается хрупкое микроразрушение алмазных зерен (при шлифовании «мягких» материалов) или их самозатачивания без образования площадок износа (при шлифования «твердых» материалов);

– обеспечиваются максимальные напряжения в обрабатываемом материале (съем припуска);

– исключается образование недопустимого дефектного слоя (брак).

Исходными данными должны быть физико-механические свойства обрабатываемого материала и либо прочность алмазных зерен и связки, тогда результатом расчета будет являться концентрация алмазных зерен, либо прочность связки и концентрация алмазных зерен, тогда результатом расчета будет прочность алмазных зерен и т. д.

Расчетная схема и пример результатов расчета 3D НДС системы «СТМ–зерно–связка» приведен на рис. 5.4–5.5.

Таким образом, теоретически определена область оптимального разрушения элементов системы «СТМ–зерно–связка», в которой зерно удерживается в связке и не разрушается, а СТМ разрушается в контакте, но не растрескивается из-за общей нагрузки всех зерен (исключается брак (рис. 7.16)).

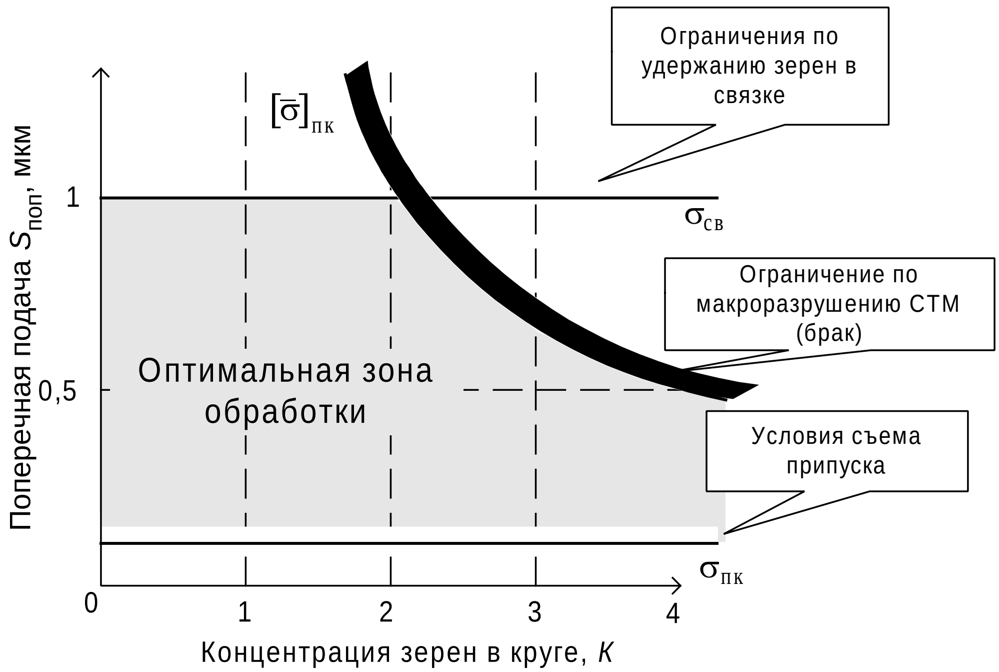


Рисунок 7.16 – Результаты расчета оптимальной концентрации алмазных зерен и поперечной подачи по прочностным свойствам элементов зоны шлифования

Теоретически может быть определена область оптимальных условий алмазного шлифования различных марок СТМ, в том числе и вновь создаваемых. Дальнейшие экспериментальные исследования с целью сокращения их объема, будут проводиться в этой области.

Применительно к алмазному шлифованию сверхтвердых материалов определены оптимальные характеристики алмазных кругов и условия обработки (табл. 7.2).

Такое соотношение прочностных свойств обрабатываемых материалов, связки и алмазных зерен обеспечивает бездефектную обработку при условии максимально возможной производительности и минимального удельного расхода зерен в процессе алмазного шлифования. Определение подобных оптимальных соотношений применительно к процессу алмазного шлифования не только СТМ, но и твердых сплавов, керамики, полимеров и других материалов, является одним из важных резервов повышения эффективности данного вида обработки.

Таблица 7.2 – Оптимальные характеристики алмазных кругов на этапе их эксплуатации

Обрабатываемый СТМ	Прочность алмазных зерен	Прочность металлической связки, ГПа	Концентрация алмазных зерен в круге	Скорость шлифования, м/с	Нормальное давление, МПа
АСПК	АС160	600	5–7	40–50	3–4
АСБ	АС85	500	8–11	35–40	2,5–3
ДАП	АС60	400	12–15	30–35	2–2,5
СКМ	АС32	300	17–22	25–30	1,5–2
Гексанит-Р	АС15	100	25–35	20–30	1–1,5
Эльбор-Р	АС15	100	35–50	20–30	1–1,5

Таким образом, разработана методология определения научно обоснованных рекомендаций по применению оптимального сочетания прочностей связки, алмазных зерен и их концентрации для эффективного шлифования материалов различной прочности. Установлено, что прочность связки круга является важнейшим параметром, определяющим не только степень алмазоудержания, но и производительность процесса шлифования. Концентрация алмазных зерен в круге должна назначаться исходя из соотношения прочностей элементов системы «обрабатываемый материал–зерно–связка». Уровень дефектности при алмазном шлифования СТМ определяется соотношением прочностей СТМ, связки, алмазных зерен и их концентрацией в круге. Выбор зернистости алмазного круга следует проводить с учетом прочностных свойств различных по величине алмазных зерен.

7.3. Влияние модуля упругости связки на эффективность взаимного микроразрушения элементов системы «СТМ–зерно–связка»

Поскольку в условиях контактирования двух равнотвердых элементов системы «СТМ–зерно–связка» последняя является практически единственным элементом, физико-механическими свойствами которого можно варьировать в довольно широком диапазоне, следует более глубоко изучить ее роль в процессе алмазного шлифования СТМ.

В общепринятое представление о требованиях к связке – таких как максимальное алмазоудержание и способность к самозатачиванию – были внесены коррективы: снято требование к связке, связанное с обеспечением процесса самозатачивания (микроразрушения связки), однако наряду с требованием максимального алмазоудержания появилось требование к способности управляемого дозируемого удаления связки с поверхности РПК механическим или электро-физико-химическим методом, либо их комбинацией. На этом в настоящее время основные требования к связке практически ограничиваются.

Приведенные расчеты 3D НДС системы «СТМ–зерно–связка» выявили существенную роль модуля упругости связки в эффективности взаимного разрушения элементов системы, а не только в прочности удержания зерен.

Применительно к особенностям изучаемого процесса, рассмотрим:

– влияние физико-механических свойств (модуля упругости) связки на величину напряжений в контакте «зерно–СТМ» и, как следствие, на интенсивность разрушения СТМ и зерен, т. е. производительность шлифования и удельный износ, влияние величины заглубления зерен в связку на число работающих зерен и, как следствие, на величину фактической площади контакта «СТМ–РПК» и нагрузку на единичное зерно;

– влияние частоты собственных колебания зерен, определяемой жесткостью связки, на процесс «отслеживания» анизотропии свойств кристаллитов СТМ;

– эффективность предложенного процесса принудительного формирования режущего субмикрорельефа на алмазных зернах.

При характерных для процесса алмазного шлифования СТМ «жестких» условиях нагружения системы самым слабым (модуль упругости связки в 10 раз меньше, чем у СТМ и зерен) звеном системы является связка.

На первом этапе осуществляются расчеты влияния физико-механических свойств связки и условий взаимодействия элементов системы на величину критической заделки зерен в связку. Этот параметр необходим для определения числа фактически работающих зерен и фактической площади контакта в системе «СТМ–зерно–связка». В качестве критерия разрушения принято превышение величины приведенных напряжений предела текучести материала связки или величины ударной вязкости, которая для наиболее прочных связок М6-16 и М6-14 равна соответственно 66 и 29,5–61,4 кДж/м^2 [17]. Пределы текучести связок на основе алюминия, бронзы и железа соответственно равны 200, 270 и 470 МПа [43]. Как видно, наибольшей упругостью обладает связка на основе железа. Из серийно выпускаемых металлических связок наибольший модуль упругости у связки М6-16 (МО-3), у которой E = 193,7 ГПа.

Тенденции влияния модуля упругости связки на эффективность алмазного шлифования представлено на рис. 7.17.

Величину критической заделки алмазных зерен в связку $h_{кр}$ определяли методом 3D моделирования НДС системы «СТМ–зерно–связка», приняв за предел прочности связки величину ее ударной вязкости. Результаты расчетов критической величины заделки при 3D моделировании НДС системы представлены в табл. 7.3.

По выбранному А.Н. Резниковым критерию устойчивости зерен в связке, равному: $E = h_{кр}/l_з$, определена величина критической заделки и проведено ее сравнение с результатами расчетов по методу конечных элементов (табл. 7.3). Расхождения в результатах, очевидно, связаны с тем, что в расчетах А. Н. Резникова решается плоская задача, что не совсем корректно при соизмеримых размерах зерен и связки в модели.

На основании обработки результатов расчета в среде MathCAD получены аналитические зависимости влияния модуля упругости связки $E_{св}$ (или ударной вязкости), рабочей высоты зерен $h_р$, нормального давления $P_н$, скорости шлифования $V_{кр}$, и поперечной подачи на критическую величину заделки зерен в связку $h_{кр}$:

$$h_{кр} = K_1 E_{св} h_р \;\; _н ; \qquad (7.43)$$

$$h_{кр} = K_2 \;\; _{св} \;\; _р \;\; _{поп} ; \qquad (7.44)$$

$$h_{кр} = K_3 \;\; _{св} \;\; _р \;\; _{кр} , \qquad (7.45)$$

где $K_{1,\,2,\,3}$ – коэффициенты, получаемые путем расчета 3D НДС системы «СТМ–зерно–связка» методом МКЭ;

$E_{св}$ – модуль упругости связки;

$h_р$ – рабочая высота зерен;

$P_н$ – нормальное давление в контакте «РПК–СТМ»;

$S_{поп}$ – поперечная подача;

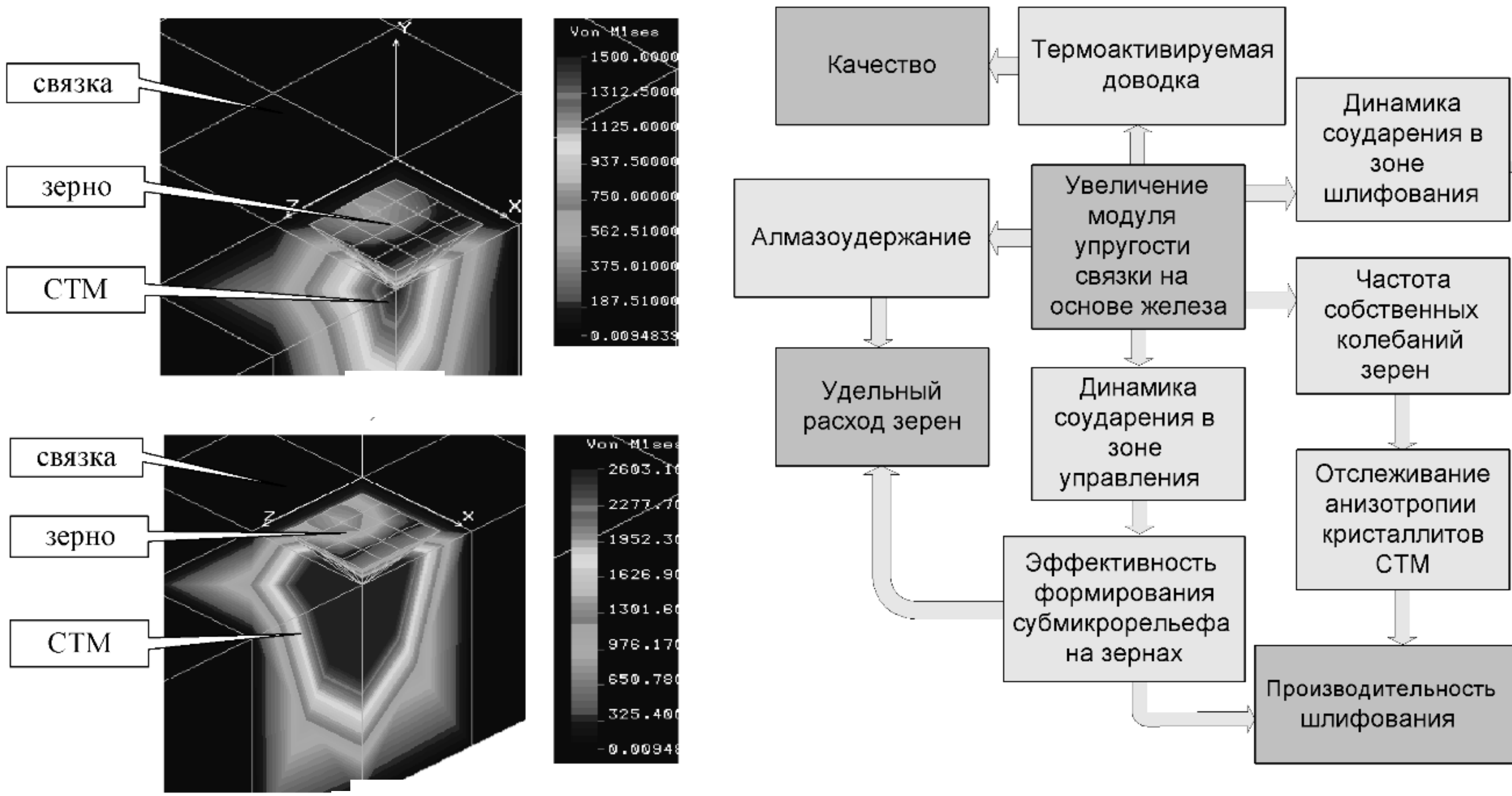
$V_{кр}$ – скорость круга.

Результаты расчетов по этим зависимостям могут быть использованы при определении эффективности использования свойств алмазных зерен в теоретическом модуле экспертной системы процесса алмазного шлифования СТМ [41].

Поскольку при алмазном шлифовании СТМ модули упругости алмазных зерен и обрабатываемого материала практически одинаковы (без учета анизотропии свойств) и имеют предельные в природе значения, присущие алмазным структурам, а процесс съема припуска осуществляется в основном за счет чрезвычайно высоких контактных давлений, для производительного процесса необходимо создать такие контактные давления условиями шлифования.

Анализ влияния модуля упругости связки на 3D НДС системы показал, что именно связка оказывает доминирующее влияние на параметры НДС системы и на величину контактных давлений в системе «зерно–СТМ» и, следовательно, во многом определяет интенсивность взаимного разрушения СТМ и зерен.

Расчеты показали, что степень влияния модулей упругости зерна, СТМ и связки на величину приведенных напряжений (или плотность энергии деформации) в СТМ оценивается как соответственно 0,02–0,036–0,164 или, оказывается, что *модуль упругости связки влияет на величину напряжений в контакте «зерно–СТМ» в 8 раз больше, чем модуль упругости зерна и в 5 раз больше, чем модуль упругости СТМ*. Например, при алмазном шлифовании СТМ кругом на связке М1-01 (E = 72 ГПа) объем разрушенного СТМ при одноактном взаимодействии с алмазным зерном составляет $4 \cdot 10^{-10}$ мм^3, а при шлифовании кругом на связке М6-14 (E = 196 ГПа) при тех же условиях этот объем составляет уже $34 \cdot 10^{-10}$ мм^3.



а – приведенные напряжения в системе «зерно-СТМ» для связки М1-01 (E = 72 ГПа);
б – приведенные напряжения в системе «зерно-СТМ» для связки М6-14 (E = 196 ГПа);
в– алгоритм влияния модуля упругости связки на эффективность алмазного шлифования

Таблица 7.3 – Влияние параметров взаимодействия системы на величину объемов разрушения ее элементов

Модуль упругости связки $E_{св}$, ГПа	70	90	110	130
$V_з \cdot 10^{10}$, мм^3	11	14	17	21
$V_{стм} \cdot 10^{10}$, мм^3	3	6	8	11
$V_{вып} \cdot 10^{10}$, мм^3	67	54	43	32
Угол при вершине зерна φ°	15	30	45	90
$V_з \cdot 10^{10}$, мм^3	11	8	6	4
$V_{стм} \cdot 10^{10}$, мм^3	3	1,1	0,6	0,2
$V_{вып} \cdot 10^{10}$, мм^3	67	56	51	47
Число острых зерен (в %)	80	60	30	10
$V_з \cdot 10^{10}$, мм^3	18	12	7	5
$V_{стм} \cdot 10^{10}$, мм^3	6	4	2	0,8
$V_{вып} \cdot 10^{10}$, мм^3	67	54	49	43
Модуль упругости СТМ $E_{стм}$, ГПа	700	900	1100	1300
$V_з \cdot 10^{10}$, мм^3	5	8	12	18
$V_{стм} \cdot 10^{10}$, мм^3	2	1	0.6	0.3
$V_{вып} \cdot 10^{10}$, мм^3	65	68	69	73
Модуль упругости алмазных зерен $E_з$, ГПа	1050(100)	1160(110)	1200(111)	1100(ср)
$V_з \cdot 10^{10}$, мм^3	8	5	3	1
$V_{стм} \cdot 10^{10}$, мм^3	2	3	2	11
$V_{вып} \cdot 10^{10}$,мм^3	65	62	58	63
Энергия разрушения, дж/м^2	10,6(111)	13(110)	18(100)	14(ср)
$V_з \cdot 10^{10}$, мм^3	7	5	3	6
$V_{стм} \cdot 10^{10}$, мм^3	2	3	5	8
$V_{вып} \cdot 10^{10}$, мм^3	12	15	17	16

Полученные результаты хорошо согласуются с установленной зависимостью влияния микротвердости связки на шероховатость обработанной поверхности керамики [3]:

$$R_a = 2{,}6 \cdot 10^{-10} d^4 \left(HV_c\right)^{0{,}67} \left(HV\right)^{0{,}54}, \quad (7.46)$$

где d – зернистость круга;

HV, HV_c – микротвердость обрабатываемого материала и связки круга.

Очевидно, использование более жестких связок (с повышенным модулем упругости) приводит к росту шероховатости поверхности главным образом за счет значительной силы соударения алмазных зерен с СТМ, и, как следствие, более интенсивному микроразрушению объемов СТМ.

Таким образом, существенным резервом повышения эффективности алмазного шлифования СТМ (и других твердых материалов) является повышение модуля упругости металлических связок. В связи с этим целесообразным представляется применение связок на основе железа, например, М6-14 (МЖ). При этом кроме установленных положительных эффектов повышения прочности алмазоудержания и эффективности контактного взаимодействия в системе «зерно–СТМ», такие связки существенно повышают эффективность доводки поверхности СТМ за счет интенсификации термоактивируемых процессов при контакте железной связки с алмазным СТМ.

В условиях 3D моделирования НДС системы «СТМ – зерно – связка» анализировалась и возможная величина заглубления зерна в связку. В условиях шлифования по жесткой схеме, когда в контакте РПК – СТМ с одной стороны контактируют чрезвычайно жесткие материалы «зерно–СТМ», очевидно, основная величина поперечной подачи должна быть компенсирована упругостью связки и величиной заглубления в нее алмазных зерен. С определенными допущениями процесс алмазного шлифования аналогичен процессу шаржирования или процессу профилирования алмазных кругов методом пластического деформирования [43, 45], где в качестве притира выступает предельно жесткий материал СТМ, а шаржируемый материал – металлическая связка на основе алюминия, бронзы, железа или кобальта. При этом, как показал П.И. Ящерицын [45], даже алмазные зерна марки АСВ зернистостью 63/40 могут быть полностью заглублены (вдавлены) в связку без разрушения.

Расчеты, проведенные методом конечных элементов, показали, что чем меньше рабочая высота зерен, тем меньше вероятность разрушения алмазных зерен, что полностью совпадает с выводами П. И. Ящерицына по профилированию алмазных кругов. Этот вывод подтверждает наше положение о том, что процесс алмазного шлифования СТМ следует вести не с максимальной (как утверждалось ранее [9]), а с минимально возможной, исключающей контакт связки с СТМ высотой выступания зерен из связки $h_р$. Таким образом, при расчете числа работающих (контактирующих) зерен в процессе шлифования СТМ следует учитывать коэффициент деформирования (вдавливания) наиболее выступающих зерен в связку $K_д$ и за счет этого вхождение в контакт вершин зерен, находящихся в слое Δ от линии выступов. Расчетные величины упругого деформирования (вдавливания) зерен в связку, значения которой получены при 3D моделировании НДС системы, приведены в табл. 7.4.

В. И. Власов получил оптимальные значения твердости связки для различных марок алмазных зерен и зависимость относительного внедрения зерна в связку от усилия прижима P:

$$P = 1{,}645 H_{св} d_з^2 \xi^{0{,}83}, \qquad (7.47)$$

где $H_{св}$ – микротвердость связки;

$d_з$ – размер зерна;

$\xi = \dfrac{a}{R_з}$, a – внедрение зерна в связку.

Получена зависимость между прочностью зерна $\sigma_з$ и величиной его относительного внедрения в связку при разрушении $\xi_р$:

$$\sigma_з = \frac{\alpha}{\pi} \sigma_{тс} \xi_р^{\beta} exp\left(-\gamma \xi_р^{\delta}\right) \text{ при } \xi \le 1. \qquad (7.48)$$

Установлено, что чем прочнее алмазное зерно, тем более твердую связку следует применять. В нашем случае, когда внедрение алмазного зерна в обрабатываемый материал ничтожно мало и им можно пренебречь, модуль упругости связки будет определяться из условия динамического вдавливания зерна в связку без его разрушения, т. е. фактически динамической прочностью зерен. Таким образом, модуль упругости связки следует определять исходя из динамической прочности алмазных зерен, определяемых по предложенной нами методике.

Таблица 7.4 – Влияние физико-механических свойств связки и условий нагружения системы на величину критической заделки зерен в связку $h_{кр}$

Модуль упругости связки *E*, ГПа	70	100	130	198	
$h_{кр}$, мкм	62	53	46	38	
Контакт:	вершиной	ребром	гранью		
$h_{кр}$, мкм	62	50	34		
Величина поперечной подачи, мкм	1	2	3	4	5
$h_{кр}$, мкм	32	44	51	58	62
Скорость круга, *V* м/с	10	15	20	30	
h кр, мкм	32	47	63	82	

Таким образом, модуль упругости связки должен обеспечивать прочность удержания зерен в связке, нагрузку на зерно, достаточную для одноактного микроразрушения зерна у вершины с постепенным заглублением его в связку. Введение в зону шлифования или/и в зону управления энергии ультразвуковых колебаний существенно повышает вероятность заглубления алмазных зерен в связку, что естественно продлевает активную жизнь алмазных зерен. Такой эффект использован А. А. Сагардой в способе шаржирования поверхности абразивными зернами.

Величина модуля упругости связки определяет также частоту собственных колебаний алмазных зерен в связке, которая определена нами методом конечных элементов. Жесткость связки важна и при отслеживании анизотропии свойств кристаллитов СТМ – чем жестче связка, тем больше вероятность «успевания» отследить анизотропию, тем производительнее процесс.

Влияние модуля упругости связки круга на выходные показатели процесса шлифования СТМ приведены на рис. 7.18

Таким образом, *расчеты 3D НДС системы «СТМ–зерно–связка» показали, что модуль упругости (жесткость) металлической связки является наиболее значимым параметром, определяющим эффективность взаимного разрушения элементов системы «СТМ–зерно–связка» при алмазном шлифовании. Увеличение жесткости металлической связки в два раза может в 7 раз увеличить напряжение в контакте «зерно–СТМ», а, следовательно, существенно повысить производительность шлифования. Положительная роль увеличения модуля упругости связки в эффективности управляемого процесса шлифования СТМ представлена на рис. 7.17*

Увеличение модуля упругости (жесткости) связки обеспечивает следующие положительные эффекты при шлифовании:

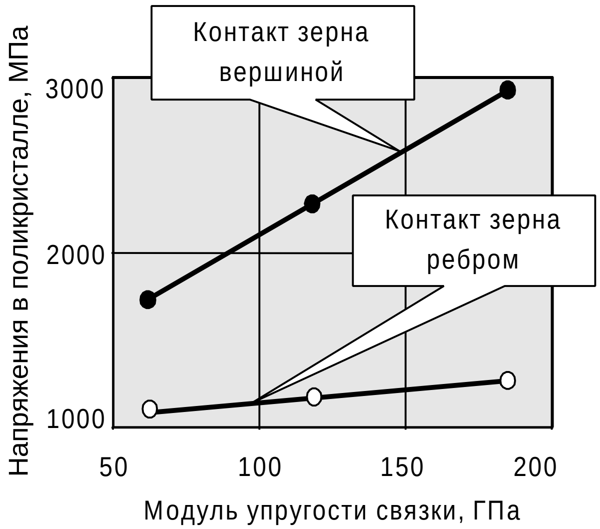
– повышает прочность алмазоудержания;

– повышает эффективность взаимного микроразрушения в контакте «зерно–СТМ» за счет увеличения силы соударения;

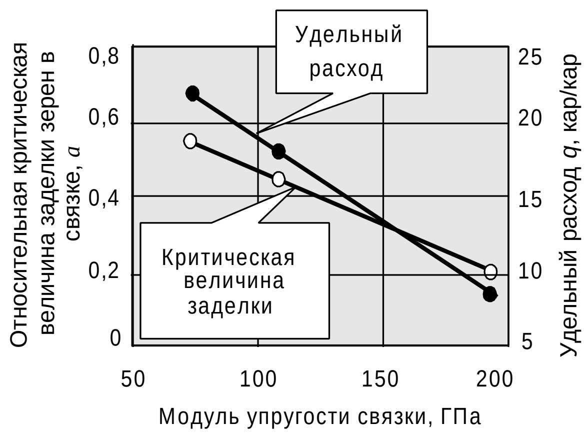
– обеспечивает большую вероятность отслеживания алмазными зернами «мягких» и «твердых» граней кристаллитов СТМ за счет увеличения частоты собственных колебаний зерен в связке, что способствует повышению производительности шлифования.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что оптимальным подбором соотношения жесткостей (модулей упругости) металлической связки круга и связки инструмента – ударника можно создать условия, при которых при соударении будут максимально микроразрушаться алмазные зерна круга, т.е. на площадках износа зерен будет формироваться режущий субмикрорельеф, а более прочные алмазные зерна (АС160Т) инструмента-ударника будут оставаться целыми.

Таким образом, сформулировано и доказано положение о существенной роли жесткости металлической связки в эффективности взаимного микроразрушения элементов системы «СТМ–зерно–связка» за счет увеличения силы соударения в контакте «зерно–СТМ», повышения прочности алмазоудержания и вероятности отслеживания анизотропии кристаллитов СТМ (повышение производительности шлифования и сокращения удельного расхода) и эффективности формирования на алмазных зернах режущего субмикрорельефа.



а



б

Рисунок 7.18 – Влияние модуля упругости связки круга и инструмента ударника на напряжения в СТМ (а), критическую величину заделки зерен в связку и удельный расход (б)

7.4. Анализ удельного расхода и износа алмазных зерен

Основной причиной высокой себестоимости процесса алмазного шлифования, наряду с высокой стоимостью алмазных кругов, является чрезвычайно низкий коэффициент использования потенциальных режущих свойств алмазных зерен. Известно, что лишь 5–15 % потенциала режущих свойств алмазных зерен эффективно используются, остальные 95–85 % уходят в шлам, а так как рекуперация шлама, как правило, не проводится, то оказывается, что большая часть объема зерен круга уходит в отходы, не совершив полезной работы.

Установлено, что при алмазном шлифовании СТМ интенсивность разрушения алмазных зерен может во много раз превышать интенсивность разрушения (съема) обрабатываемого СТМ. Так, например, при шлифовании АСПК зернами АС32 удельный расход равен 10 кар/кар. При этом для производительного процесса шлифования СТМ следует искусственно создавать условия, инициирующие микроразрушение алмазных зерен с целью исключения образования на них площадок износа, что успешно реализуется в управляемых процессах шлифования.

Использование кругов на прочных металлических связках снижает удельный расход алмазов, но круги быстро «засаливаются» и требуют периодической правки, в процессе которой не эффективно используется практически столько же алмазных зерен, как и в процессе шлифования.

Разработанные способы шлифования с управлением режущим рельефом кругов позволяют существенно повысить эффективность использования алмазных зерен при шлифовании труднообрабатываемых материалов [10]. Однако, обработка таких уникальных материалов, как природные и синтетические алмазы, сверхтвердые нитриды бора и композиционные материалы на их основе все таки требует значительных затрат алмазных зерен, а, следовательно, процесс, например, алмазной заточки резцов из СТМ оказывается дорогим.

Используя методику 3D моделирования НДС системы «СТМ–зерно–связка» и специально разработанную программу расчета объемов разрушенных и выпавших зерен и объемов разрушенных СТМ, удалось теоретически оценить важнейшие показатели процесса алмазного шлифования СТМ – удельный расход и удельный износ алмазных зерен. В табл. 7.3 приведены результаты расчета объемов разрушенных $V_з$ и выпавших из связки $V_{вып}$ зерен, разрушенного СТМ $V_{СТМ}$ в зависимости от рабочей высоты зерен и критической величины их заделки. Эти данные позволяют оценивать величину удельного расхода и износа алмазных зерен.

Исследование 3D НДС системы «СТМ–зерно–связка» позволяет, определять объем разрушенного СТМ $V_{\text{стм}}$ и зерна $V_{\text{з}}$, а также по величине $h_{\text{кр}}$ определять объем выпавшей из связки части зерна $V_{\text{вып}}$ и величину их заглубления в связку (табл. 7.5–7.6).

Таким образом, разработанная подсистема «Износ» позволяет оценить величины удельного износа (отношение объемов разрушенного зерна и СТМ) $\left(q_{\text{и}} = \dfrac{V_{\text{з}}}{V_{\text{стм}}}\right)$ и удельного расхода $\left(q_{\text{р}} = \dfrac{V_{\text{з}} + V_{\text{вып}}}{V_{\text{стм}}}\right)$ в зависимости от физико-механических свойств СТМ, зерен, их анизотропии, модуля упругости связки, поперечной подачи, скорости шлифования, нормального давления. Результаты расчета величины удельного износа приведены в табл. 7.6.

Таблица 7.5 – Влияние условий нагружения системы поперечной подачей на величину заглубления зерен в связку

$S_{\text{поп}}$, мкм при контакте зерна вершиной	1	2	3	4
Δ , мкм	0,07	0,11	0,81	1,3
$S_{\text{поп}}$, мкм при контакте зерна ребром	1	2	3	4
Δ , мкм	0,012	0,032	0,06	0,19
$S_{\text{поп}}$, мкм при контакте зерна гранью	1	2	3	4
Δ , мкм	0,006	0,011	0,03	0,08

Таблица 7.6 – Влияние условий нагружения на величину удельного износа

Угол при вершине зерна φ°	30˚	60˚	90˚	120˚
Удельный износ $q_{\text{И}}$, кар/кар	1	1,6	2	2,4
Модуль упругости связки E, ГПа	70	120	160	200
Удельный износ $q_{\text{И}}$, кар/кар	3,2	2,3	1,6	1

Управляя параметрами контакта (величиной относительной фактической площади) и динамикой взаимодействия элементов системы «СТМ–зерно–связка» (скорость, подача, нормальное давление, введение в зону энергии ультразвуковых колебаний), можно перераспределять подводимую в зону шлифования энергию между элементами системы.

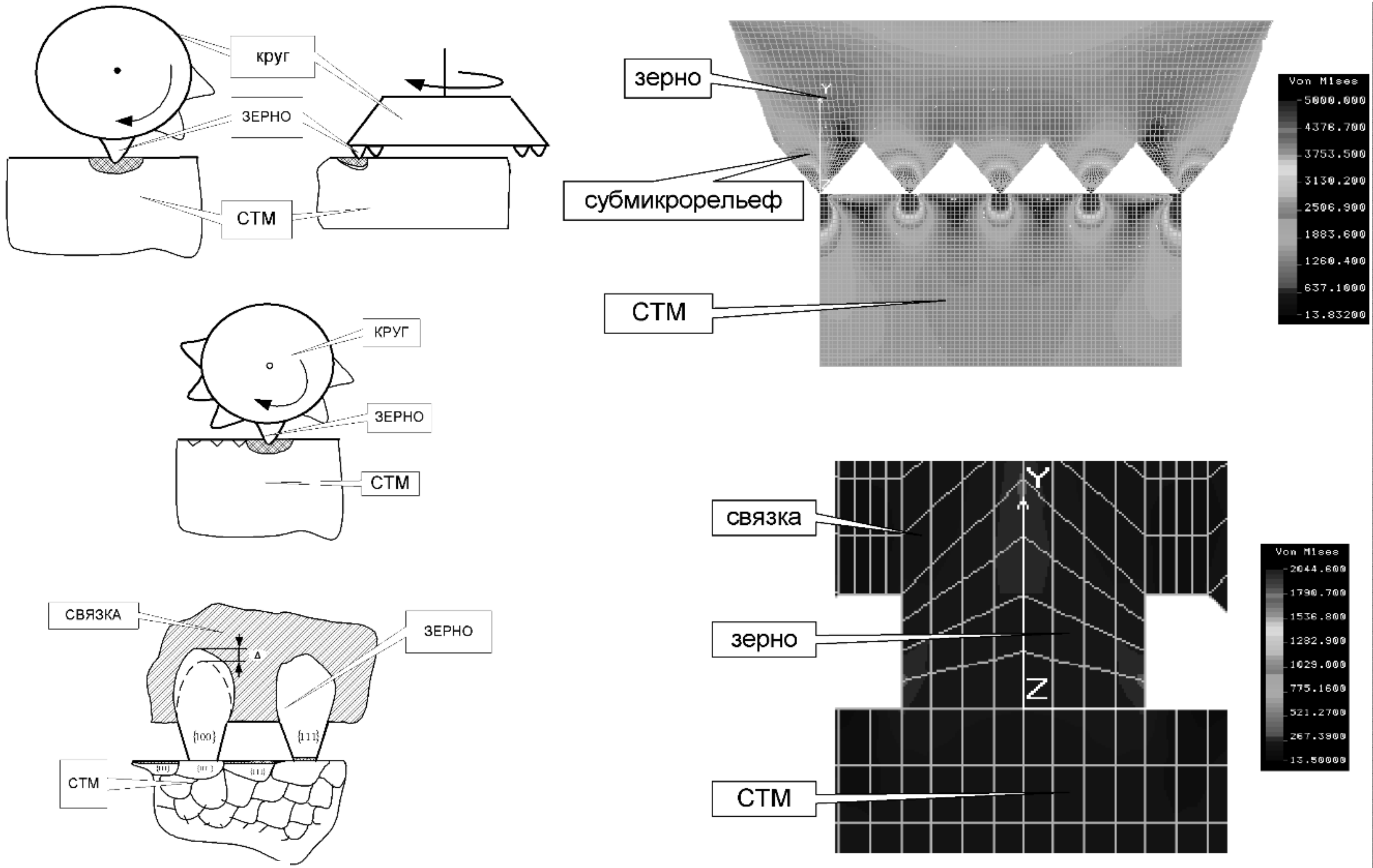
Методика 3D моделирования НДС системы «СТМ–зерно–связка» позволяет определять условия, при которых максимальная часть подводимой энергии в зону шлифования будет направлена на микроразрушение СТМ, минимизируя разрушение алмазных зерен, исключая их выпадение из связки и объемное разрушение СТМ (брак).

Исследование влияния параметров топографии РПК на 3D НДС системы показали, что если алмазное зерно даже незначительно выступает из связки ($h_р \neq 0$), т. е. связка не контактирует с обрабатываемым материалом, в нем возникают напряжения, достаточные для процесса самозатачивания (микроразрушения). Если зерно полностью заделано в связку ($h_р = 0$) за счет объемного «обжатия» связкой и отсутствия свободных границ оно не самозатачивается. В связи с этим производительный процесс шлифования СТМ следует осуществлять только при реализации первого типа взаимодействия в системе «РПК–СТМ», т.е. без контакта связки с обрабатываемым материалом.

Рассмотренная ранее расчетная схема соответствует процессу плоского шлифования торцом алмазного круга (заточка лезвийного инструмента из СТМ) (рис. 7.19 б, г).

При круглом наружном шлифовании (рис. 7.19 а, в) процесс контактирования зерна с СТМ, и расчетная схема и условие нагружения системы «СТМ–зерно–связка» будут существенно отличаться. Поэтому для такого процесса шлифования СТМ будет использована другая расчетная схема, примененная в теоретическом модуле экспертной системы. При круглом шлифовании напряжения в контакте «зерно–СТМ» значительно выше, чем при плоском, т. к. величина фактической площади контакта «РПК–СТМ» значительно меньше (рис. 7.19 д, е) В связи с этим *предпочтительнее для производительного шлифования использовать круглое шлифование, а для прецизионного (доводочного) – плоское торцом круга.*

Таким образом, *теоретические расчеты методом МКЭ позволяют количественно оценить влияние физико-механических свойств алмазных зерен, СТМ и связки, параметров РПК на величину объемов разрушения СТМ и алмазных зерен, а также на объем выпавших из связки зерен. Эти результаты позволяют оценить величину удельного расхода и удельного износа алмазных зерен, т. е. определять коэффициент использования потенциальных режущих свойств алмазных зерен.*



а, б – схемы круглого и плоского шлифования, в – схема круглого шлифования, г – схема плоского шлифования торцем круга; д – НДС в зоне круглого шлифования; е – НДС в зоне плоского шлифования

7.5. Практическое использование методологии 3D моделирования. Обеспечение надежности лезвийного инструмента из СТМ на стадии его изготовления

Широкое применение лезвийного инструмента из СТМ сдерживается относительно невысокой надежностью его эксплуатации. Этот недостаток обусловлен несовершенством процессов синтеза (получения) СТМ: наличием остаточных напряжений, внутренних дефектов, которые проявляются даже после заточки инструмента, то есть в процессе его эксплуатации.

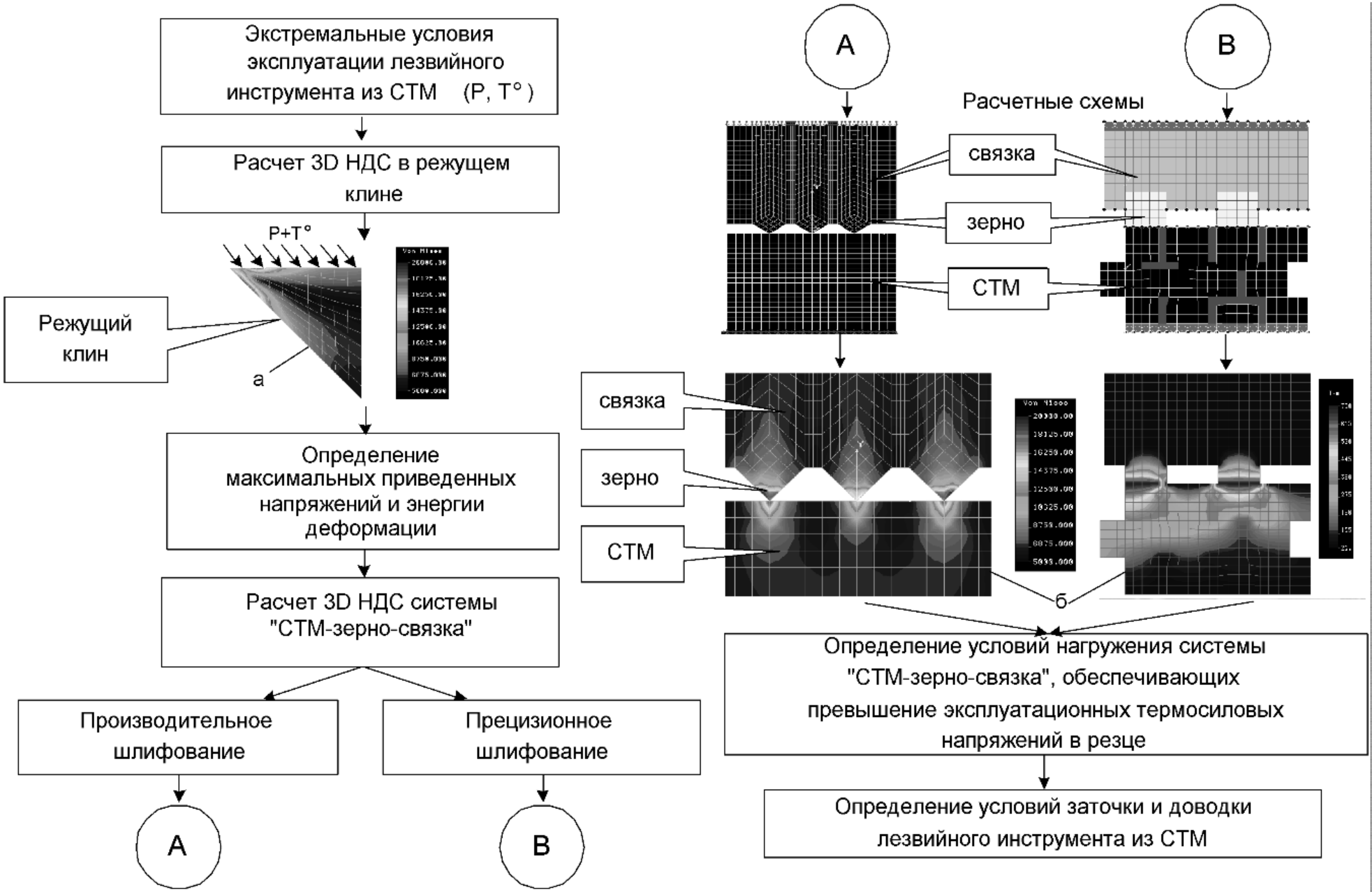
Образование микротрещин на поверхности СТМ может быть обусловлено действием одного или сразу нескольких механизмов термосилового разрушения, обусловленных различием коэффициентов термического расширения алмазных кристаллитов и металлофазы, окислением меж- и внутрикристаллитных включений СТМ. Включения металла-катализатора (растворителя) сохраняются в СТМ и алмазных зернах после синтеза и концентрируются преимущественно в плоскости (111). Существенное различие величин коэффициентов термического расширения алмаза и металлофазы, а также анизотропия теплофизических свойств кристаллитов СТМ и алмазных зерен могут влиять как на процесс микроразрушения (съем припуска), так и на макроразрушение (образование дефектного слоя) при шлифовании. По-видимому, это является одной из причин образования трещин на резцах из СТМ при заточке их кругами на органической связке. Указанный вывод подтверждается еще и тем, что в ювелирных алмазах, которые не содержат включений, и обработка которых сопровождается значительными температурами (до 600–700°С), трещин не образуется. Визуальный контроль после заточки и доводки не гарантирует надежность работы такого инструмента.

По данным Новикова Н. В. и Девина Л. Н. вероятность разрушения резцов из СТМ даже при чистовом точении может достигать 47 %. Авторы обоснованно связывают надежность с предельными напряжениями на передней и задней гранях резца при резании. Используя вероятностные методы расчета, они учитывают влияние только силового фактора на разрушение СТМ, однако не рассматривают влияние температуры в зоне резания. Использование метода конечных элементов в пакете программ для метода конечных элементов позволяет определять напряженно-деформированное состояние исследуемого объекта, вызванное как отдельно силовыми и температурными факторами, так и их суммарным воздействием.

Для повышение надежности лезвийного инструмента из СТМ предложен новый методологический подход, позволяющий надежность такого инструмента определять уже на этапе его заточки и термоактивируемой доводки. При этом процесс заточки и термоактивируемой доводки лезвийного инструмента осуществляется в термосиловых условиях, близких к условиям его эксплуатации, т. е. характеризуется наличием высоких давлений и температур как в зоне шлифования (при его заточке), так и в зоне резания (при эксплуатации инструмента из СТМ). Целесообразно так затачивать и доводить лезвийные инструменты из СТМ, чтобы дефекты, полученные при синтезе, проявлялись до их эксплуатации, т. е. отбраковка производилась бы еще на стадии их изготовления.

Поскольку в процессе эксплуатации лезвийный инструмент часто испытывает более жесткие термосиловые нагрузки, чем в процессе его заточки и доводки, представляется не целесообразным выбор щадящих условий его заточки и доводки. Поступая таким образом, изготовители лезвийного инструмента из СТМ не гарантируют, что такой инструмент в более жестких термосиловых условиях эксплуатации окажется надежным. В связи с этим уже на стадии заточки и доводки лезвийного инструмента необходимо создавать в нем термосиловые нагрузки, эквивалентные или даже несколько превышающие те, которые этот инструмент будет испытывать в экстремальных условиях его эксплуатации.

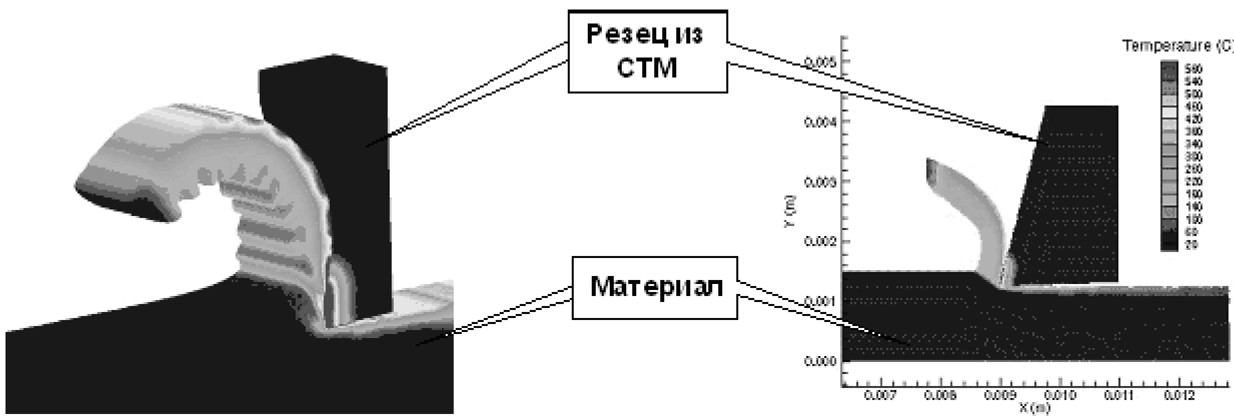
Алгоритм осуществления данного подхода следующий. Вначале с помощью пакета прикладных программ по методам конечных элементов рассчитываются предельные термосиловые напряжения в режущем клине резца в экстремальных условиях его эксплуатации (рис. 7.20 а). Для этого трехмерная модель лезвийного инструмента нагружается силой резания *P* и температурой *T* до величины, несколько превышающей те значения, которые этот инструмент может испытывать в экстремальных условиях его эксплуатации.



а– термосиловые НДС в зоне лезвийной обработки, б – термосиловые НДС в зоне заточки лезвийного инструмента из СТМ

Термосиловые 3D НДС при лезвийной обработке различных материалов можно получить путем моделирования процесса резания в специализированном программном пакете «Third Wave AdvantEdge». При этом достаточно в построенную модель ввести физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материалов, экстремальные режимы резания и можно рассчитать приведенные напряжения, энергию деформации, плотность энергии деформации, главные напряжения и температуру в зоне резания.

Пример расчета температуры в зоне резания меди приведен на рис. 7.21.



а б

Рисунок 7.21 – 3D модель процесса лезвийной обработки (а)
и результаты расчета температуры в зоне резания (б)

Полученные значения термосиловых напряжений являются базовыми для решения обратной задачи – нахождения режимов и условий заточки и термоактивируемой доводки по известному напряженному состоянию резца из СТМ в экстремальных условиях его работы.

Применяемый пакет позволяет решать задачу в трехмерном измерении (3D моделирование), что выгодно отличает данную методику от применявшейся ранее другими авторами. В данном пакете можно оценивать энергию и плотность деформации, по которой, пользуясь теорией Гриффитса, определить возможность образования и развития микротрещин на поверхности и внутри СТМ. В ходе решения обратной задачи пакет позволяет по известному уровню эксплуатационных термосиловых напряжений определить скорость шлифования, поперечную подачу, нормальное давление в контакте для конкретных, физико-механических свойств шлифуемого СТМ, алмазных зерен и связки шлифовального круга (см. рис. 7.20 б).

Полученные в ходе решения обратной задачи значения режимов термоактивируемой доводки и другие условия алмазного шлифования обеспечат наличие в модели затачиваемого СТМ термосиловых напряжений, превышающих эксплуатационные. Таким образом определяются условия доводки, при которых дефекты СТМ вскрываются еще на стадии изготовления инструмента.

Итак, исходной информацией при назначении режимов заточки и доводки лезвийного инструмента из СТМ должны являться силы резания и температуры, которые этот инструмент будет испытывать в экстремальных условиях его эксплуатации. Приложив эти силы и контактные температуры к модели резца (см. рис. 7.20 а), методом конечных элементов определяем величину предельных термосиловых напряжений, которые будет испытывать это резец в процессе работы. Далее, решая обратную задачу, подбирают такие режимы заточки (скорость, подачу и т. д.), которые обеспечат наличие в модели затачиваемого СТМ (см. рис. 7.20 б) термосиловые напряжения, превышающие эксплуатационные. Тем самым определяются условия заточки и доводки, при которых дефекты синтеза СТМ должны проявиться еще на стадии изготовления.

Необходимость и возможность совмещения доводочной и контрольной операций при изготовлении лезвийного инструмента из СТМ согласно изложенным выше принципам позволяют существенно повысить надежность применения такого инструмента.

Таким образом, теоретически и экспериментально доказано положение о необходимости и возможности совмещения термодоводочной и контрольной операций при изготовлении лезвийного инструмента из СТМ путем осуществления термоактивируемой доводки при термосиловых нагрузках, близких к экстремальным условиям его эксплуатации.

Разработанный теоретический модуль экспертной системы процесса алмазного шлифования СТМ базируется на объединении в единую систему разработок по определению фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ», результатов расчета объемов разрушенных СТМ и зерен в зависимости от условий взаимодействия, величины критической заделки зерен в связку, определение условий бездефектной обработки и/или эксплуатационной надежности лезвийного инструмента. Теоретический модуль представляет собой компьютерную программу, состоящую из нескольких подсистем, представляющих законченный программный продукт.

7.6. Вопросы для самостоятельной подготовки

1. В чем заключаются особенности основных статистических механизмов формирования рабочей поверхности алмазно-абразивных инструментов?
2. Охарактеризуйте алмазосодержащий слой и его основные характеристики.
3. Что Вы понимаете под поверхностью связки, и каковы статистические механизмы ее трансформации?
4. Какова причина отличия поперечного и продольного профилей связки шлифовальных кругов?
5. Каков статистический механизм образования закона распределения функции случайной величины?
6. Как производится определение законов распределения неравномерности поперечного или продольного профиля связки?
7. Охарактеризуйте особенности методики определения плотности закона распределения неровностей связки при наличии поперечного и продольного профиля.
8. Дайте характеристику статистическому механизму формирования 3D модели рабочей поверхности.
9. Какова логика формирования распределения вершин зерен на рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента?

10. Обоснуйте композиционную природу формирования закона распределения вершин зерен на рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента.

11. Оцените влияние неравномерности поверхности связки на распределение вершин зерен.

12. Особенности применения методологии 3D моделирования для исследования процесса спекания алмазных кругов на металлических связках.

13. Провести анализ влияния марки связки на 3D напряженно-деформированное состояние в зоне спекания алмазного круга.

14. Провести анализ влияния марки алмазных зерен на величину 3D НДС в зоне спекания алмазного круга.

15. Провести анализ влияния концентрации алмазных зерен на величину 3D НДС в зоне спекания алмазного круга.

16. Провести анализ влияния давления и температуры на величину 3D НДС в зоне спекания алмазного круга.

17. Провести анализ влияния модуля упругости связки на величину 3D НДС в зоне спекания алмазного круга.

18. Провести анализ влияния модуля упругости на производительность шлифования.

19. Провести анализ влияния модуля упругости связки на величину удельного расхода и износа алмазных зерен.

20. Суть новой методологии заточки лезвийного инструмента из СТМ для обеспечения его надежности.

21. Провести модельные расчеты режимов заточки лезвийного инструмента из различных марок СТМ для обработки различных материалов.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

СТРУКТУРА ОСНОВНЫХ БАЗ ДАННЫХ, ВХОДЯЩИХ В СИСТЕМУ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Приведен перечень и структура основных баз данных (БД), входящих в систему 3D моделирования алмазно-абразивных инструментов. Эти БД можно разделить на две группы: системные и создаваемые для каждого варианта 3D модели.

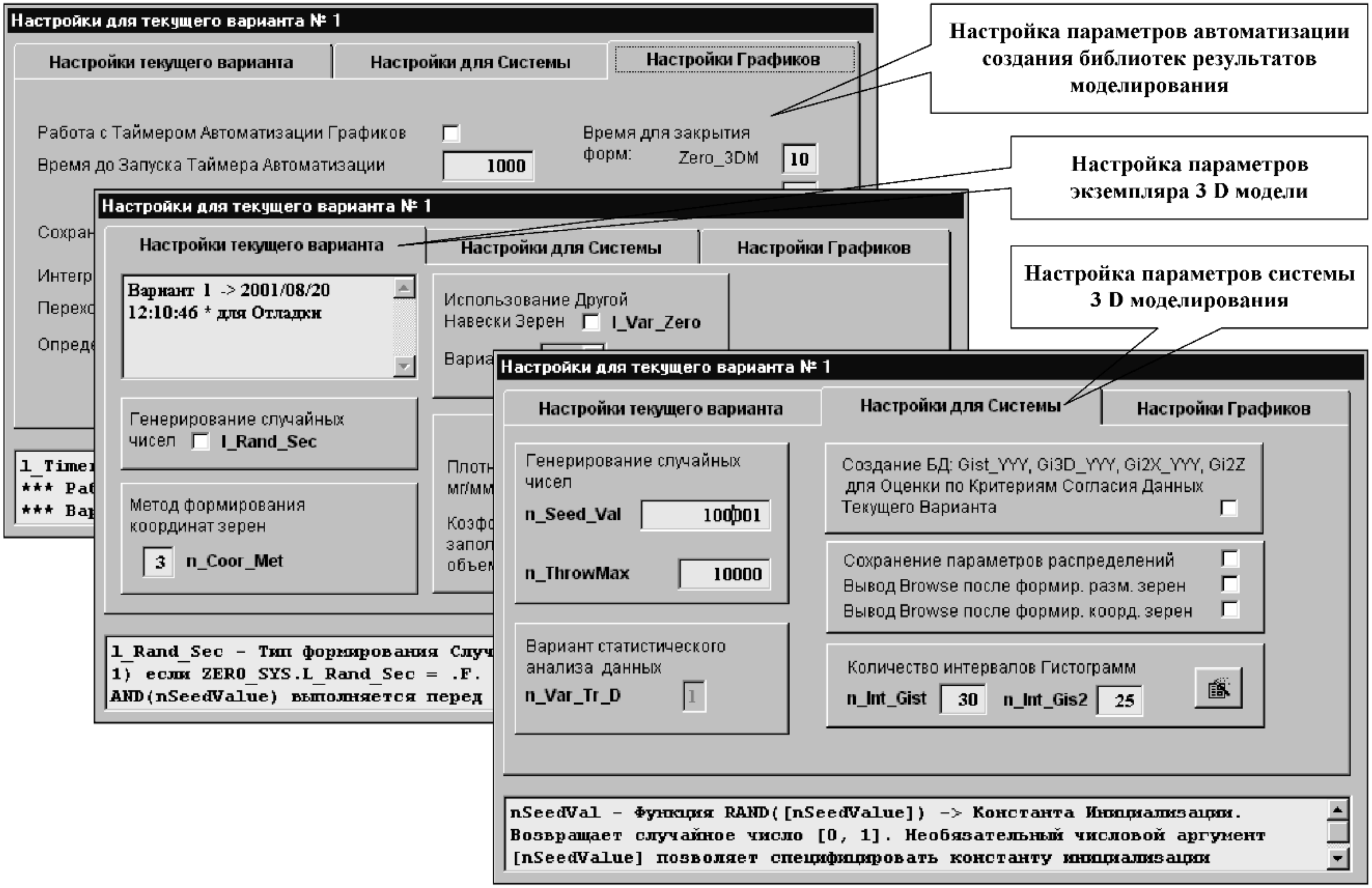
А.1. Системные БД, входящие в систему 3D моделирования

Настройка параметров 3D моделирования производится редактированием системных БД. Их редактирование (или обновление данных) осуществляется несколькими способами: в страничных блоках формы установки параметров системы (рис. А.1), в страничных блоках формы редактирования системных БД (рис. А.2, А.3) или в процессе работы в формах соответствующих определенным этапам моделирования.

А.1.1. STAT_SYS БД общих параметров для системы 3D моделирования. В А.3 приведен перечень полей соответствующих основным параметрам системы.

А.1.2. ZERO_SYS БД параметров текущего варианта (экземпляра) 3D модели. В А.4 приведен перечень полей соответствующих основным параметрам каждого экземпляра модели.

А.1.3. БД настраиваемых меню задания параметров:
TIP_KRUG – формы алмазосодержащего слоя;
TIP_RANG – диапазоны зернистостей абразивного порошка;
TIP_SIZE – зернистости и зерновой состав порошка;
TIP_ZERO – формы зерен;
ZAK_ZERO – законы распределения размеров зерен.



алмазно-аоразивных инструментов

Рисунок А.2 – Страничный блок редактирования БД STAT_SYS –
общих параметров для системы 3D моделирования
(форма редактирования системных БД)

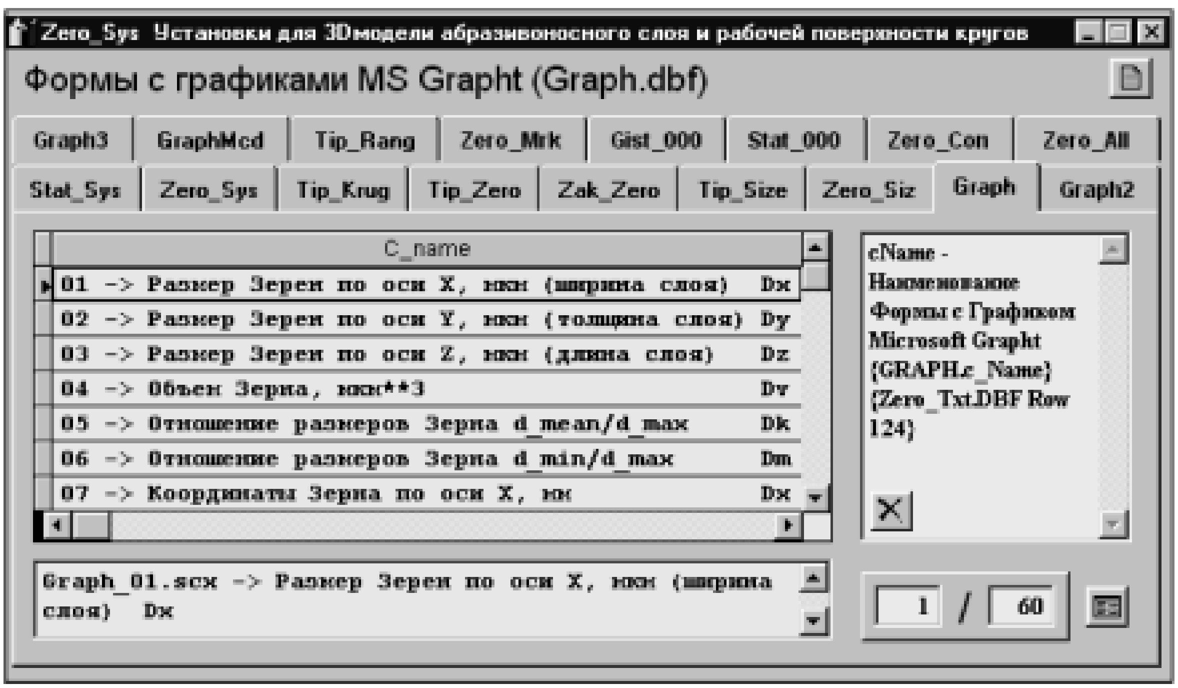


Рисунок А.3 – Страничный блок редактирования БД GRAPH – параметры
визуализации и базовые имиджи для графиков MS GRAPH
(форма редактирования системных БД)

А.1.4. БД визуализации результатов моделирования:

GRAPH – параметры визуализации и базовые имиджи для графиков MS GRAPH (формы Graph_NN.scx);

GRAPH2, GRAPH3 – коллекции результатов моделирования (для каждого графика, исследуемого признака и варианта модели);

GRAPHMCD – параметры визуализации и базовые имиджи для графиков MathCad (формы GrMcd).

А.1.5. БД параметров и характеристик абразивных порошков

ZERO_ALL – параметры шлифпорошков и микропорошков;

ZERO_MRK – марки шлифпорошков и микропорошков, области их применения по ГОСТ;

ZERO_SIZ, ZERO_SI2 – характеристики алмазных шлифпорошков и микропорошков.

А.1.6. БД для статистического анализа исследуемых признаков 3D моделей алмазосодержащего слоя и рабочей поверхности:

CORR_FUN – параметры функций уравнений регрессии (функциональный корреляционный и регрессионный анализ)

CORR_CFC – критические коэффициенты корреляции (корреляционный анализ);

CORR_SYS – установки для системы функционального корреляционного и регрессионного анализа;

STAT_DIS – параметры используемых законов распределений;

STAT_COL, STAT_HI2, STAT_OM2 – критерии согласия Колмогорова, χ^2, ω^2.

А.2. Базы данных создаваемые для каждого варианта 3D модели

Каждый экземпляр 3D модели определяется комплектом баз данных, где NNN – номер варианта:

ZERO_NNN – алмазосодержащий слой (размеры и координаты центров каждого зерна);

CONT_NNN – результаты имитационного контроля зернового состава навески;

STAT_NNN, GIST_NNN – статистические характеристики и данные гистограмм исследуемых элементов алмазосодержащего слоя;

Z3DM_NNN – рабочая поверхность (размеры зерен и величина износа вершин, координаты поверхности связки и центров зерен принадлежащих поверхности связки для заданного участка рабочей поверхности);

ST3D_NNN, GI3D_NNN – статистические характеристики и данные гистограмм исследуемых элементов рабочей поверхности;

Z3DG_NNN – координаты 3D рабочей поверхности (с учетом износа зерен и микрорельефа связки и зерен);

Z3DG_NNN.PRN – матрица координат поверхности для 3D визуализации в среде MathCad;

Z2XM_NNN, Z2ZM_NNN – поперечный и продольный профиль (размеры зерен, координаты поверхности связки и центров зерен принадлежащих поверхности связки для заданного сечения участка рабочей поверхности);

Z2XG_NNN, Z2ZG_NNN – координаты поперечного и продольного профилей рабочей поверхности.

А.3. Структура (перечень основных полей) БД общих параметров для системы 3D моделирования STAT_SYS

c_Order_01 – запоминание индексного тега для характеристик абразивных порошков;

c_SizeZero – зернистость (обозначение по ГОСТ);

l_Brow_1 – флаг вывода окна Browse после формирования навески зерен;

l_Brow_2 – флаг вывода окна Browse после формирования координат навески зерен;

l_DistrCum – флаг интегральной функция распределения в режиме автоматизации создания коллекций графиков;

l_Grapg2Sv – флаг сохранения имиджа графика в c_Graph2 в режиме автоматизации создания коллекций графиков;

l_Memu_Bar – определение параметров распределений при автоматическом выводе графиков;

L_SAVE_1 – вспомогательный флаг определяющий необходимость записи параметров распределения при установке из формы Zero_Dis;

L_SAVE_2 – флаг определяющий необходимость сохранения параметров распределения в БД Zero_Siz (при установке из формы Zero_Dis);

l_SizeHarZ – переход к характеристическим размерам в режиме автоматизации создания коллекций графиков;

l_Stat_3DM – флаг обновления буферов ST3D_000, GI3D_000;

n_Gi3D_000 – запоминание номера варианта данных в буфере;

n_Gist_000 – запоминание номера варианта данных в буфере;

n_Intg_Cor – коэффициент перевода размеров координат зерен (мм) в поле Integer (целочисленное);

n_Intg_Zer – коэффициент перевода размеров зерен (мкм) в поле Integer (целочисленное);

n_Int_Gis2 – количество интервалов гистограмм при статистическом анализе выборочных данных для 3D модели рабочей поверхности;

n_Int_Gist – количество интервалов гистограмм при статистическом анализе выборочных данных для 3D модели алмазосодержащего слоя;

n_Seed_Val – константа инициализации функции RAND([nSeedValue]);

n_SizeHarZ – характеристический размер зерна;

n_St3D_000 – запоминание номера варианта данных в буфере;

n_Stat_000 – запоминание номера варианта данных в буфере;

n_Stat_3DM – время для закрытия формы Stat_3DM при автоматизации, сек.;

n_Stat_XYZ – время для закрытия формы Stat_XYZ при автоматизации, сек.;

n_ThRowMax – максимальное число повторных генераций координат для одного зерна при формировании координат зерен методом Монте-Карло. При достижении установленного значения, процесс генерации будет прерван;

n_Timer_Gr – время до запуска таймера автоматизации, мкс в режиме автоматизации создания коллекций графиков;

n_Var – номер текущего варианта (экземпляра модели);

n_Zero_3DM – время для закрытия формы Zero_3DM при автоматизации, сек.

А.4. Структура (перечень основных полей) БД параметров текущего варианта 3D модели абразивного слоя и рабочей поверхности ZERO_SYS

Base_Log_X, Base_Log_Y, Base_Log_Z – основание логарифма распределения диаметра зерен по осям X, Y, Z (трехосный эллипсоид);

B_mm – ширина алмазосодержащего слоя, мм;

c_Prof_XZ – состояние настройки поверхности связки 3D модели;

c_SizeZero – зернистость (обозначение по ГОСТ);

c_Yc_X, c_Yc_Z – функции Пользователя для задания неравномерности поперечного и продольного профилей поверхности связки функциями Yc = f(x), Yc = f(z);

Dx_mkm, Dy_mkm, Dz_mkm – математические ожидания диаметров зерен по осям X, Y, Z, мкм (трехосный эллипсоид);

F_Grd – угол сегмента, в градусах;

F_Rad – угол сегмента, в радианах;

K_Abr – концентрация зерен в абразивоносном слое 1...8 (25...200 %);

l_Bxyz – флаг установки одинаковых значений основания логарифма распределения диаметров зерен по осям: X, Y, Z;

l_Dxyz – флаг установки одинаковых значений математических ожиданий диаметров зерен по осям: X, Y, Z;

L_mm – длина алмазосодержащего слоя, мм (параллелепипед);

l_Prof_X – переключатель учета поперечного профиля связки в 3D модели рабочей поверхности круга;

l_Prof_X_C – переключатель задания неравномерности поперечного профиля связки линейной функцией поднутрения:

YcX = YAnglBond (nAngle, nCone, nX),

где nAngle – угол поднутрения связки (9...–9 град); nCone – длина поднутрения (или заборного конуса); nX – координата по оси X;

l_Prof_X_F – переключатель задания неравномерности поперечного профиля связки функцией YcX = f(x);

l_Prof_Z – переключатель учета продольного профиля связки в 3D модели рабочей поверхности круга;

l_Prof_Z_C – переключатель задания неравномерности продольного профиля связки гармонической функцией волнистости:

YcZ = YWaveBond(nZWaveH, nZWaveL, nZWaveF, nZ),

где nZWaveH – высота волнистости, мкм; nZWaveL – шаг волнистости, мм; nZWaveF – сдвиг фазы волнистости, %; nZ – координата по оси Z;

l_Prof_Z_F – переключатель задания неравномерности продольного профиля связки функцией YcZ = f(z);

l_Rand_Sec – тип формирования случайных чисел функцией RAND(nSeedValue):

1) если

ZERO_SYS.L_Rand_Sec = .F.⇒ nSeedValue = STAT_SYS.n_Seed_Val

и RAND(nSeedValue) выполняется перед началом формирования последовательности значений;

2) если

ZERO_SYS.L_Rand_Sec = .T. ⇒ nSeedValue = 1000* SECONDS()

и RAND(nSeedValue) выполняется для каждого значения или группы значений (используется при формировании координат);

l_SL_2D – флаг установки направление секущей плоскости 2D модели по оси X или Z;

l_Sxyz – флаг установки одинаковых значений среднеквадратического отклонения диаметров зерен по осям: X, Y, Z;

l_Var_Zero – флаг определяющий возможность использования в данном варианте 3D модели рабочей поверхности навески зерен из другого варианта модели;

n_B_2D – координата секущей плоскости 2D модели по оси X, мм (продольный профиль рабочей поверхности);

n_B_2D_DnV, n_B_2D_UpV – начало и конец интервала визуализации 2D модели по оси X, мм (ширина слоя);

n_B_2D_Vis – число интервалов дискретизации при визуализации 2D модели по оси X (10...500);

n_B_3D_Dn, n_B_3D_Up – начало и конец интервала 3D модели по оси X;

n_B_3D_DnV, n_B_3D_UpV – начало и конец интервала визуализации 3D модели по оси X;

n_B_3D_Vis – число интервалов дискретизации при визуализации 3D модели по оси X (10...100);

n_Coef_Zer – коэффициент относительной критической заделки зерен в связке (отношение величины заделки к размеру зерна, при котором зерно удерживается в связке). Диапазон значений: 0 ... 1,0. Коэффициент относительной критической заделки используется при создании БД 3D модели при определении соответствия зерна "З" или "Л";

n_Coor_Met – номер варианта (1, 2, 3, 4) формирования координат центров зерен навески методом Монте-Карло;

n_Fret_nC1, n_Fret_nC2, n_Fret_nC3, n_Fret_nC4 – коэффициенты C1, C2, C3, C4 для вида износа вершин зерен – затылки на вершине зерен;

n_Fret_nD – номер вида износа вершин зерен: 0 – площадки износа; 1 – трехосный эллипсоид; 2 – затылки на вершине зерен;

n_H_L_Max – максимальная глубина лунок (размер наибольшей лунки);

n_H_Z_Max – максимальная высота зерен (высота зерна наиболее выступающего из связки);

n_L_2D – координата секущей плоскости 2D модели по оси Z, мм (поперечный профиль рабочей поверхности);

n_L_2D_DnV, n_L_2D_UpV – начало и конец интервала визуализации 2D модели по оси Z, мм (длина слоя);

n_L_2D_Vis – число интервалов дискретизации при визуализации 2D модели по оси Z (10...500);

n_L_3D_Dn, n_L_3D_Up – начало и конец интервала 3D модели по оси Z;

n_L_3D_DnV, n_L_3D_UpV – начало и конец интервала визуализации 3D модели по оси Z;

n_L_3D_Vis – число интервалов дискретизации при визуализации 3D модели по оси Z (10...300);

n_Max_Boun – максимальная неравномерность поверхности связки;

n_Max_Wair – максимальная величина износа;

n_Mic_B_cM – коэффициент расположения математического ожидания относительно характеристического размера для равномерного распределения микрорельефа связки (0–100 %);

n_Mic_B_cV – коэффициент вариации нормального распределения микрорельефа связки (0–100 %);

n_Mic_B_nD – номер закона распределения микрорельефа связки (0, 1, 2);

n_Mic_Z_cM – коэффициент расположения математического ожидания относительно характеристического размера для распределения микрорельефа связки (0–100 %);

n_Mic_Z_cV – коэффициент вариации нормального распределения микрорельефа зерен (0–100 %);

n_Mic_Z_nD – номер закона распределения микрорельефа зерен (0, 1, 2);

n_Rang_Tip – номер позиции для меню типа порошка: 1 – шлифпорошки широкого диапазона зернистостей; 2 – шлифпорошки узкого диапазона зернистостей; 3 – микропорошки;

n_Rel_Z – максимальная высота рельефа рабочей поверхности (области зерен, с учетом только зерен, без учета связки и износа);

n_Rel_ZB – максимальная высота рельефа рабочей поверхности (области зерен, с учетом только зерен и связки, без учета износа);

n_Rel_ZBW – максимальная высота рельефа рабочей поверхности (области зерен, с учетом зерен, связки и износа);

n_Rel_ZW – максимальная высота рельефа рабочей поверхности (области зерен, с учетом только зерен и износа, без учета связки);

n_SizeHarZ – характеристический размер;

n_S_3D – координата поверхности связки 3D модели по оси Y;

n_Var_Zero – номер навески зерен из другого варианта модели используемый в данном варианте 3D модели рабочей поверхности;

n_Wair_3DM – номер позиции меню износа зерен;

n_Wair_p1, n_Wair_p2, n_Wair_p3 – параметры закона износа зерен;

n_X_Angle – угол поднутрения связки 9...–9, град (если угол > 0 – поднутрение, если угол < 0 – заборный конус;

n_X_Cone – длина поднутрения (или заборного конуса) поперечного профиля поверхности связки, мм. Диапазон размеров: 0 ... ширина рабочей поверхности, мм;

n_Zero_All – количество зерен в алмазосодержащем слое (предварительное);

n_Zero_Car – заданный вес навески, карат (меню типа круга – 9);

n_Zero_Den – плотность материала абразивных зерен, мг/мм^3 (для алмаза и кубического нитрида бора – 3.53);

n_Zero_Fil – коэффициент заполнения объема модели абразивных зерен;

n_Zero_mGr – заданный вес навески, мг (меню типа круга – 10);

n_Zero_mm3 – заданный объем навески, мм^3 (меню типа круга – 11);

n_Zero_Mod – количество зерен в навеске (модель);

n_Zero_Num – заданное количество зерен в навеске, штук (меню типа круга – 8);

n_Z_Wave_F – сдвиг фазы волнистости связки 0 ... 100 %;

n_Z_Wave_H – высоты волнистости связки 0 ... 9999, мкм;

n_Z_Wave_L – шаг волнистости связки 0 ... 9999, мм;

Sx_mkm, Sy_mkm, Sz_mkm – среднеквадратическое отклонение диаметров зерен по осям X, Y, Z, мкм (трехосный эллипсоид);

S_mm – толщина алмазосодержащего слоя, мм;

Tip_Krug – номер формы алмазосодержащего слоя;

Tip_Range – номер типа диапазона зернистости абразивного порошка;

Tip_Zero – номер типа формы зерен;

Variant – примечание к варианту экземпляра 3D модели алмазосодержащего слоя и рабочей поверхности;

V_Krug – объем алмазосодержащего слоя (номинальный);

V_Zero_1 – математическое ожидание объема единичного зерна;

V_Zero_All – объем зерен в алмазосодержащем слое (предварительный);

V_Zero_Mod – объем зерен в алмазосодержащем слое (модель). Значение определяется в процессе формирования навески зерен;

Zak_Zero – номер закона распределения размеров зерен.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭКРАННЫЕ ФОРМЫ СИСТЕМЫ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ И ПРИМЕРЫ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Представлены экранные формы системы 3D моделирования алмазно-абразивного инструмента, выполненной на уровне готового программного продукта. Приведенные формы дополняют содержание главы 3.

Б.1. Статистический анализ элементов рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента

Определение выборочных статистик сформированной 3D модели рабочей поверхности производится для исследуемых признаков, представленных на рис. Б.1. В качестве исследуемых признаков выбраны следующие элементы 3D модели рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента (в скобках указан символьный идентификатор исследуемого признака):

1 (Dx) – высота выступания вершин зерен над уровнем связки (с учетом износа);

2 (Dy) – расстояние до вершин зерен (с учетом износа) по глубине рабочей поверхности (от уровня наиболее выступающего зерна);

3 (Dz) – неравномерность поверхности связки (с учетом поперечного и продольного профилей);

4 (Dv) – расстояние до центров зерен по глубине рабочей поверхности (от уровня наиболее выступающего зерна);

5 (Dk) – расстояние до центров зерен относительно уровня связки;

6 (Dm) – радиус зерен по глубине рабочей поверхности;

7 (Cx) – неравномерность поверхности связки Yx (поперечный профиль);

8 (Cy) – неравномерность поверхности связки Yz (продольный профиль);

9 (Cz) – износ вершин зерен;

10 (Ix) – расстояние до вершин зерен (без учета износа) по глубине рабочей поверхности (от уровня наиболее выступающего зерна);

11 (Iy) – расстояние до вершин зерен (без учета неравномерности поверхности связки и износа) по глубине рабочей поверхности (от уровня наиболее выступающего зерна);

12 (Rm) – Радиус зерен по глубине рабочей поверхности с отрицательным знаком для компонирования;

13 (Zx) – резерв.

Формы с результатами статистического анализа исследуемых признаков приведены на рис. Б.2.

Экранные формы с результатами корреляционного анализа представлены на рис. Б.3. Коэффициенты регрессии определяются для всех сочетаний исследуемых признаков. К ним относятся 12 характеристик элементов рабочей поверхности алмазно–абразивного инструмента (см. рис. Б.1).

Б.2. Моделирование износа вершин зерен, микрорельеф поверхности связки и зерен

На рис. Б.4 представлены экранные формы задания параметров износа вершин зерен, микрорельефа поверхности связки и зерен. Система 3D моделирования обеспечивает:

– формирование износа зерен по заданному закону изнашивания вершин зерен;

– задание вида износа вершин зерен;

– задание параметров микрорельефа поверхности зерен и (или) связки.

На рис. Б.5, Б.6 представлены фрагменты 3D модели рабочей поверхности с износом вершин зерен и микрорельефом связки и зерен (см. рис. Б.6). Фрагмент 3D модели для поверхности связки имеющей поперечный и продольный профили представлен на рис. Б.7.

Б.3. Формы для комплексного анализа результатов 3D моделирования

Для комплексного анализа 3D моделей алмазосодержащего слоя и рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента разработан комплект экранных форм. Запуск форм комплексного анализа производится из меню рис. Б.8. Эти формы условно разделены на четыре группы (см. рис. Б.8):

– алмазосодержащий слой (Graph_a1 – Graph_a3);

– рабочая поверхность (Graph_b1 – Graph_b7);

– схемы формирования статистических характеристик рабочей поверхности (Graph_d1 – Graph_d5);

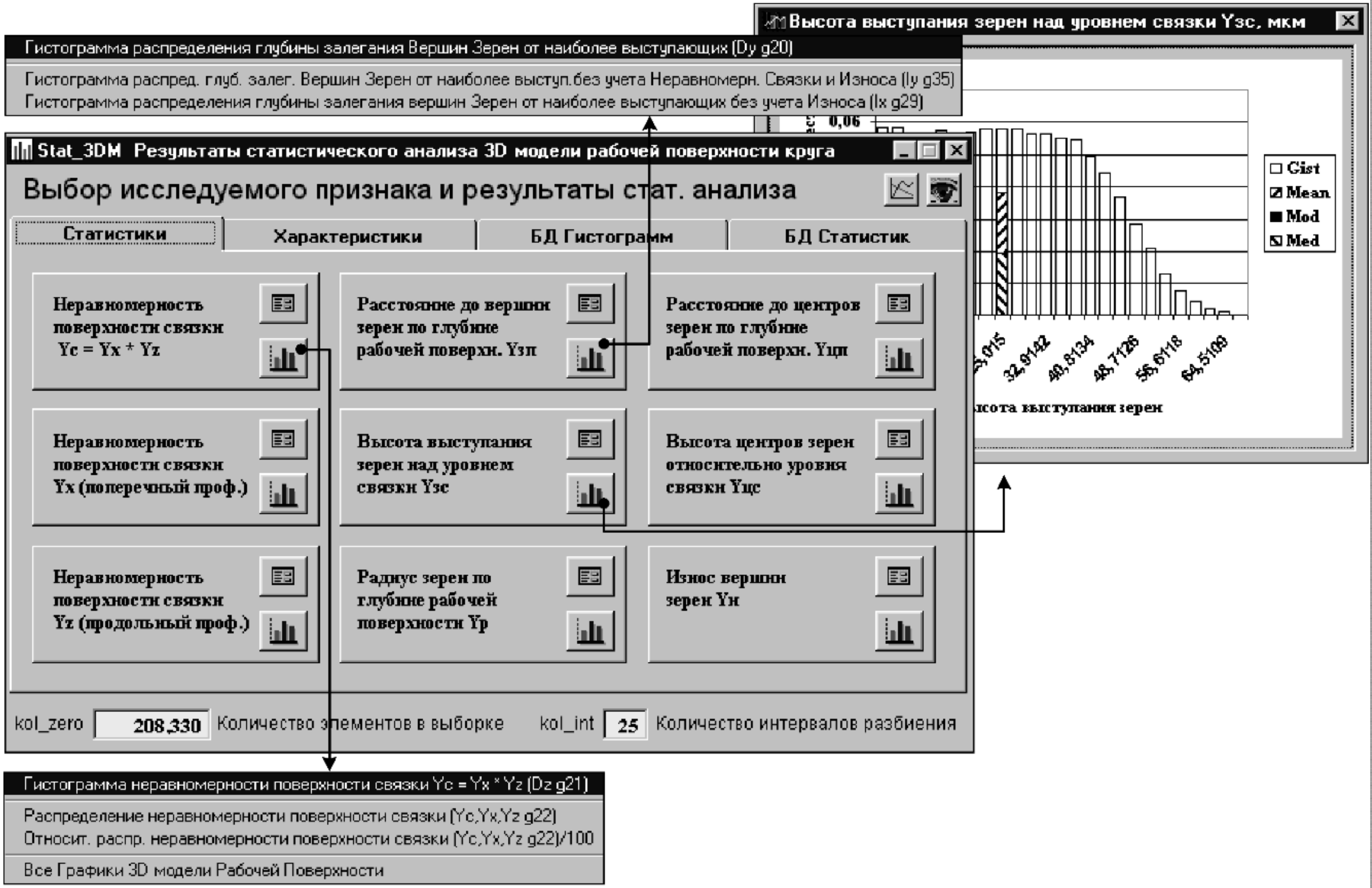
– варианты распределений исследуемых признаков (Graph_v1 – Graph_v5).

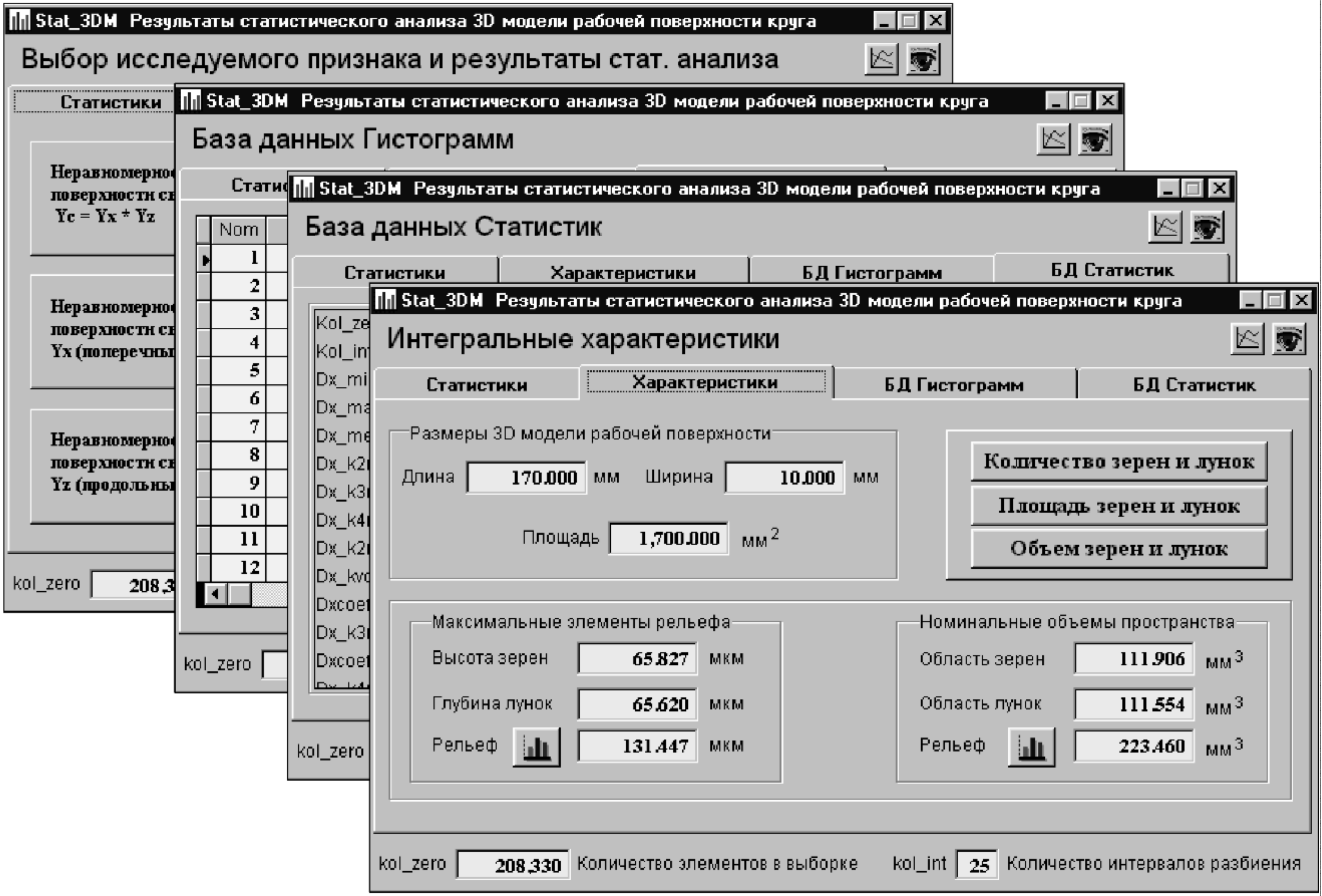
Первые две группы (Graph_a1 – Graph_a3, Graph_b1 – Graph_b7) объединяют в одной форме заданные исследуемые признаки для одного варианта (экземпляра) 3D модели. Примеры комплексных форм приведены на рис. Б.9 – Б.13. На поверхности форм расположены кнопки для запуска исходных форм визуализации исследуемых признаков, справок по параметрам распределений, перехода на заданные варианты и пр.

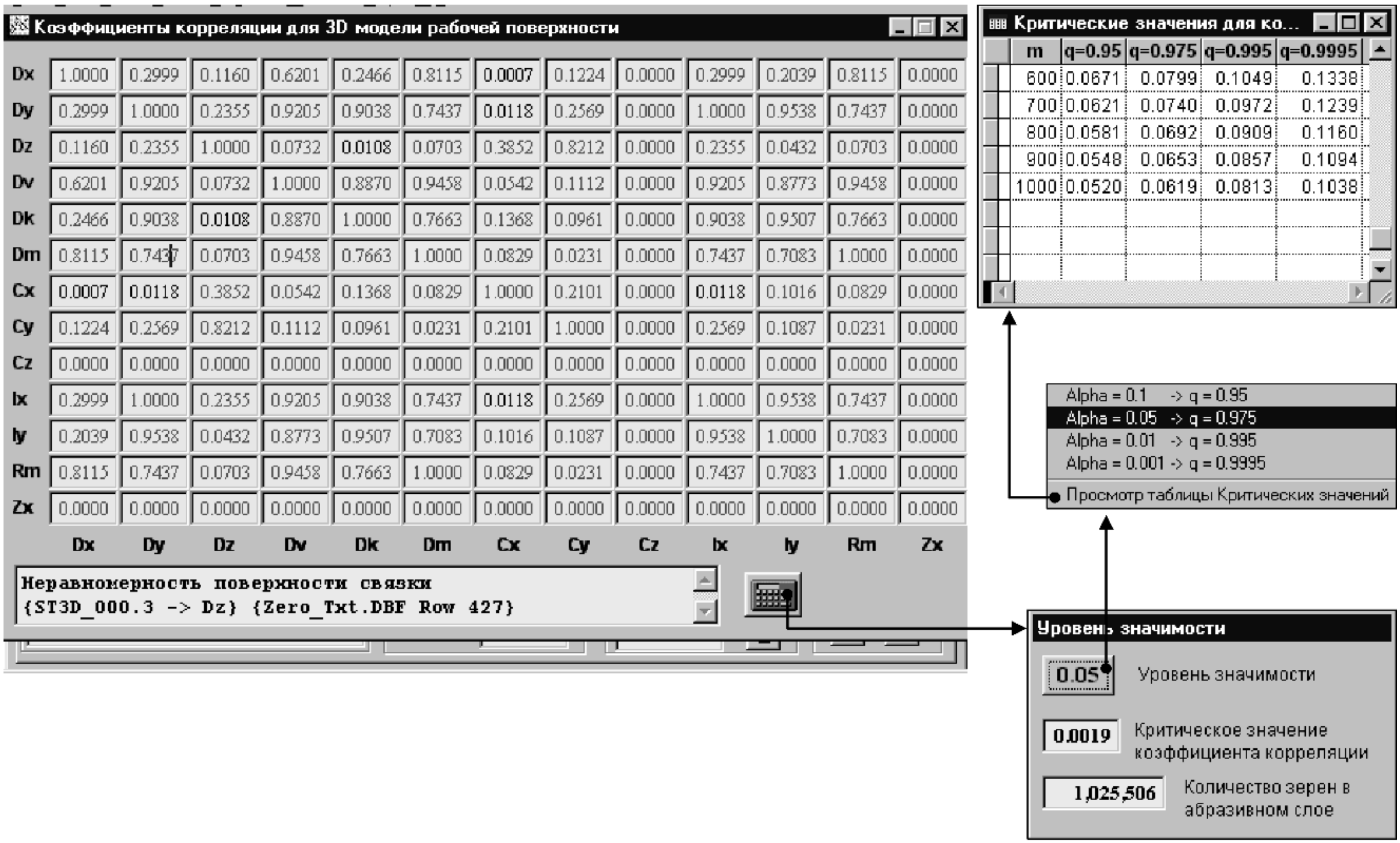
Для схем формирования статистических характеристик и вариантов распределений исследуемых признаков (Graph_b1 – Graph_b7, Graph_v1 – Graph_v5) создан новый класс "интеллектуальных" форм с гистограммами. Интеллектуальные формы обеспечивают автомасштабирование размеров гистограмм в соответствии со значениями интервалов исследуемых признаков относительно характеристического размера, привязку гистограмм к задаваемым реперным объектам (линии определяющей уровень связки или наиболее выступающих зерен, элемента другой гистограммы и др.). Примеры использования «интеллектуальных» комплексных форм приведены на рис. Б.14 – Б.20.

Б.4. Описание системы 3D моделирования алмазно-абразивных инструментов

Описание системы 3D моделирования выполнено в стиле Web. Вызов описания производится из главного меню системы (рис. Б.21). Описание системы моделирования ориентировано на специалистов предметной области абразивной обработки.

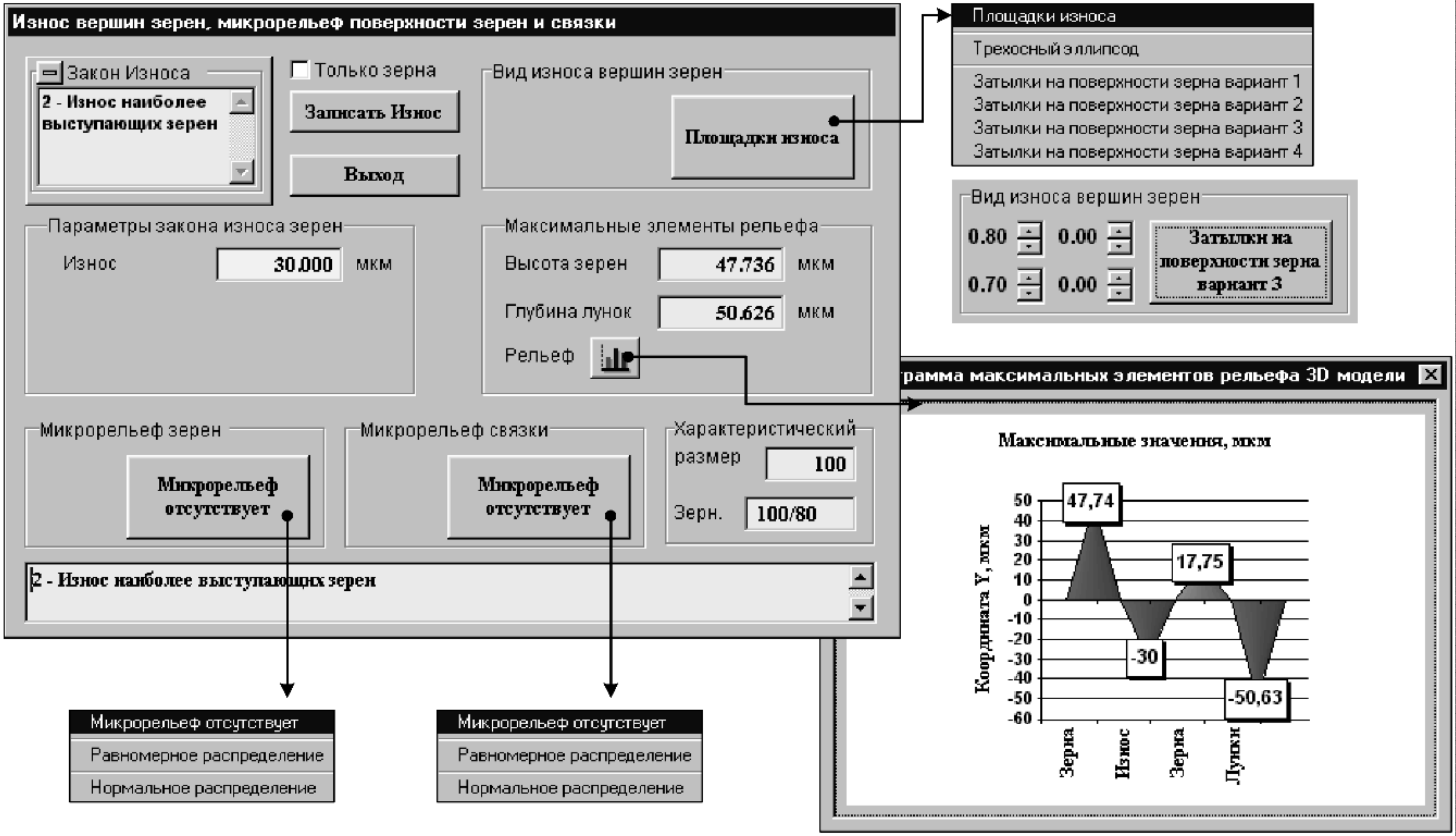

Высота выступания зерен над уровнем связки Yзс, мкм
Гистограмма распределения глубины залегания Вершин Зерен от наиболее выступающих (Dy g20)
Гистограмма распред. глуб. залег. Вершин Зерен от наиболее выступ.без учета Неравномерн. Связки и Износа (Iy g35)
Гистограмма распределения глубины залегания вершин Зерен от наиболее выступающих без учета Износа (Ix g29)
Stat_3DM Результаты статистического анализа 3D модели рабочей поверхности круга
Выбор исследуемого признака и результаты стат. анализа
Статистики
Характеристики
БД Гистограмм
БД Статистик
Неравномерность поверхности связки Yc = Yx * Yz
Расстояние до вершин зерен по глубине рабочей поверхн. Yзп
Расстояние до центров зерен по глубине рабочей поверхн. Yцп
Неравномерность поверхности связки Yx (поперечный проф.)
Высота выступания зерен над уровнем связки Yзс
Высота центров зерен относительно уровня связки Yцс
Неравномерность поверхности связки Yz (продольный проф.)
Радиус зерен по глубине рабочей поверхности Yр
Износ вершин зерен Yи
Gist
Mean
Mod
Med
0,06
32,9142
40,8134
48,7126
56,6118
64,5109
высота выступания зерен
kol_zero 208 330 Количество элементов в выборке
kol_int 25 Количество интервалов разбиения
Гистограмма неравномерности поверхности связки Yc = Yx * Yz (Dz g21)
Распределение неравномерности поверхности связки (Yc,Yx,Yz g22)
Относит. распр. неравномерности поверхности связки (Yc,Yx,Yz g22)/100
Все Графики 3D модели Рабочей Поверхности


Stat_3DM Результаты статистического анализа 3D модели рабочей поверхности круга
Выбор исследуемого признака и результаты стат. анализа
База данных Гистограмм
База данных Статистик
Интегральные характеристики
Статистики
Характеристики
БД Гистограмм
БД Статистик
Размеры 3D модели рабочей поверхности
Длина 170.000 мм
Ширина 10.000 мм
Площадь 1,700.000 мм 2
Количество зерен и лунок
Площадь зерен и лунок
Объем зерен и лунок
Максимальные элементы рельефа
Высота зерен 65.827 мкм
Глубина лунок 65.620 мкм
Рельеф 131.447 мкм
Номинальные объемы пространства
Область зерен 111.906 мм 3
Область лунок 111.554 мм 3
Рельеф 223.460 мм 3
kol_zero 208.330 Количество элементов в выборке
kol_int 25 Количество интервалов разбиения



	Dx	Dy	Dz	Dv	Dk	Dm	Cx	Cy	Cz	Ix	Iy	Rm	Zx
Dx	1.0000	0.2999	0.1160	0.6201	0.2466	0.8115	0.0007	0.1224	0.0000	0.2999	0.2039	0.8115	0.0000
Dy	0.2999	1.0000	0.2355	0.9205	0.9038	0.7437	0.0118	0.2569	0.0000	1.0000	0.9538	0.7437	0.0000
Dz	0.1160	0.2355	1.0000	0.0732	0.0108	0.0703	0.3852	0.8212	0.0000	0.2355	0.0432	0.0703	0.0000
Dv	0.6201	0.9205	0.0732	1.0000	0.8870	0.9458	0.0542	0.1112	0.0000	0.9205	0.8773	0.9458	0.0000
Dk	0.2466	0.9038	0.0108	0.8870	1.0000	0.7663	0.1368	0.0961	0.0000	0.9038	0.9507	0.7663	0.0000
Dm	0.8115	0.7437	0.0703	0.9458	0.7663	1.0000	0.0829	0.0231	0.0000	0.7437	0.7083	1.0000	0.0000
Cx	0.0007	0.0118	0.3852	0.0542	0.1368	0.0829	1.0000	0.2101	0.0000	0.0118	0.1016	0.0829	0.0000
Cy	0.1224	0.2569	0.8212	0.1112	0.0961	0.0231	0.2101	1.0000	0.0000	0.2569	0.1087	0.0231	0.0000
Cz	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ix	0.2999	1.0000	0.2355	0.9205	0.9038	0.7437	0.0118	0.2569	0.0000	1.0000	0.9538	0.7437	0.0000
Iy	0.2039	0.9538	0.0432	0.8773	0.9507	0.7083	0.1016	0.1087	0.0000	0.9538	1.0000	0.7083	0.0000
Rm	0.8115	0.7437	0.0703	0.9458	0.7663	1.0000	0.0829	0.0231	0.0000	0.7437	0.7083	1.0000	0.0000
Zx	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

m	q=0.95	q=0.975	q=0.995	q=0.9995
600	0.0671	0.0799	0.1049	0.1338
700	0.0621	0.0740	0.0972	0.1239
800	0.0581	0.0692	0.0909	0.1160
900	0.0548	0.0653	0.0857	0.1094
1000	0.0520	0.0619	0.0813	0.1038



Износ вершин зерен, микрорельеф поверхности зерен и связки
Закон Износа
2 - Износ наиболее выступающих зерен
Только зерна
Записать Износ
Выход
Вид износа вершин зерен
Площадки износа
Площадки износа
Трехосный эллипсод
Затылки на поверхности зерна вариант 1
Затылки на поверхности зерна вариант 2
Затылки на поверхности зерна вариант 3
Затылки на поверхности зерна вариант 4
Вид износа вершин зерен
0.80
0.00
0.70
0.00
Затылки на поверхности зерна вариант 3
Параметры закона износа зерен
Износ
30.000
мкм
Максимальные элементы рельефа
Высота зерен
47.736
мкм
Глубина лунок
50.626
мкм
Рельеф
рамма максимальных элементов рельефа 3D модели
Максимальные значения, мкм
Координата Y, мкм
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
-60
47,74
17,75
-30
-50,63
Зерна
Износ
Зерна
Лунки
Микрорельеф зерен
Микрорельеф отсутствует
Микрорельеф связки
Микрорельеф отсутствует
Характеристический размер
100
Зерн.
100/80
2 - Износ наиболее выступающих зерен
Микрорельеф отсутствует
Равномерное распределение
Нормальное распределение
Микрорельеф отсутствует
Равномерное распределение
Нормальное распределение

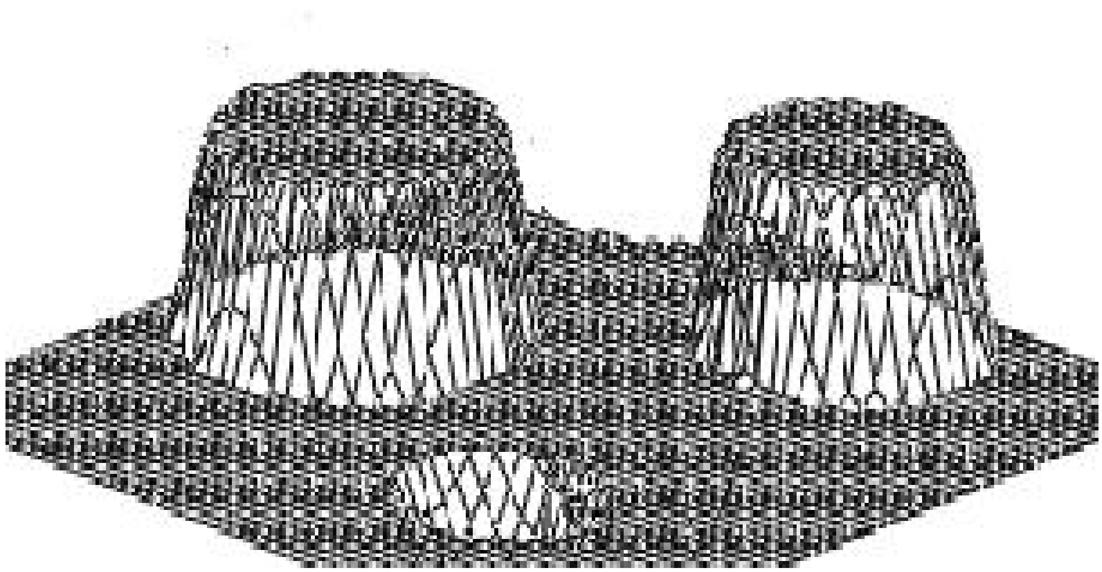


Рисунок Б.5 – Фрагмент 3D модели рабочей поверхности с износом вершин зерен

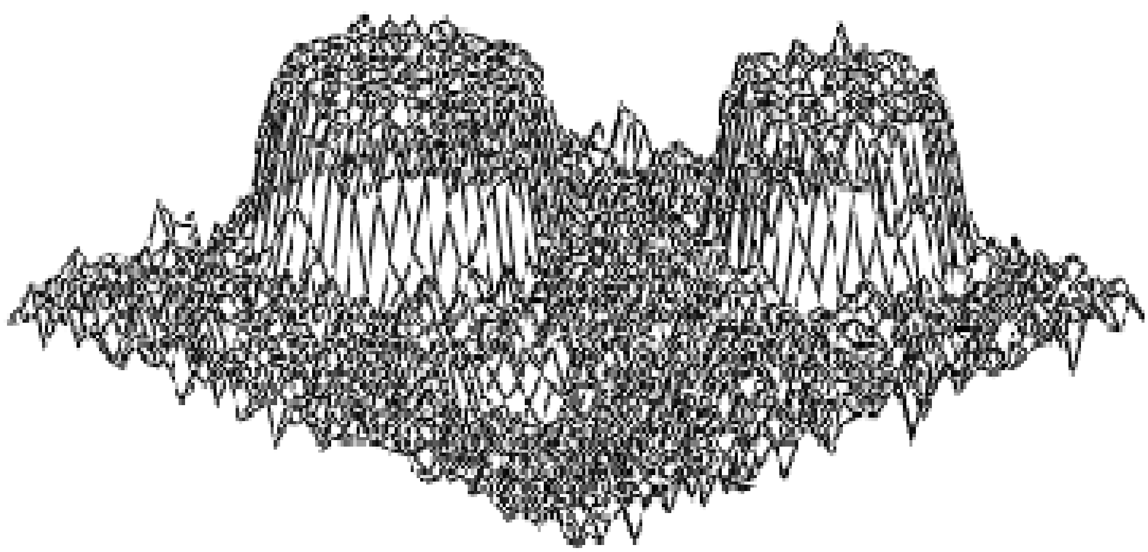
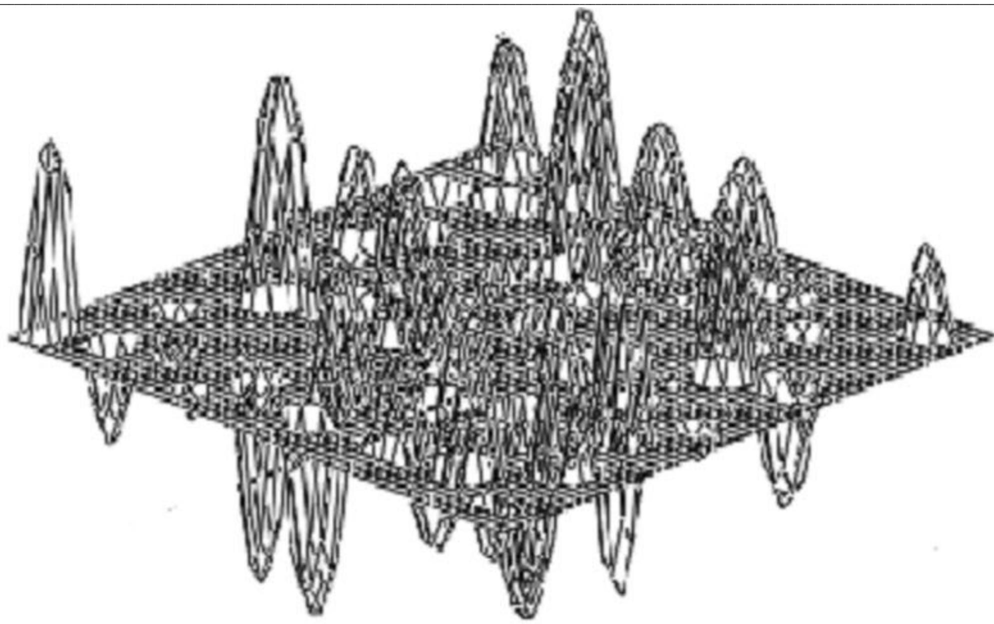
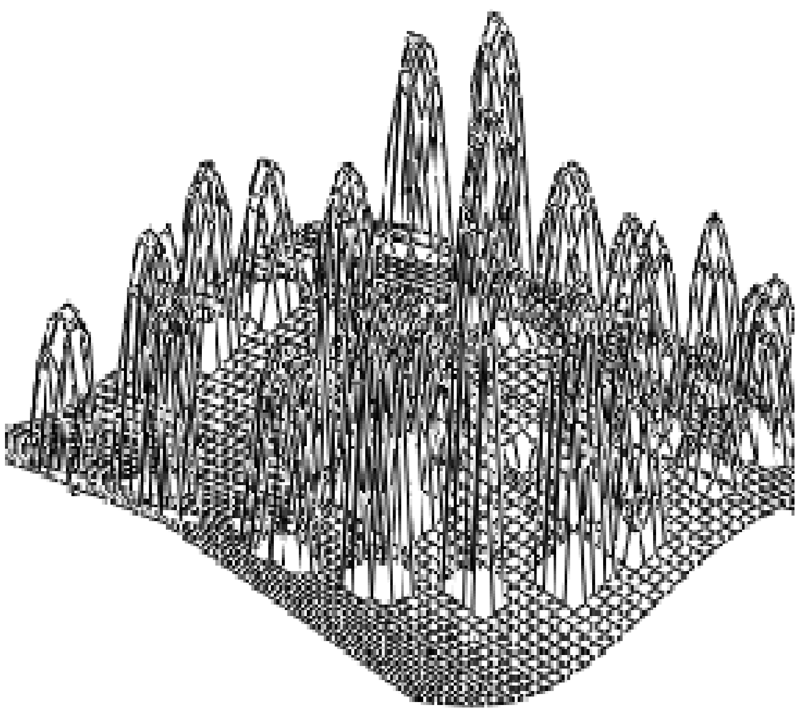


Рисунок Б.6 – Фрагмент 3D модели рабочей поверхности с износом вершин зерен и микрорельефом связки и зерен

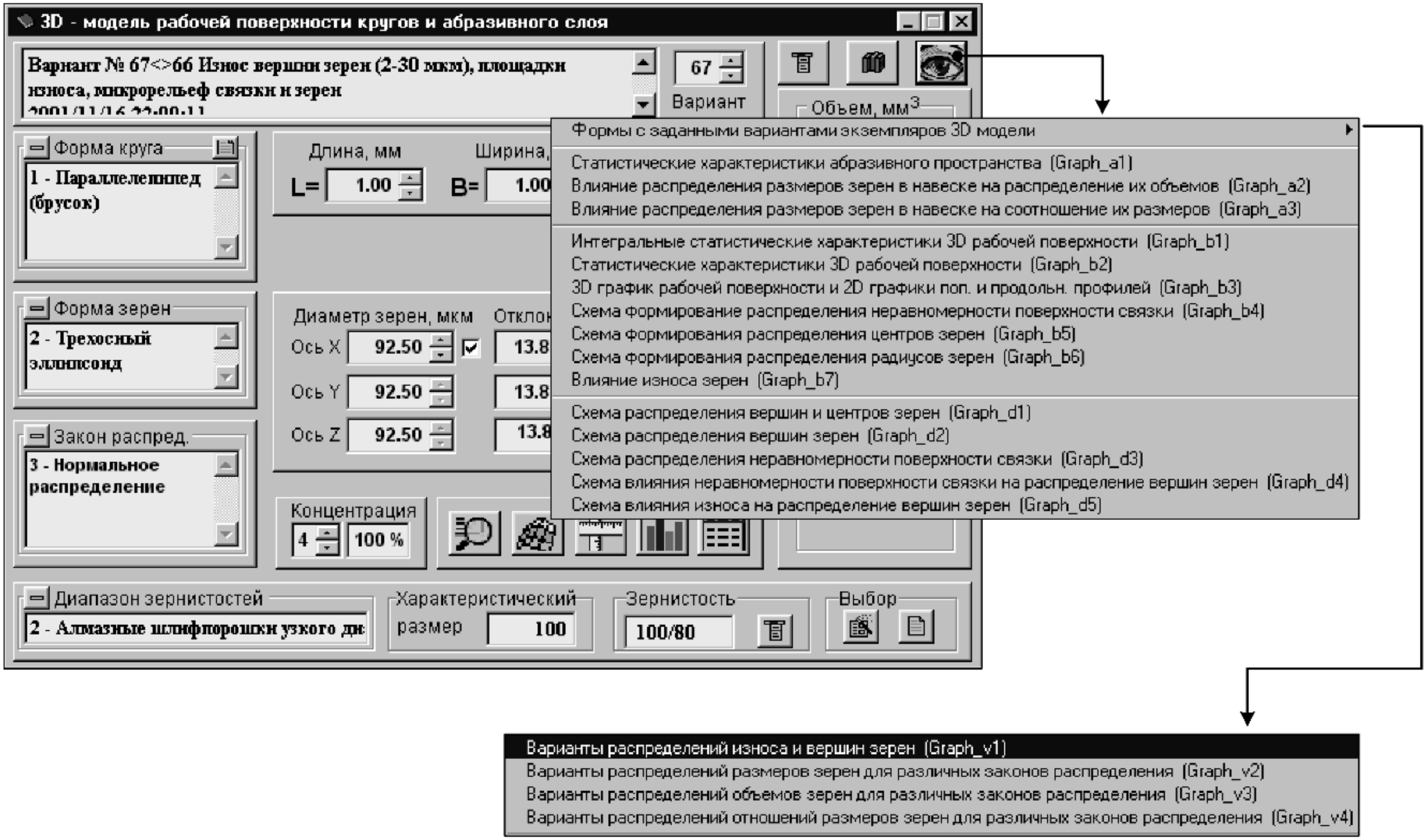


а

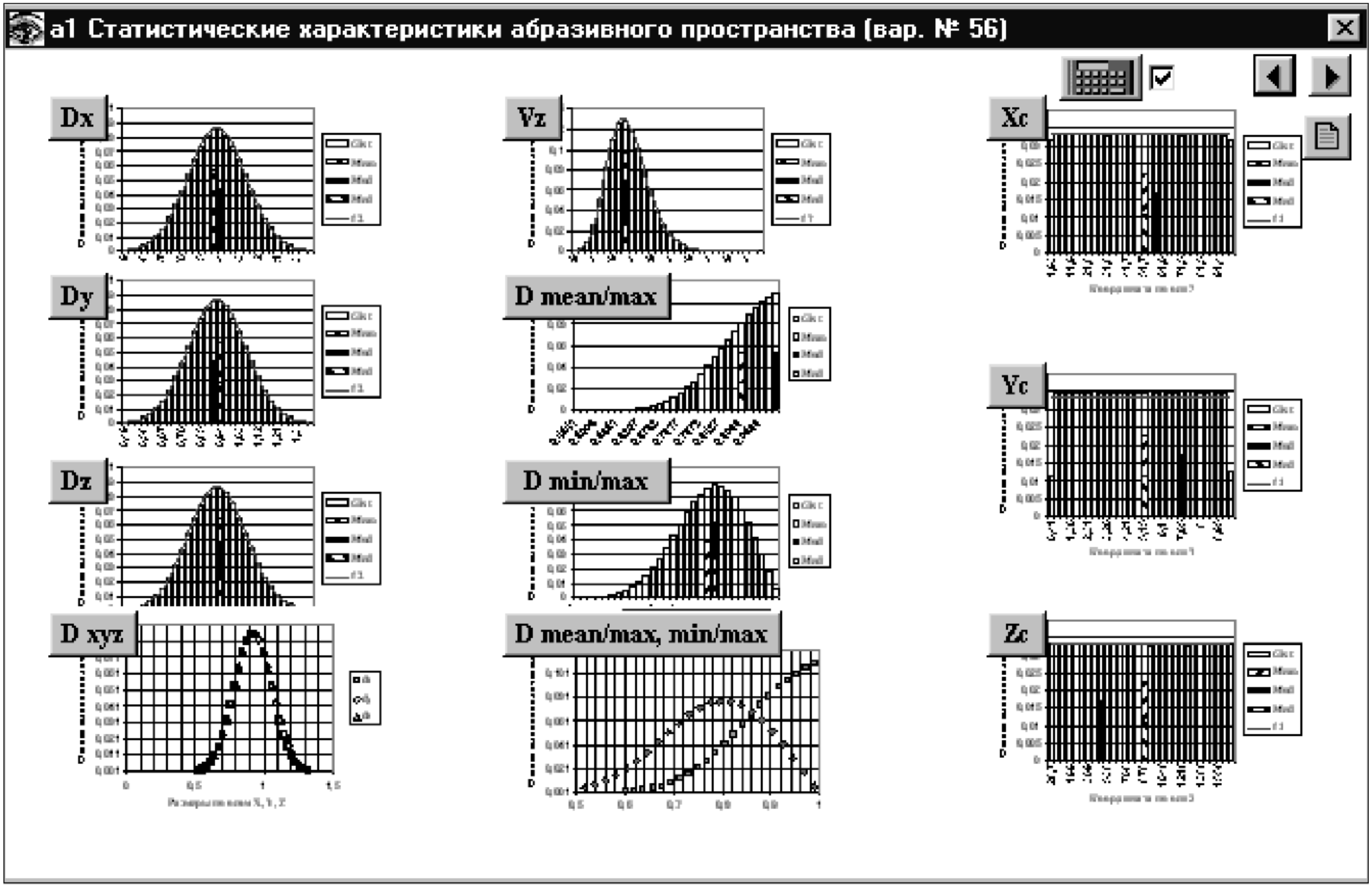


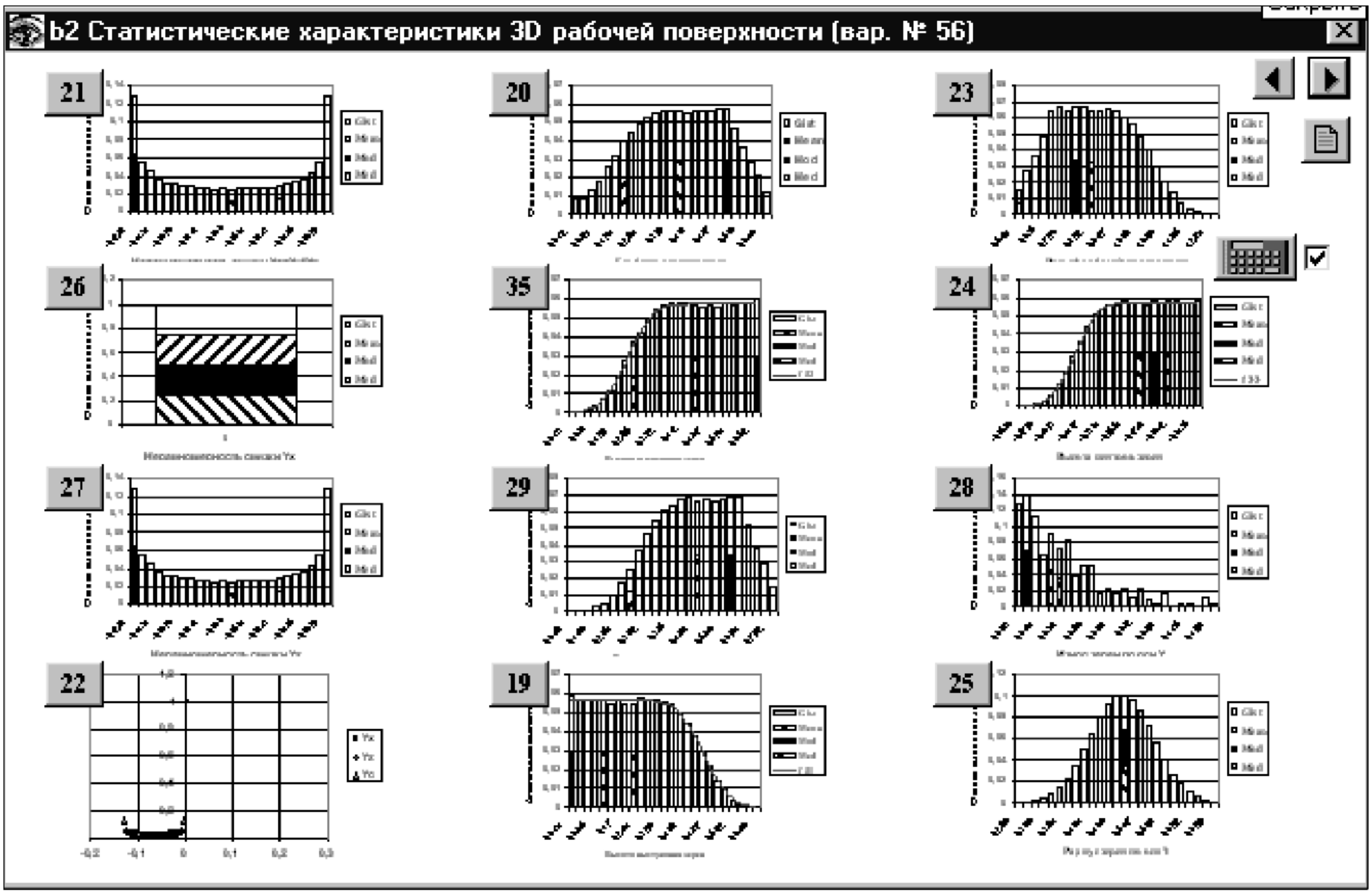
б

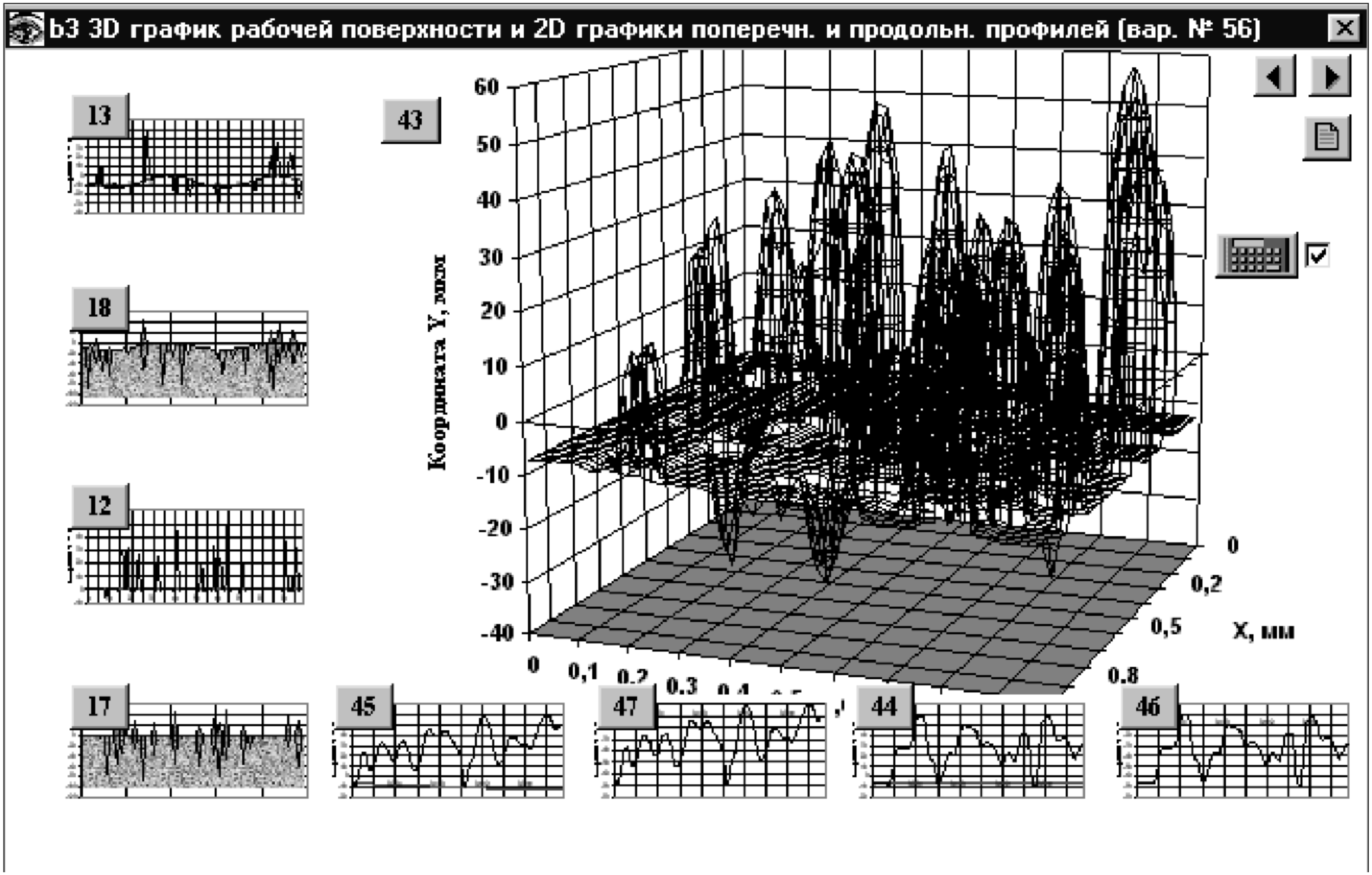
Рисунок Б.7 – Фрагменты 3D модели рабочей поверхности:
а – плоская поверхность связки;
б – поперечный и продольный профили поверхности связки

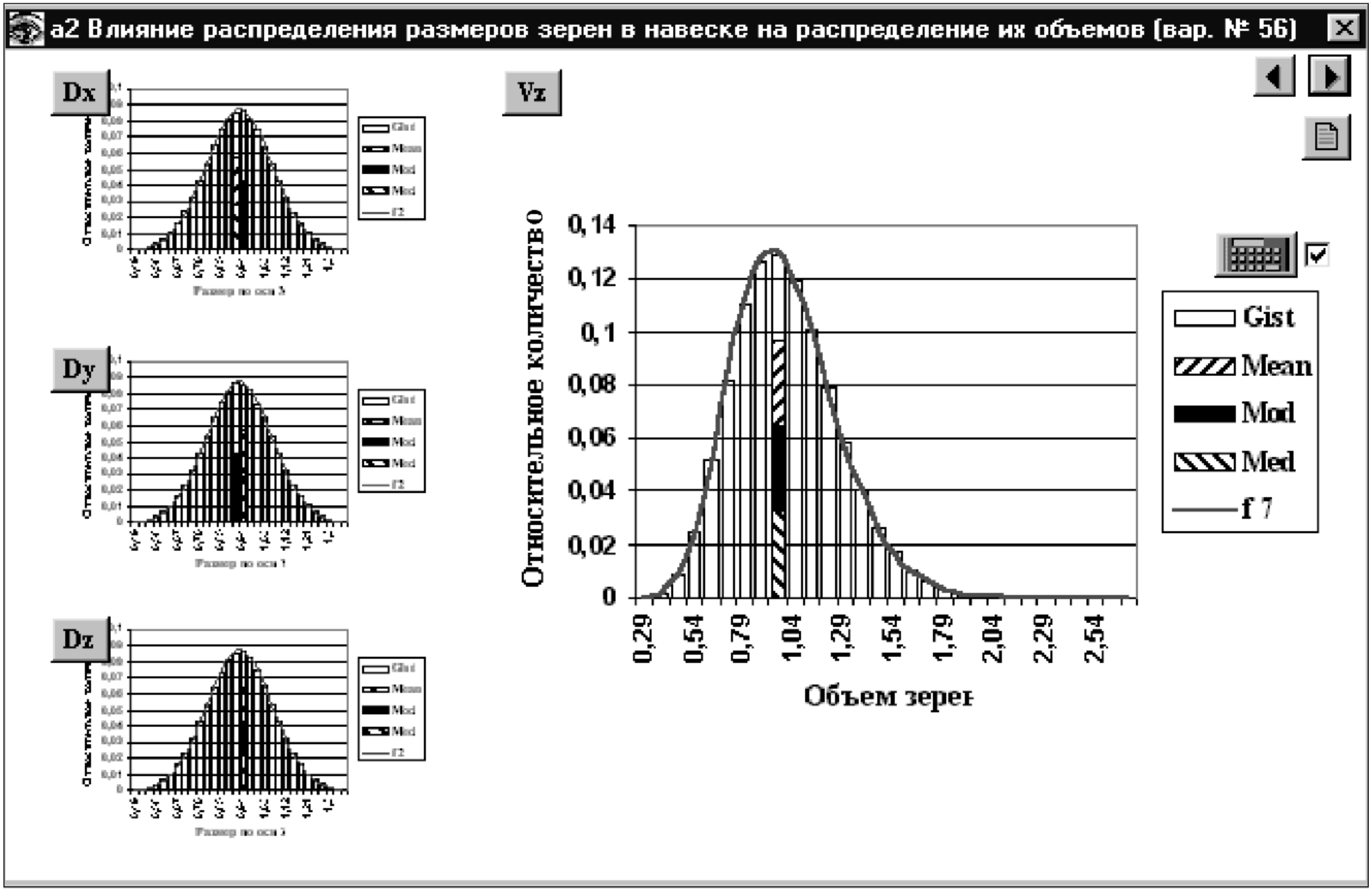


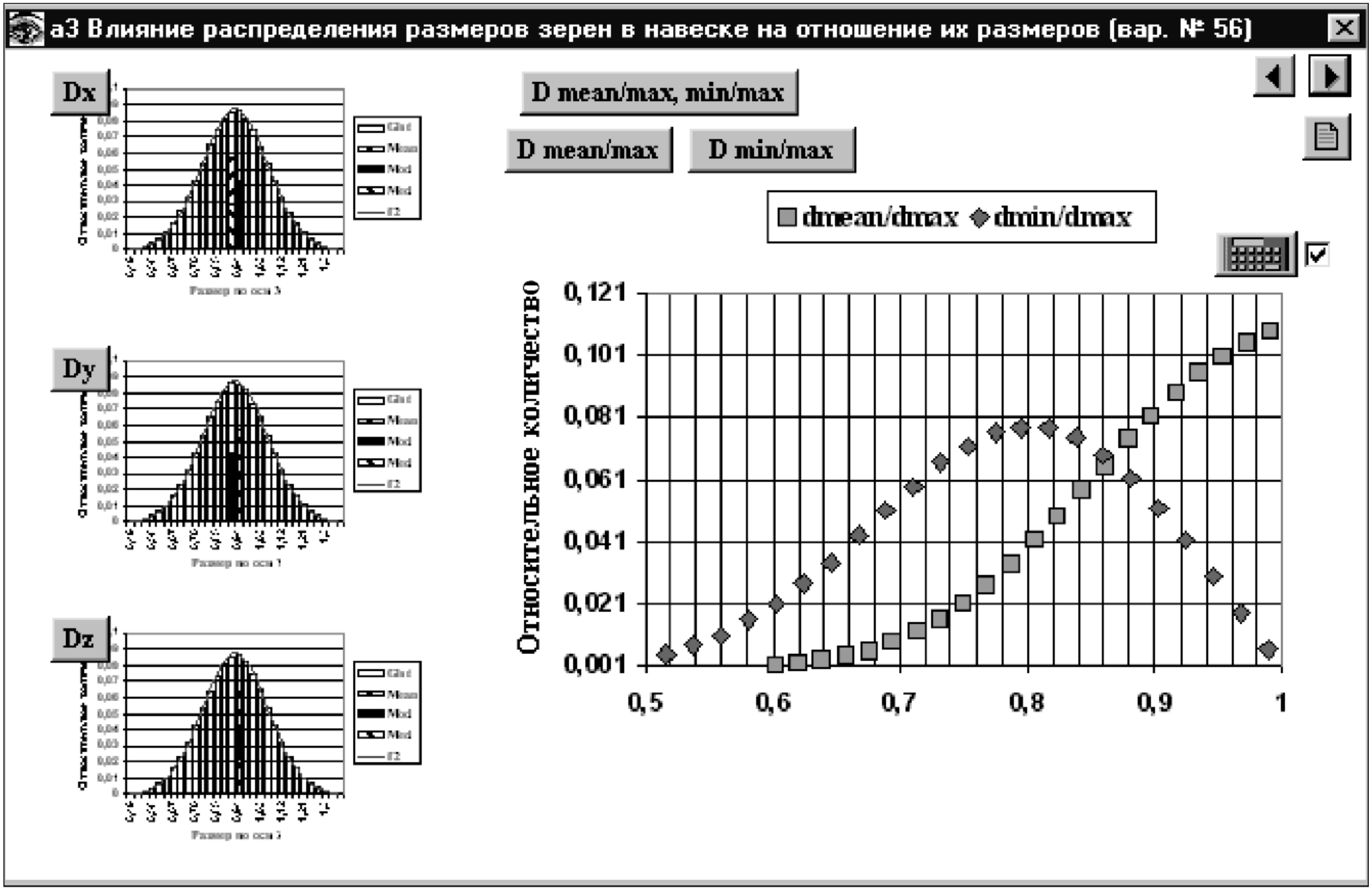
и 3D рабочей поверхности

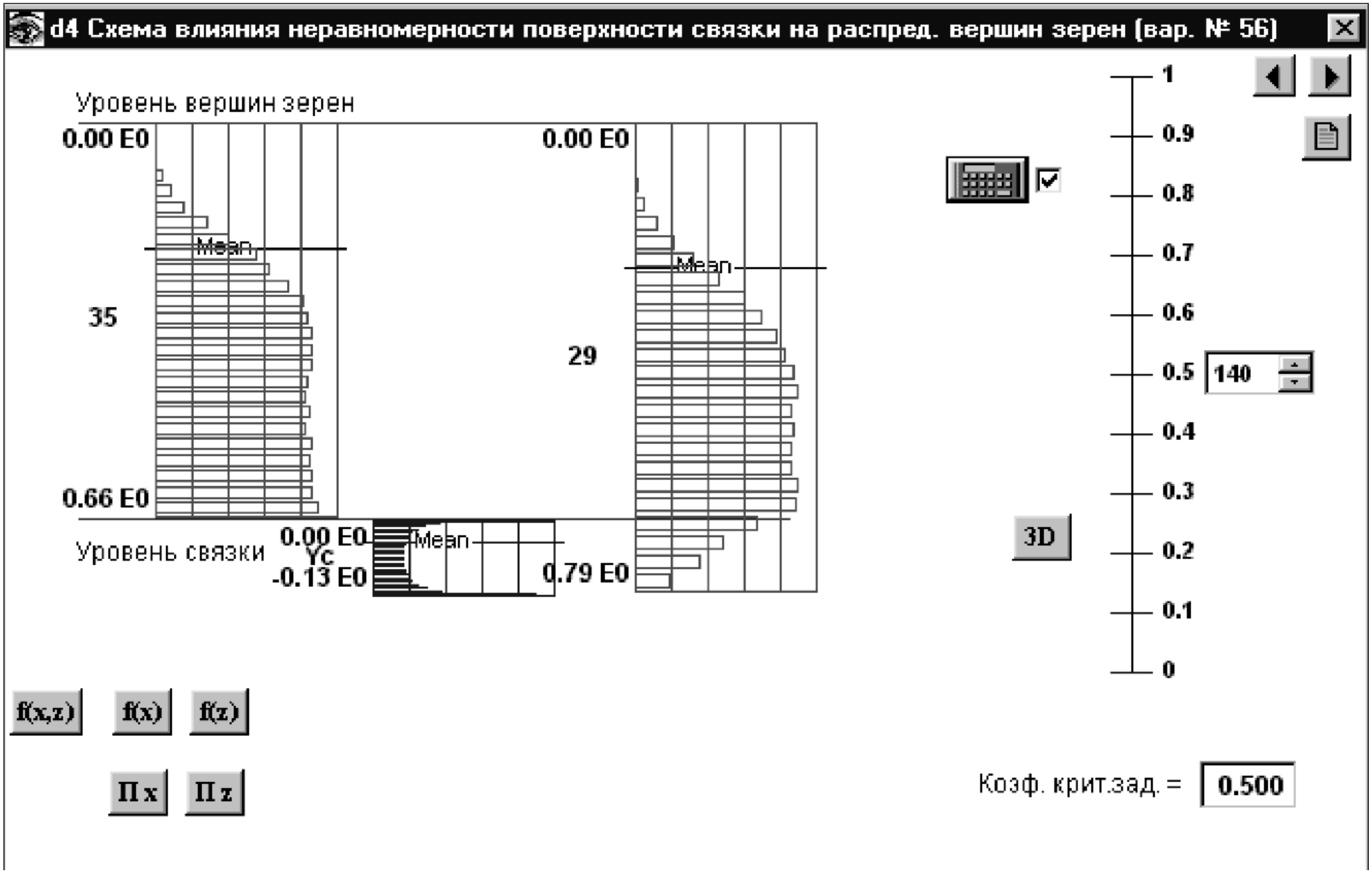

а1 Статистические характеристики абразивного пространства (вар. № 56)
Dx
Vz
Xc
Dy
D mean/max
Yc
Dz
D min/max
D xyz
D mean/max, min/max
Zc


b2 Статистические характеристики 3D рабочей поверхности (вар. № 56)
21
20
23
26
35
24
Неравномерность связки Yx
27
29
28
22
19
25
-0,2
-0,1
0
0,1
0,2
0,3

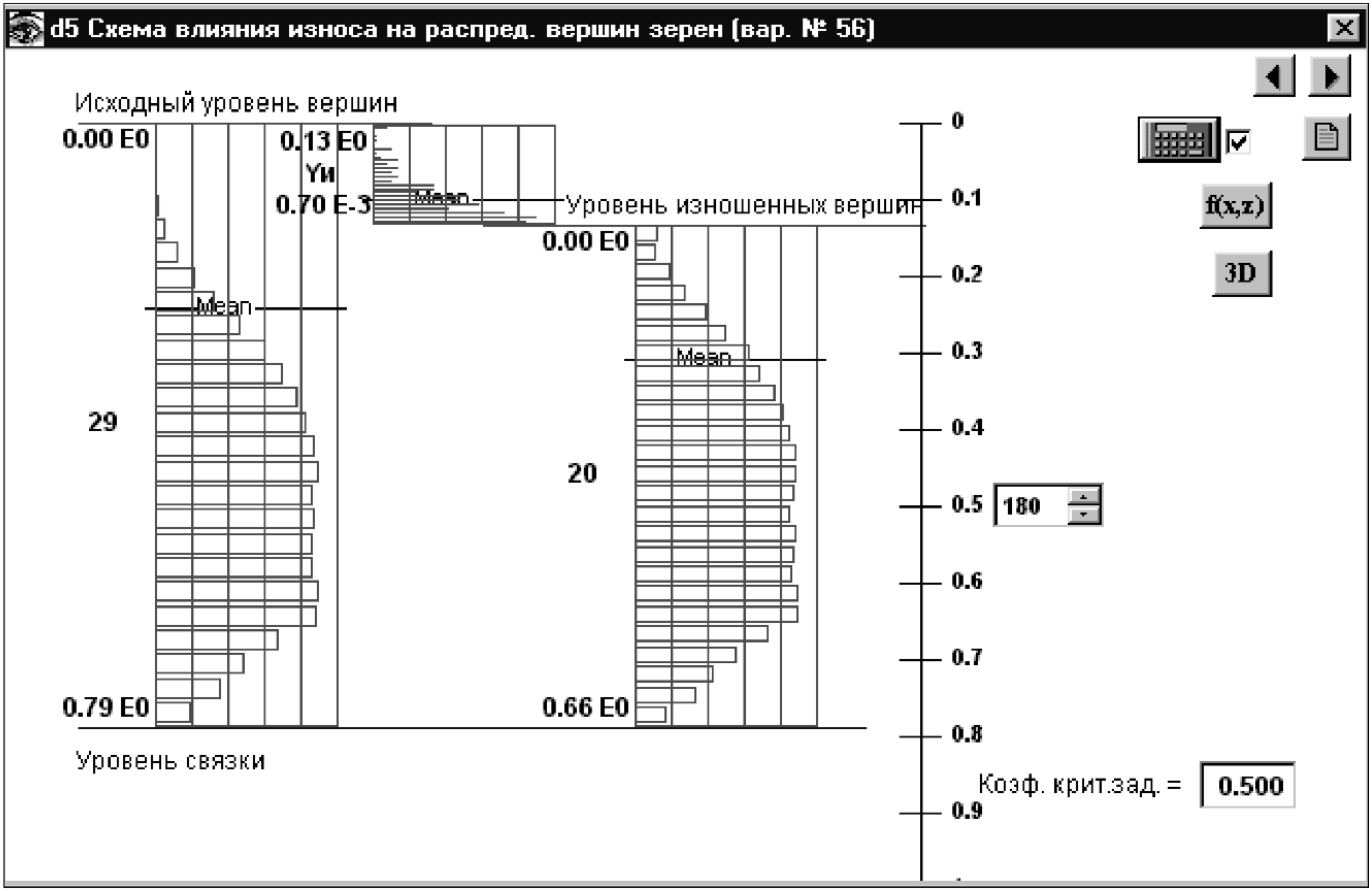

b3 3D график рабочей поверхности и 2D графики поперечн. и продольн. профилей (вар. № 56)
13
43
18
12
17
45
47
44
46
Координата Y, мкм
60
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
0
0,2
0,5
0,8
X, мм
0
0,1
0,2
0,3

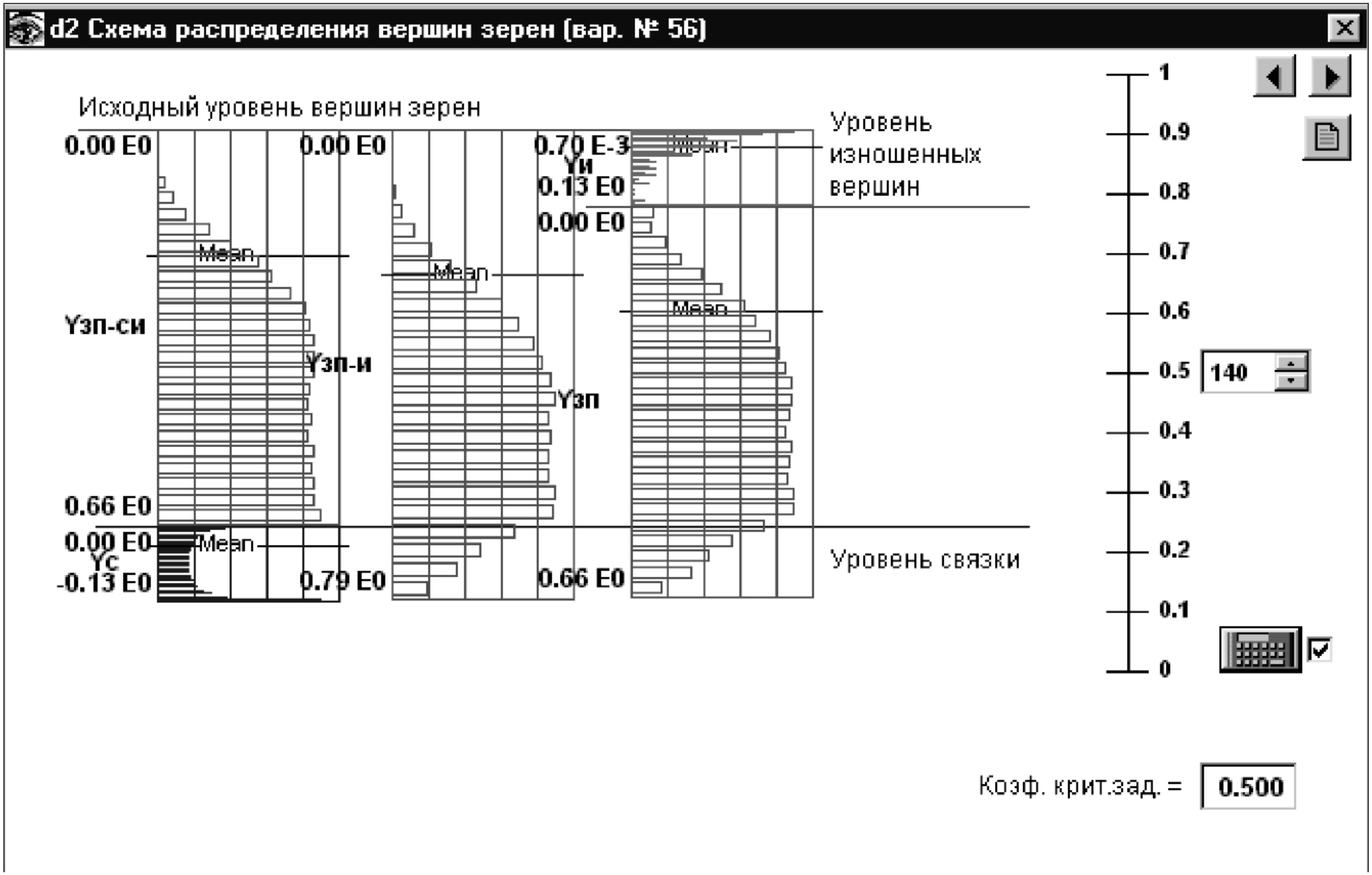

a2 Влияние распределения размеров зерен в навеске на распределение их объемов (вар. № 56)
Dx
Dy
Dz
Vz
Относительное количество
0,14
0,12
0,1
0,08
0,06
0,04
0,02
0
0,29
0,54
0,79
1,04
1,29
1,54
1,79
2,04
2,29
2,54
Объем зерен
Gist
Mean
Mod
Med
f 7


а3 Влияние распределения размеров зерен в навеске на отношение их размеров (вар. № 56)
Dx
Dy
Dz
D mean/max, min/max
D mean/max
D min/max
dmean/dmax
dmin/dmax
Относительное количество
0,121
0,101
0,081
0,061
0,041
0,021
0,001
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1

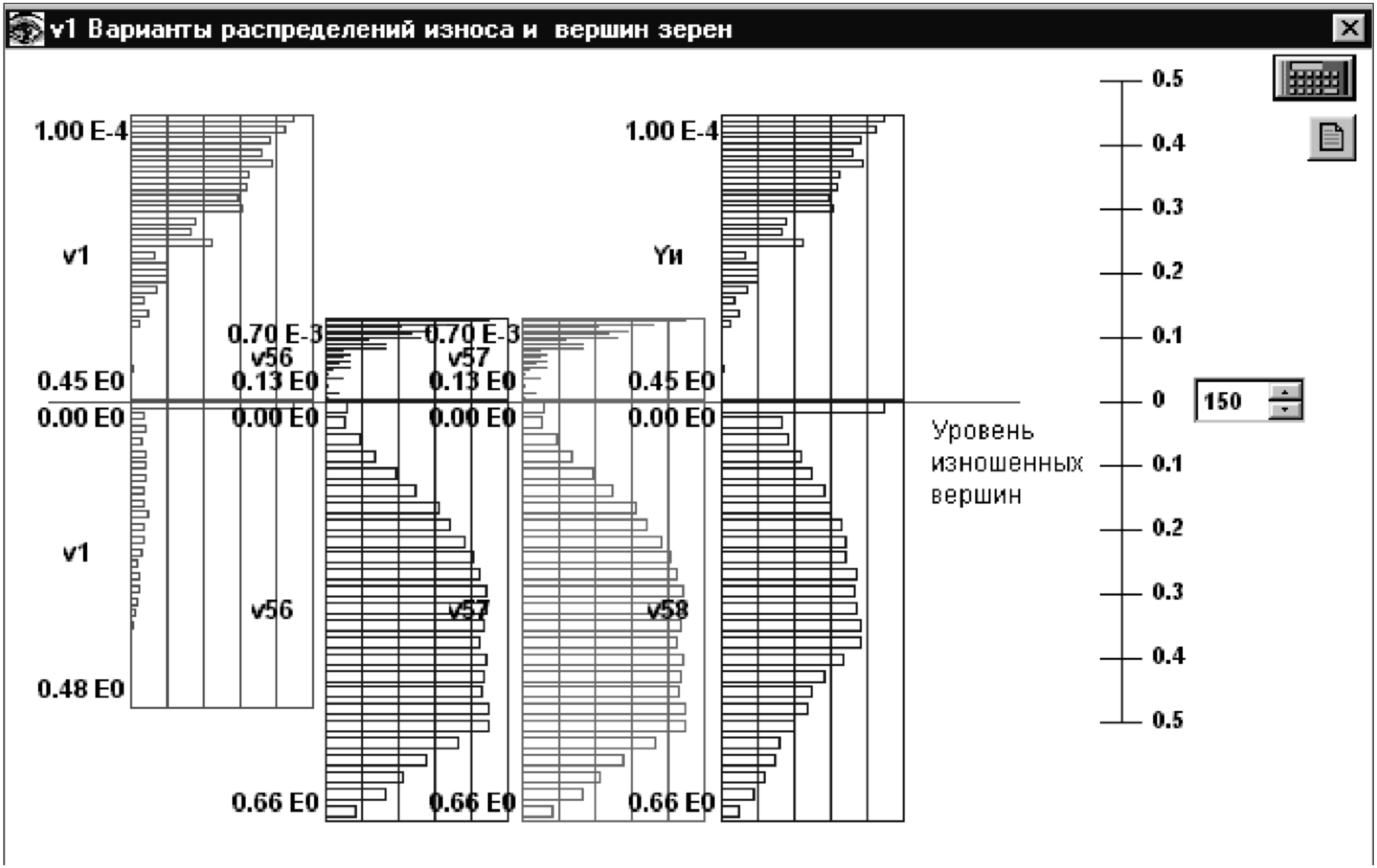


на закон
распределения вершин зерен

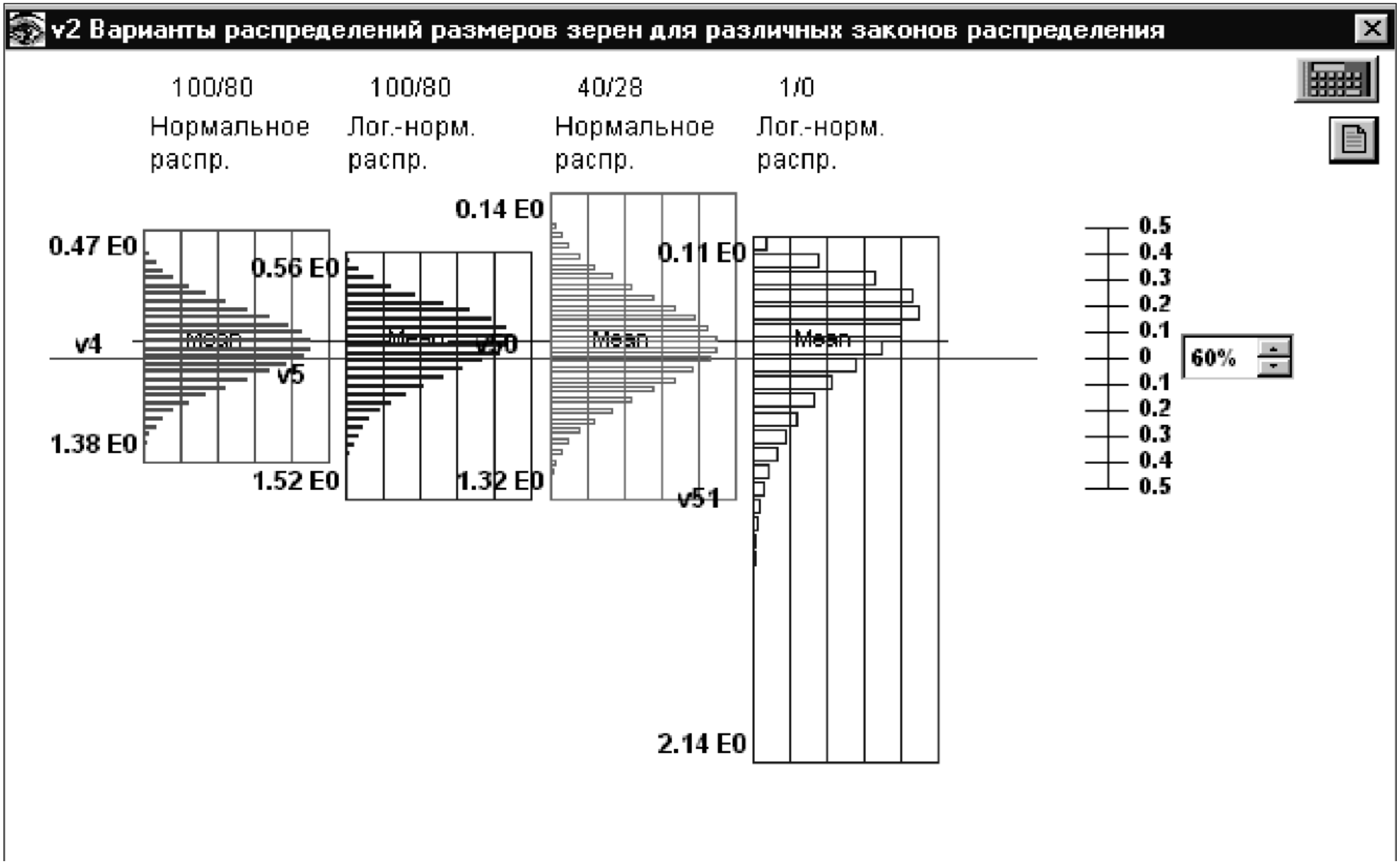

d5 Схема влияния износа на распред. вершин зерен (вар. № 56)
Исходный уровень вершин
0.00 E0
0.13 E0
Yи
0.70 E-3
Mean
Уровень изношенных вершин
0.00 E0
Mean
29
20
0.79 E0
0.66 E0
Уровень связки
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
180
f(x,z)
3D
Коэф. крит.зад. =
0.500

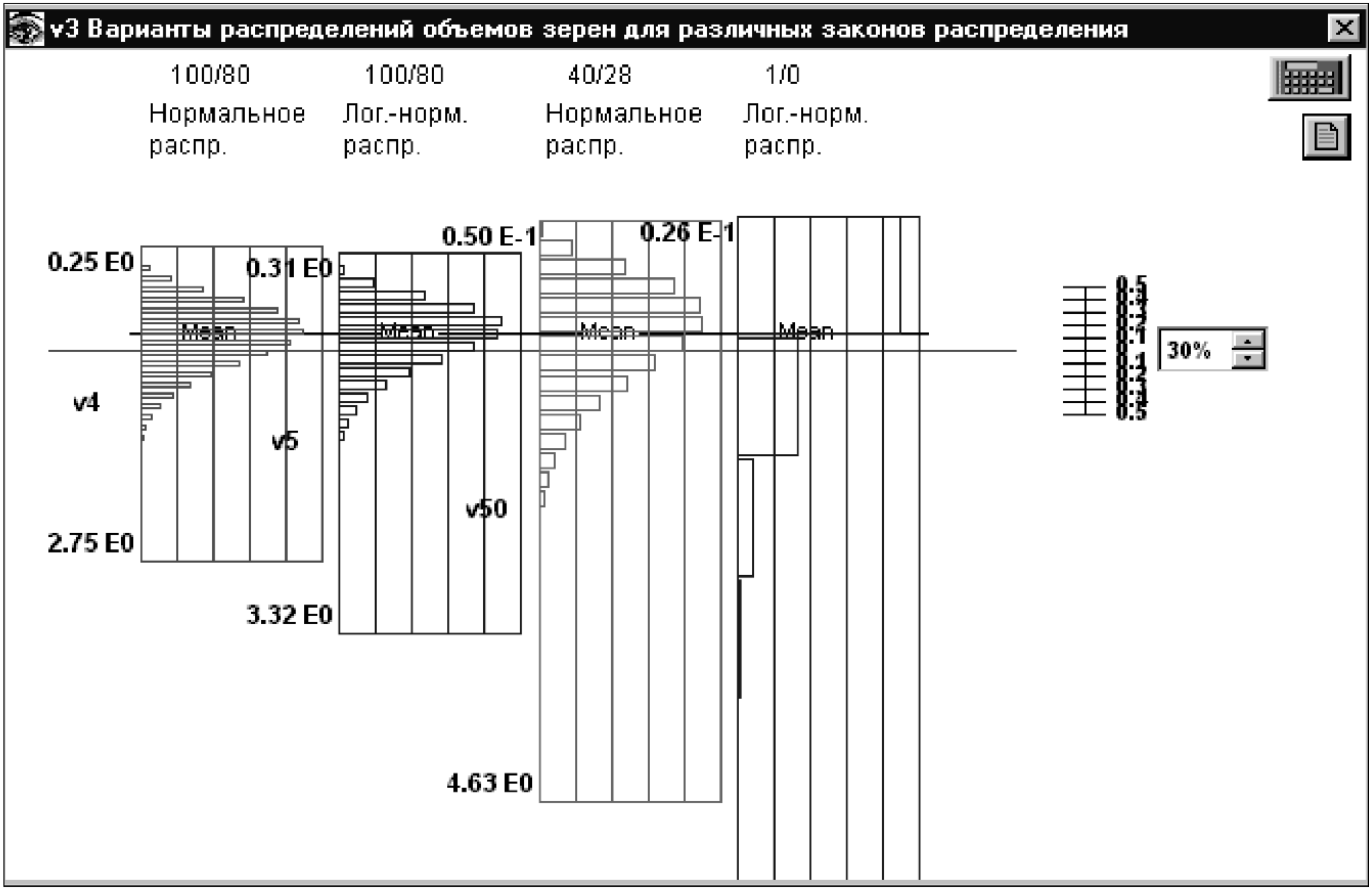


и износа на закон распределения вершин зерен

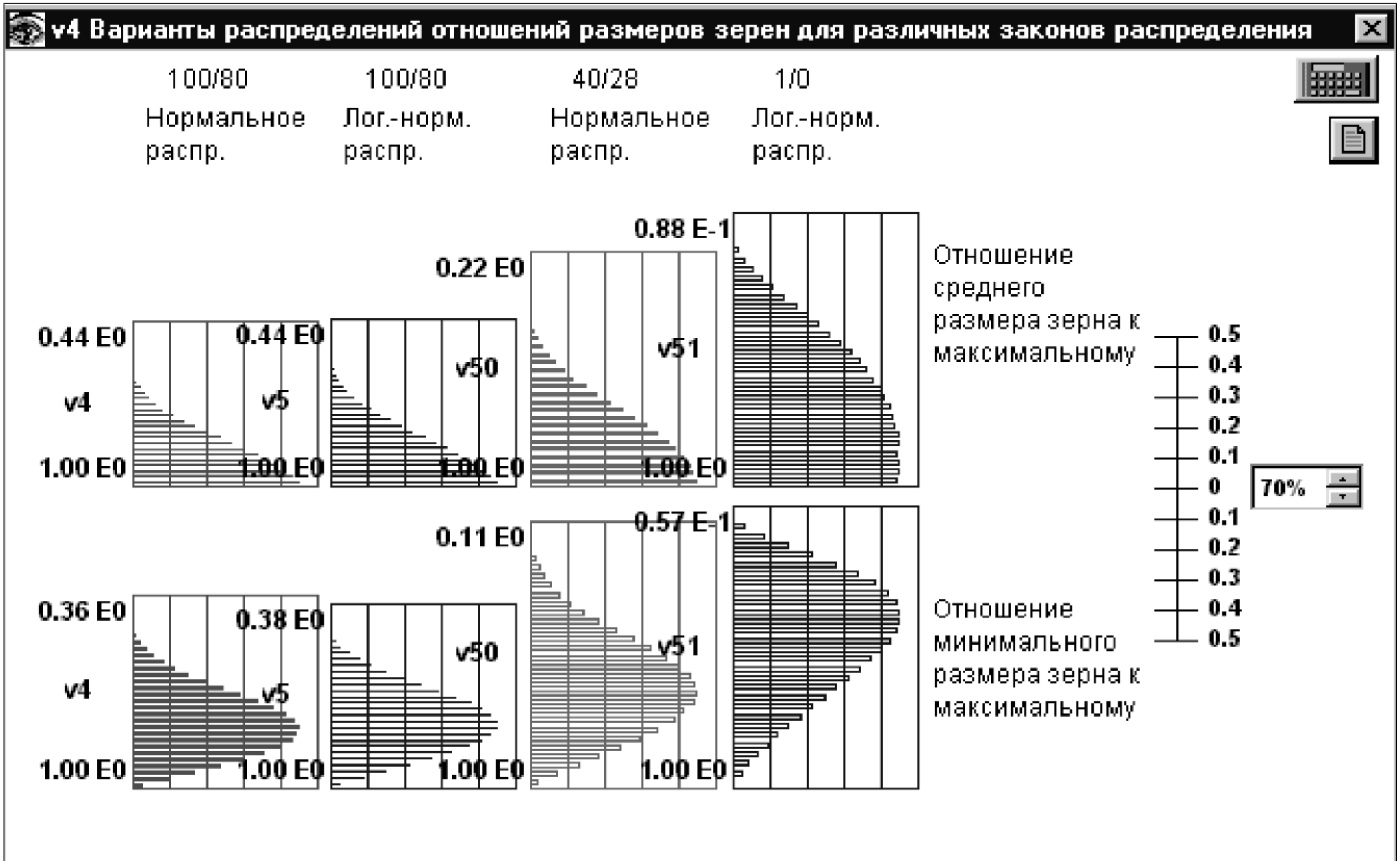


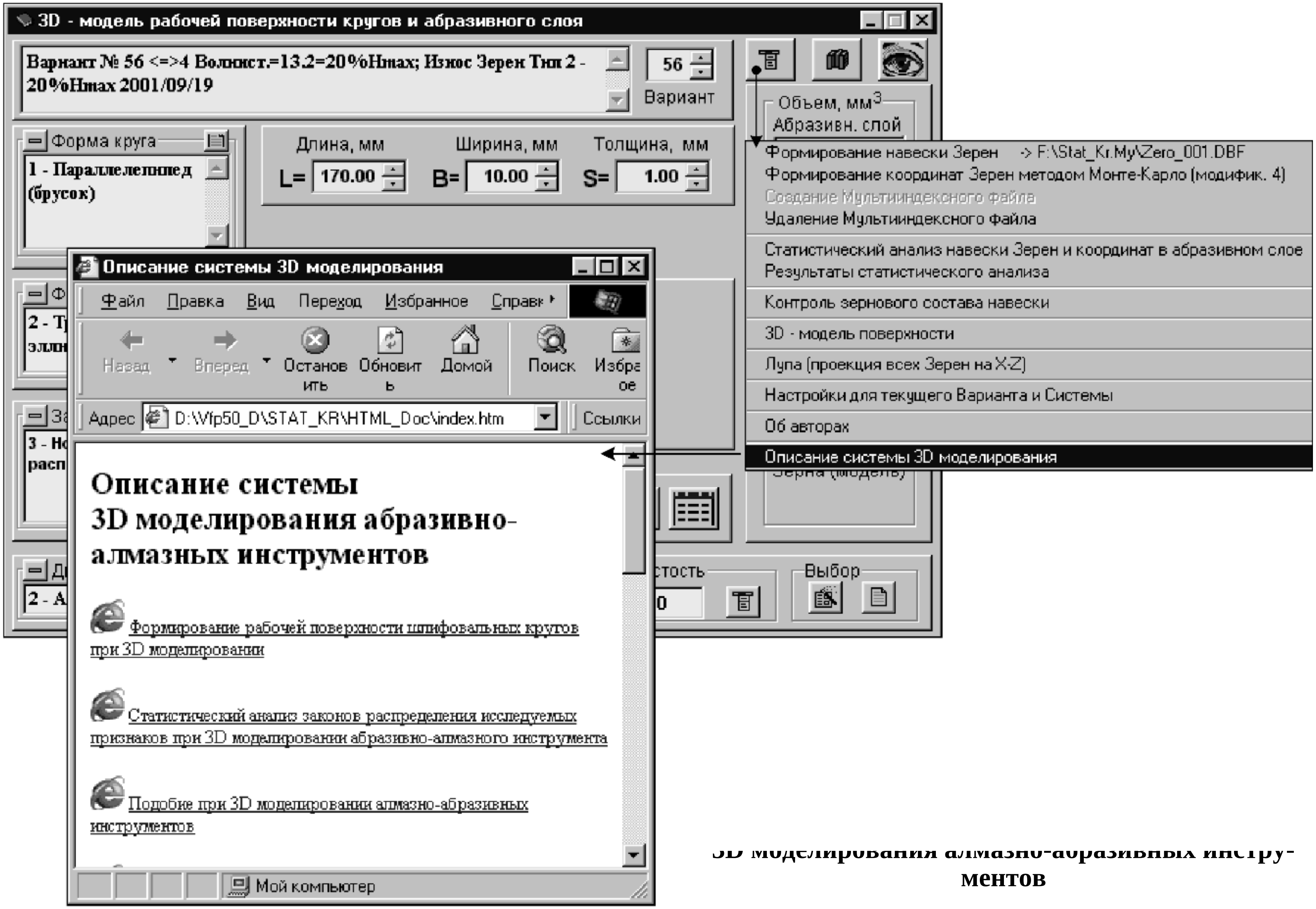
на закон распределения вершин зерен


v2 Варианты распределений размеров зерен для различных законов распределения
100/80
Нормальное распр.
100/80
Лог.-норм. распр.
40/28
Нормальное распр.
1/0
Лог.-норм. распр.
0.47 E0
1.38 E0
0.56 E0
1.52 E0
0.14 E0
1.32 E0
0.11 E0
2.14 E0
v4
v5
v50
v51
Mean
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
60%



v3 Варианты распределений объемов зерен для различных законов распределения
100/80
Нормальное распр.
100/80
Лог.-норм. распр.
40/28
Нормальное распр.
1/0
Лог.-норм. распр.
0.25 E0
0.31 E0
0.50 E-1
0.26 E-1
Mean
Mean
Mean
Mean
v4
v5
v50
2.75 E0
3.32 E0
4.63 E0
30%


v4 Варианты распределений отношений размеров зерен для различных законов распределения
100/80
Нормальное распр.
100/80
Лог.-норм. распр.
40/28
Нормальное распр.
1/0
Лог.-норм. распр.
0.88 E-1
0.22 E0
0.44 E0
0.44 E0
v4
v5
v50
v51
1.00 E0
1.00 E0
1.00 E0
1.00 E0
Отношение среднего размера зерна к максимальному
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
70%
0.57 E-1
0.11 E0
0.36 E0
0.38 E0
v4
v5
v50
v51
1.00 E0
1.00 E0
1.00 E0
1.00 E0
Отношение минимального размера зерна к максимальному



3D моделирования алмазно-абразивных инстру-ментов

Таблица В – Модифицированные параметры распределения размеров зерен из алмаза и кубическо нитрида бора

Зернистость (первое число – характеристический размер $k_н$) $a_в/a_н$, мкм	$\varphi_{факт} = a_в/a_н$	Закон распределения размеров зерен, моделируемых трехосным эллипсоидом	Усл. обозначение	Параметры закона распределения		Содержание фракций по массе шлифпорошка, %						
				Коэффициент смещения k_E	Коэффициент вариации k_ν	Мелкая $P_м$	Дополнительная $P_д$	Основная $P_о$		Крупная $P_к$		Предельная $P_п$
Шлифпорошки широкого диапазона зернистостей												
2500/1600	1,563	нормальный	NШ01	0,840	0,215	0,23	5,68	90,39	> 90	3,69	< 8	0,01
		лог.-нормальн.	LШ01	0,845	0,220	0,02	5,00	90,53	> 90	4,38	< 8	0,07
1600/1000	1,600	нормальный	NШ02	0,835	0,225	0,37	5,07	90,62	> 90	3,93	< 8	0,01
		лог.-нормальн.	LШ02	0,835	0,235	0,07	5,25	90,14	> 90	4,50	< 8	0,04
1000/630	1,587	нормальный	NШ03	0,835	0,225	0,37	5,56	90,13	> 90	3,93	< 8	0,01
		лог.-нормальн.	LШ03	0,840	0,230	0,05	5,03	90,27	> 90	4,62	< 8	0,03
630/400	1,575	нормальный	NШ04	0,810	0,295	1,75	11,09	80,46	> 80	6,67	< 10	0,03
		лог.-нормальн.	LШ04	0,810	0,280	0,72	13,05	80,98	> 80	5,18	< 10	0,07
400/250	1,600	нормальный	NШ05	0,800	0,310	2,23	10,76	80,32	> 80	6,65	< 10	0,04
		лог.-нормальн.	LШ05	0,795	0,285	1,07	13,49	81,06	> 80	4,29	< 10	0,09
250/160	1,563	нормальный	NШ06	0,810	0,290	1,66	11,75	80,32	> 80	6,24	< 10	0,03
		лог.-нормальн.	LШ06	0,810	0,275	0,66	13,72	80,65	> 80	4,90	< 10	0,07
160/100	1,600	нормальный	NШ07	0,820	0,315	1,91	9,14	79,13	> 75	9,74	< 12	0,08
		лог.-нормальн.	LШ07	0,775	0,300	1,93	17,29	76,84	> 75	3,85	< 12	0,09

Зернистость (первое число – характеристический размер k_m) $a_в/a_н$, мкм	$\varphi_{факт} = a_в/a_н$	Закон распределения размеров зерен, моделируемых трехосным эллипсоидом	Усл. обозначение	Параметры закона распределения		Содержание фракций по массе шлифпорошка, %						
				Коэффициент смещения k_E	Коэффициент вариации k_V	Мелкая $P_м$	Дополнительная $P_д$	Основная $P_о$		Крупная $P_к$		Предельная $P_п$
Шлифпорошки широкого диапазона зернистостей (продолжение)												
100/63	1,587	нормальный	NШ08	0,820	0,315	1,91	9,78	78,49	> 75	9,74	< 13	0,08
		лог.-нормальн.	LШ08	0,775	0,300	1,93	18,49	75,64	> 75	3,85	< 13	0,09
63/40	1,575	нормальный	NШ09	0,800	0,345	—	15,74	75,24	> 75	8,96	< 15	0,06
		лог.-нормальн.	LШ09	0,785	0,300	—	19,51	75,95	> 75	4,45	< 15	0,09
Шлифпорошки узкого диапазона зернистостей												
2500/2000	1,250	нормальный	NУ01	0,925	0,105	0,00	5,51	90,54	> 90	3,95	< 8	0,00
		лог.-нормальн.	LУ01	0,930	0,110	0,00	4,82	90,02	> 90	5,16	< 8	0,00
2000/1600	1,250	нормальный	NУ02	0,925	0,105	0,00	5,51	90,54	> 90	3,95	< 8	0,00
		лог.-нормальн.	LУ02	0,930	0,110	0,00	4,82	90,02	> 90	5,16	< 8	0,00
1600/1250	1,280	нормальный	NУ03	0,915	0,115	0,00	5,55	90,89	> 90	3,56	< 8	0,00
		лог.-нормальн.	LУ03	0,920	0,120	0,00	4,78	90,58	> 90	4,64	< 8	0,00
1250/1000	1,250	нормальный	NУ04	0,925	0,105	0,00	5,51	90,54	> 90	3,95	< 8	0,00
		лог.-нормальн.	LУ04	0,930	0,110	0,00	4,82	90,02	> 90	5,16	< 8	0,00
1000/800	1,250	нормальный	NУ05	0,925	0,105	0,00	5,51	90,54	> 90	3,95	< 8	0,00
		лог.-нормальн.	LУ05	0,930	0,110	0,00	4,82	90,02	> 90	5,16	< 8	0,00
800/630	1,270	нормальный	NУ06	0,920	0,145	0,06	11,16	80,66	> 80	8,12	< 10	0,00
		лог.-нормальн.	LУ06	0,925	0,150	0,00	10,60	80,44	> 80	8,95	< 10	0,01

Зернистость (первое число – характеристический размер k_m) $a_в/a_н$, мкм	$\varphi_{факт} = a_в/a_н$	Закон распределения размеров зерен, моделируемых трехосным эллипсоидом	Усл. обозначение	Параметры закона распределения		Содержание фракций по массе шлифпорошка, %						
				Коэффициент смещения k_E	Коэффициент вариации k_V	Мелкая $P_м$	Дополнительная $P_д$	Основная $P_о$		Крупная $P_к$		Предельная $P_п$
Шлифпорошки узкого диапазона зернистостей (продолжение)												
630/500	1,260	нормальный	NУ07	0,925	0,140	0,05	10,73	80,74	> 80	8,48	< 10	0,00
		лог.-нормальн.	LУ07	0,930	0,145	0,00	10,14	80,47	> 80	9,38	< 10	0,01
500/400	1,250	нормальный	NУ08	0,925	0,135	0,02	11,39	80,74	> 80	7,85	< 10	0,00
		лог.-нормальн.	LУ08	0,930	0,140	0,00	10,77	80,41	> 80	8,82	< 10	0,00
400/315	1,270	нормальный	NУ09	0,920	0,145	0,06	11,16	80,66	> 80	8,12	< 10	0,00
		лог.-нормальн.	LУ09	0,925	0,150	0,00	10,60	80,44	> 80	8,95	< 10	0,01
315/250	1,260	нормальный	NУ10	0,925	0,140	0,05	10,73	80,74	> 80	8,48	< 10	0,00
		лог.-нормальн.	LУ10	0,930	0,145	0,00	10,10	80,47	> 80	9,42	< 10	0,01
250/200	1,250	нормальный	NУ11	0,925	0,135	0,04	11,32	80,76	> 80	7,88	< 10	0,00
		лог.-нормальн.	LУ11	0,930	0,140	0,00	10,77	80,41	> 80	8,82	< 10	0,00
200/160	1,250	нормальный	NУ12	0,925	0,135	0,01	11,40	80,74	> 80	7,85	< 12	0,00
		лог.-нормальн.	LУ12	0,930	0,140	0,00	10,76	80,41	> 80	8,82	< 12	0,00
160/125	1,280	нормальный	NУ13	0,915	0,145	0,10	11,47	80,63	> 80	7,80	< 12	0,00
		лог.-нормальн.	LУ13	0,925	0,155	0,01	9,98	80,49	> 80	9,51	> 12	0,01
125/100	1,250	нормальный	NУ14	0,925	0,135	0,04	11,41	80,72	> 80	7,83	> 12	0,00
		лог.-нормальн.	LУ14	0,935	0,140	0,00	9,61	80,52	> 80	9,87	> 12	0,00

Зернистость (первое число характеристический размер k_m) $a_в/a_н$, мкм	$\varphi_{факт} = a_в/a_н$	Закон распределения размеров зерен, моделируемых трехосным эллипсоидом	Усл. обозначение	Параметры закона распределения		Содержание фракций по массе шлифпорошка, %						
				Коэффициент смещения k_E	Коэффициент вариации k_v	Мелкая $P_м$	Дополнительная $P_д$	Основная $P_о$		Крупная $P_к$		Предельная $P_п$
Шлифпорошки узкого диапазона зернистостей (продолжение)												
100/80	1,250	нормальный	NУ15	0,925	0,150	0,09	14,08	76,07	> 75	9,76	< 12	0,00
		лог.-нормальн.	LУ15	0,935	0,155	0,01	12,55	75,81	> 75	11,62	< 12	0,01
80/63	1,270	нормальный	NУ16	0,920	0,160	0,18	13,55	76,31	> 75	9,96	< 13	0,00
		лог.-нормальн.	LУ16	0,935	0,165	0,02	11,10	76,22	> 75	12,64	< 13	0,02
63/50	1,260	нормальный	NУ17	0,925	0,155	0,16	13,13	76,14	> 75	10,57	< 13	0,00
		лог.-нормальн.	LУ17	0,930	0,160	0,02	12,84	76,03	> 75	11,10	< 13	0,01
50/40	1,250	нормальный	NУ18	0,925	0,150	0,00	13,91	76,11	> 75	9,98	< 15	0,00
		лог.-нормальн.	LУ18	0,935	0,155	0,00	12,27	75,92	> 75	11,80	< 15	0,01
Микропорошки												
60/40	1,500	нормальный	NM01	0,725	0,260	12,12	< 25	83,07	> 70	4,81	< 5	—
		лог.-нормальн.	LM01	0,685	0,255	24,46	< 25	72,44	> 70	3,10	< 5	—
40/28	1,429	нормальный	NM02	0,730	0,250	17,45	< 25	78,07	> 70	4,48	< 5	—
		лог.-нормальн.	LM02	0,720	0,240	23,57	< 25	71,61	> 70	4,82	< 5	
28/20	1,400	нормальный	NM03	0,735	0,245	19,40	< 25	75,93	> 70	4,67	< 5	—
		лог.-нормальн.	LM03	0,730	0,225	24,85	< 25	70,82	> 70	4,33	< 5	—

Зернистость (первое число – характеристический размер $k_{н}$) $a_{в}/a_{н}$, мкм	$\varphi_{факт} = a_{в}/a_{н}$	Закон распределения размеров зерен, моделируемых трехосным эллипсоидом	Усл. обозначение	Параметры закона распределения: Коэффициент смещения k_E	Коэффициент вариации k_v	Содержание фракций по массе шлифпорошка, %: Мелкая $P_{м}$	Дополнительная $P_{д}$	Основная $P_{о}$		Крупная $P_{к}$		Предельная $P_{п}$
Микропорошки (продолжение)												
20/14	1,429	нормальный	NM04	0,730	0,250	17,46	< 25	78,06	> 70	4,48	< 5	—
		лог.-нормальн.	LM04	0,720	0,240	23,59	< 25	71,56	> 70	4,85	< 5	
14/10	1,400	нормальный	NM05	0,735	0,245	19,41	< 25	75,92	> 70	4,67	< 5	—
		лог.-нормальн.	LM05	0,730	0,225	24,86	< 25	70,81	> 70	4,33	< 5	—
10/7	1,429	нормальный	NM06	0,720	0,265	20,05	< 25	75,24	> 70	4,71	< 5	
		лог.-нормальн.	LM06	0,715	0,240	23,55	< 25	71,73	> 70	4,72	< 5	—
7/5	1,400	нормальный	NM07	0,725	0,255	21,29	< 25	74,11	> 70	4,60	< 5	—
		лог.-нормальн.	LM07	0,725	0,225	24,80	< 25	71,05	> 70	4,15	< 5	—
5/3	1,667	нормальный	NM08	0,640	0,375	17,18	< 25	78,66	> 70	4,16	< 5	—
		лог.-нормальн.	LM08	0,640	0,305	20,24	< 25	76,62	> 70	3,14	< 5	—
3/2	1,500	нормальный	NM09	0,685	0,300	17,65	< 25	77,43	> 70	4,92	< 5	—
		лог.-нормальн.	LM09	0,685	0,250	20,70	< 25	74,53	> 70	4,77	< 5	—
2/1	2,000	нормальный	NM10	0,475	0,705	20,05	< 25	75,04	> 70	4,91	< 5	—
		лог.-нормальн.	LM10	0,550	0,400	20,40	< 25	77,37	> 70	2,23	< 5	—
1/0	?	нормальный	NM11	0,460	0,710	—	—	95,48	> 95	4,52	< 5	—
		лог.-нормальн.	LM11	0,500	0,560			95,44	> 95	4,56	< 5	

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1.
ЗНАКОМСТВО С ПАКЕТОМ «COSMOS»

Цель работы – практически ознакомиться со структурой и основными приемами работы пакета.

Задание:

1. Изучить структуру экрана и работу команд управления экраном.
2. Войти в пакет, построить изображение и выйти из пакета.
3. Повторить задание несколько раз до получения устойчивых навыков.

Порядок выполнения работы:

1. Запустить пакет.

2. Создать папку с названием задачи (третья кнопка в верхней части окна «Open problem files».

3. В окне «Имя файла» набрать имя задачи (оно может совпадать с именем папки». Нажать клавишу «Открыть». Создать файлы задачи (нажать клавишу «ДА»).

4. Развернуть и восстановить область создания модели (средняя клавиша справа вверху экрана).

5. Установить плоскость XOY (бинокль на «Geo Panel»), установить плоскость сетки (GEOMETRY, GRID, PLANE) и нанести сетку (GEOMETRY, GRID, GRID ON).

6. Удалить сетку (GEOMETRY, GRID, GRID OFF), построить сетку желтого цвета с шагом 10 мм по осям X и Y, 20 шагов по оси X и 30 – по оси Y. Смасштабировать размер построенной сетки по размеру экрана (клавиша «Scale avto» на «Geo Panel»). Переместить сетку (клавиша «Translate» на «Geo Panel»).

7. Построить точку 1 с координатами 10, 15, 25.

8. Поменять систему координат на пространственную (бинокль на «Geo Panel»).

9. Удалить точку 1 с использованием мыши (GEOMETRY, POINTS, EDITING, DELATE).

10. Установить плоскость XOY (бинокль на «Geo Panel»).

11. Построить точки по сетке с использованием мыши (GEOMETRY, POINTS, DEFINE): 1–0, 0, 0; 2 – 100, 40, 0; 3 – 100, 10, 0; 4 – 160, 10, 0; 5 – 160, 40, 0; 6 – 200, 40, 0; 7 – 200, 0, 0.

12. Поменять цвет точек и активизировать нумерацию точек («Status 1» на «Geo Panel»).

13. Соединить последовательно точки 1 – 7 прямыми линиями (GEOMETRY, CURVES, Line with 2Pts).

14. Удалить сетку (GEOMETRY, GRID, GRID OFF). Удалить нумерацию точек и активизировать нумерацию линий («Status 1» на «Geo Panel»).

15. Сгенерировать линии симметрично относительно оси Y (GEOMETRY, CURVES, GENERATION, SYMMETRY).

16. Сгенерировать линии поворотом относительно оси X на 90^0 (GEOMETRY, CURVES, GENERATION, GENERATE).

17. Очистить экран (клавиша внизу слева на «Geo Panel»).

18. Вывести на экран точки и линии (GEOMETRY, POINTS, EDITING, PLOT), (GEOMETRY, CURVES, EDITING, PLOT).

19. Масштабировать изображение (клавиша «Scale auto» на «Geo Panel»).

20. Увеличить изображение (клавиша на «Geo Panel»).

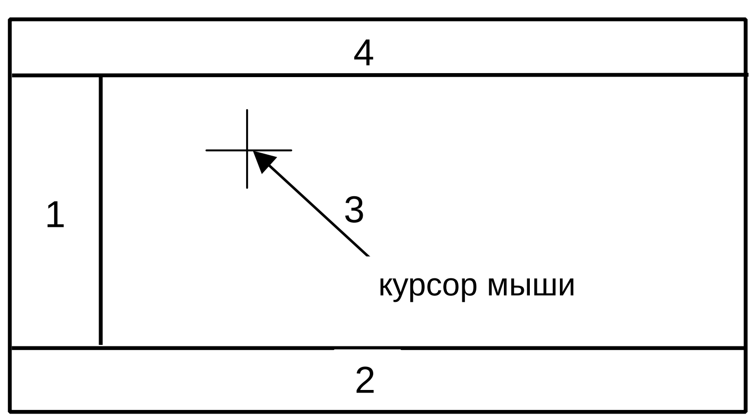
21. Масштабировать изображение (клавиша «Scale auto» на «Geo Panel»).

22. Повернуть изображение относительно оси Z, разместив построенный объект вертикально (клавиша «Rotate» на «Geo Panel»).

23. Выйти из пакета (FILES, EXIT)

Структура экрана пакета:

1. Geo-панель.
2. Область диалога.
3. Область создания модели.
4. Всплывающее меню.



Geo-панель расположена в левой части экрана. Это рабочая панель, на которой расположены основные средства управления экраном:

Active Win – установление активного окна;

New Win – открытие нового окна;

Tile – мозаичное расположение окон;

Cascade –каскадное расположение окон;

View – управление изображением (есть и «бинокль»);

Dview – 3D режим изображения;

Demo – демонстрационный режим изображения;

Config – конфигурация вида изображения;

Zoom – выделение части изображения;

Translate – перемещение изображения;

Rotate – поворот изображения;

Scale – масштабирование изображение (возможно и автоматически в размер экрана);

Console – включение (выключение окна командной строки);

Set Post – установление типа анализа;

Status 1, 2, 3 – статусы параметров вывода информации на экран (цвета и нумерация точек, линий, элементов и др.).

В нижней части панели расположены 8 окон, которые определяют:

цвета переднего плана, фона, осей координат;

обновление изображения;

очистку области создания модели;

включение режима повторения команд;

помощь по командам пакета;

информацию о пакете программ.

Область диалога расположена в нижней части экрана. В ней открываются сообщения и листинги при работе пакета.

Область создания модели расположена в центральной части экрана. Используется для построения и работы с моделью. В этой области может быть создано несколько окон.

Всплывающее меню расположено в верхней части экрана. Состоит из подменю различной степени вложенности, объединенных сходными свойствами (*работают левой кнопкой мыши*):

File – меню работы с файлами;

Edit – меню редактирования;

Geometry – меню построения модели;

Meshing – меню построения сетки МКЭ;

PropSets – меню работы со свойствами элементов;

Loads – меню нагрузок;

Control – меню общего управления пакетом;

Display – меню управления дисплеем;

Analysys – меню расчета;

Results – меню представления результатов расчета;

Windows – меню работы с окнами;

Help – меню описания команд;

Курсор мыши используется для:

выбора команд (подводится к меню и нажимается левая клавиша мыши);

вызова помощи по командам (вторая справа внизу клавиша на «Geo Panel» или справа вверху в строке меню);

активизации клавиш (подводится к клавише на «Geo Panel» и нажимается левая клавиша мыши);

выбора объектов из области создания модели (подводится к объекту (точка, линия, элемент и др.) и нажимается левая клавиша мыши).

Клавиша Escape отменяет предыдущее действие (команду).

Клавиша Input (Enter) используется для ввода команд (хотя в основном пользуются мышью).

Команды управления экраном (DISPLAY)

VIEW PARAMETER – группа команд управления видом изображения:

View – определяет направление взгляда, относительно которого объект изображается на экране;

View Save – сохранение вида изображения;

View Restore – восстановление вида изображения;

Axis – изображение осей системы координат и их цвет;

Aspect Ratio – соотношение масштабов изображения по координатным осям;

View Extents – выделение части объекта для изображения;

Repaint – перерисовывание изображения;

Reset – восстановление изображения к значениям по умолчанию;

Clean Screen – очистка экрана с заданием цвета фона;

Filter Plot – задание цвета фона экрана;

Set Entity Color – задание цвета объекта при изображении (PT, CR, VL, …);

Foreground color – задание цвета переднего плана (работает, если цвет фона совпадает с цветом изображаемого объекта);

Background color – задание цвета фона;

Config 3D View – установление параметров динамического изображения;

3D View – активизация динамического изображения.

DISPLAY OPTIONS – группа команд управления экраном:

Translate – перемещение изображения;

Rotate – поворот изображения;

Scale – масштабирование изображения;

Scale to Window Size – масштабирование до размеров окна;

Zoomin – выделение части изображения (увеличение);

Zoomout – возвращение изображения в предыдущую стадию после выполнения команды Zoomin;

Shrink – сжатие элементов перед их выводом на экран (используется для проверки связей);

Set Hide Option – установление опций поверхностей скрытых элементов перед их выводом на экран;

Hidden Element Plot – активизация вывода на экран поверхностей скрытых элементов;

Shaded Element Plot – активизация использования тени при выводе элементов на экран;

Light Source – определение координат источника света при использовании тени;

Eval Element Bound – установление опций границ поверхностей и углов элементов;

Set Bound Plot – активизация поверхностей и углов элементов при выводе на экран.

XY-PLOTS – группа команд управления выводом на плоттер.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2.
ПОСТРОЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОБРАЗОВ ОБЪЕКТОВ

Цель работы – приобрести практические навыки в построении геометрических образов объектов с использованием пакета «Cosmos».

Задание:

1. Построить геометрические образы объектов, приведенных на рис. Д.1.

Рассмотрим моделирование плоской системы, в которой алмаз выступает в роли ромба, находящегося в прямоугольнике (связке), как показано на рис. Д.1.

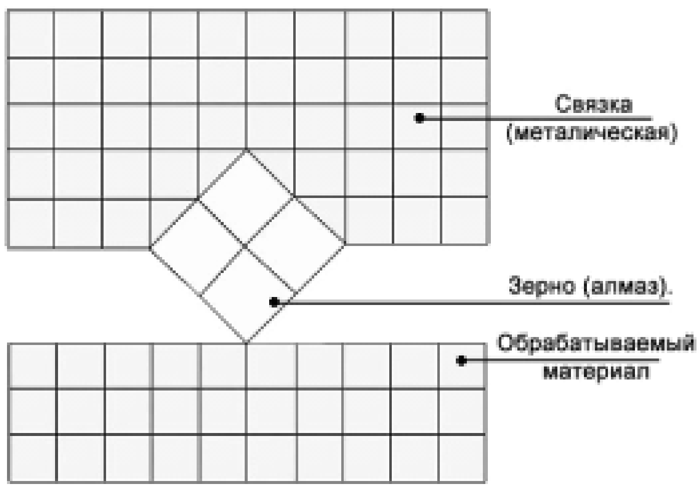


Рисунок Д.1 – Представление схемы системы «связка–зерно–обрабатываемый материал» в программе «CosmosM»

Построение модели:

Problem name;

Geometry, Grid, Plane, X – определение плоскости координатной сетки;

Geometry, Grid, Grid on – нанесение координатной сетки;

Geometry, Points, Define – построение точек;

Geometry, Points, Generation, Generate – генерация новых точек;

Geometry, Surfaces, Define by 4 Pt – построение поверхностей;

Geometry, Surfaces, Generation, Symmetry – генерация симметричных поверхностей.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3. ЛИНЕЙНЫЙ АНАЛИЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ BEAM3D

Цель работы – приобрести практические навыки в построении конечноэлементной модели, ее закреплении, нагружении, расчете и представлении результатов анализа.

Задание:

1. Построить геометрический образ объекта, приведенного на рис. Д.1.
2. Задать свойства конечных элементов, характеристики материала и геометрические характеристики сечения.
3. Создать конечноэлементную модель, закрепить и нагрузить ее.
4. Провести расчет НДС и представить результаты расчета.

Свойства:

Propsets;
Element Group – задание типа элементов;
Propsets;
Material Properties – задание свойств материала;
Propsets;
Real Constant – задание геометрических характеристик сечения.

Построение конечноэлементной модели:

Meshing;
Parametric Mesh;
Curves – построение сетки МКЭ.

Слияние узлов и перенумерация:

Meshing;
Nodes;
Merge;
Compress.

Закрепление модели:

Loads BC;
Structural;
Displacement;
Define by Nodes.

Нагружение модели:

Loads BC;
Structural;
Force;
Define by Nodes.

Расчет:

Analysis;
Static;
Run Static Analysis.

Вывод результатов расчета:

Results;
Plot;
Deformed Shape;
Animate;
Beam Diagrams;
Results;
List.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №4. ПОРЯДОК ОПЕРАЦИЙ ПО СОЗДАНИЮ 3D-МОДЕЛИ В ПАКЕТЕ «COSMOSM»

1. Запустить пакет.
2. Создать папку с названием задачи (третья кнопка в верхней части окна «Open problem files».
3. В окне «Имя файла» набрать имя задачи (оно может совпадать с именем папки». Нажать клавишу «Открыть». Создать файлы задачи (нажать клавишу «ДА»).
4. Развернуть и восстановить область создания модели (средняя клавиша справа вверху экрана).
5. Установить плоскость XOY (бинокль на «Geo Panel»), установить плоскость сетки (GEOMETRY, GRID, PLANE) и нанести сетку (GEOMETRY, GRID, GRID ON).
6. Удалить сетку (GEOMETRY, GRID, GRID OFF), построить сетку желтого цвета с шагом 10 мм по осям X и Y, 20 шагов по оси X и 30 – по оси Y. Смасштабировать размер построенной сетки по размеру экрана (клавиша «Scale avto» на «Geo Panel»). Переместить сетку (клавиша «Translate» на «Geo Panel»).
7. Построить точку 1 с координатами 0, 0, 0.
8. Построить точку 2 с координатами 0, 40, 0.
9. Построить точку 3 с координатами 100, 40, 0.
10. Построить точку 4 с координатами 100, 0, 0.
11. Построить точку 5 с координатами 0, 60, 0.
12. Построить точку 6 с координатами 0, 100, 0.
13. Построить точку 7 с координатами 100, 100, 0.
14. Построить точку 8 с координатами 100, 60, 0.
15. Построить точку 9 с координатами 50, 40, 0.
16. Построить точку 10 с координатами 30, 60, 0.
17. Построить точку 11 с координатами 50, 80, 0.
18. Построить точку 12 с координатами 70, 60, 0. *(Таким образом, благодаря точкам, мы создали узлы будущих 3D-моделей).*

Теперь создаём контур модели при помощи линий: команда Line with 2Pts).

19. Активизировать нумерацию точек («Status 1» на «Geo Panel»).

20. Соединить последовательно точки 1, 3, 2, 4 прямыми линиями (GEOMETRY, CURVES, Line with 2Pts).

21. Соединить последовательно точки 1, 5, 13, 7, 8, 14, 6, 2 прямыми линиями (GEOMETRY, CURVES, Line with 2Pts).

22. Соединить последовательно точки 9, 4, 10, 12, 11 прямыми линиями (GEOMETRY, CURVES, Line with 2Pts).

После этих действий мы получили замкнутые контуры рис. Д.2.

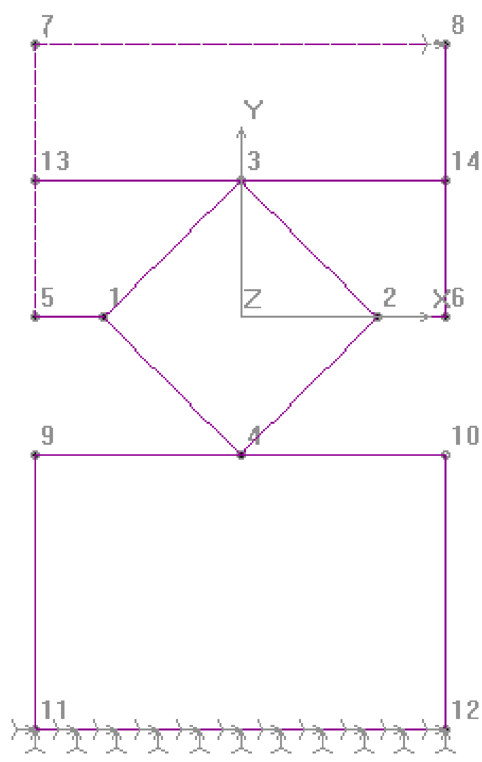


Рисунок Д.2 – Замкнутые контуры будущих элементов

23. Geometry, Surfaces, Define by 3 Pt – построение поверхности 1 на плоскости по точкам 1, 2, 9.

24. Geometry, Surfaces, Define by 3 Pt – построение поверхности 2 на плоскости по точкам 1, 9, 4.

25. Geometry, Surfaces, Define by 3 Pt – построение поверхности 3 на плоскости по точкам 9, 3, 4.
26. Geometry, Surfaces, Define by 4 Pt – построение поверхности 4 на плоскости по точкам 5, 6, 11, 10.
27. Geometry, Surfaces, Define by 4 Pt – построение поверхности 5 на плоскости по точкам 11, 7, 8, 12.
28. Geometry, Surfaces, Define by 4 Pt – построение поверхности 6 на плоскости по точкам 10, 11, 12, 9.

Далее задаем свойства поверхностям.

29. Propsets, Element Group – задание типа элементов для поверхности 1-6.
30. Propsets, Material Properties – задание свойств материала для элементов 1–6.

Построение конечноэлементной модели:

31. Meshing, Parametric Mesh, Curves – построение сетки МКЭ для элементов 1–6;
32. Слияние узлов Meshing, Nodes;
33. Перенумерация Meshing, Merge, Compress;
34. Закрепление модели Loads BC, Structural;
35. Loads BC, Force;
36. Loads BC, Define by Nodes;
37. Расчёт Analysis, Static, Run Static Analysis

Вывод результатов расчета:

38. Results,Plot
39. Results, Deformed Shape
40. Results, Animate
41. Results, Beam Diagrams
42. Results, List
43. File, save images
44. Выйти из пакета (FILES, EXIT)

Конечноэлементная сетка модели представлена на рис. Д.3.

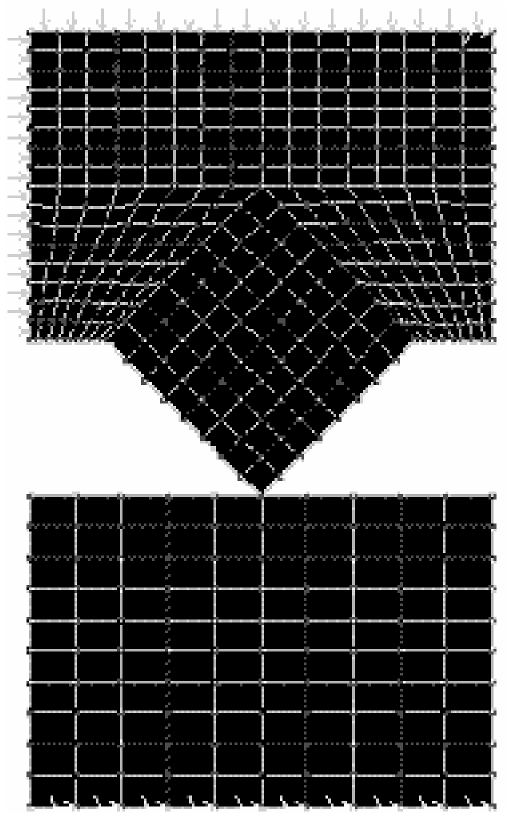


Рисунок Д.3 – Изображение сетки конечных элементов

После выполнения всех перечисленных выше команд мы получаем ответ в виде графического решения (рис. Д.4), что в виде текстовой документации (координаты точек и соответствующие им значения температуры, напряжений и т.д.) представляет собой 150 страниц текста.

Данное графическое решение характеризует каждую точку 3D-модели, присваивая ей конкретное рассчитанное значение напряжения, что является очень важным фактором в методологии НДС.

Расчет тепловой задачи:

Analysis, Heat Transfer, Thermal Analysis Options (Transient);
Analysis, Heat Transfer, Run Thermal Analysis.

Вывод результатов расчета тепловой задачи:

Result, Plot, Thermal.

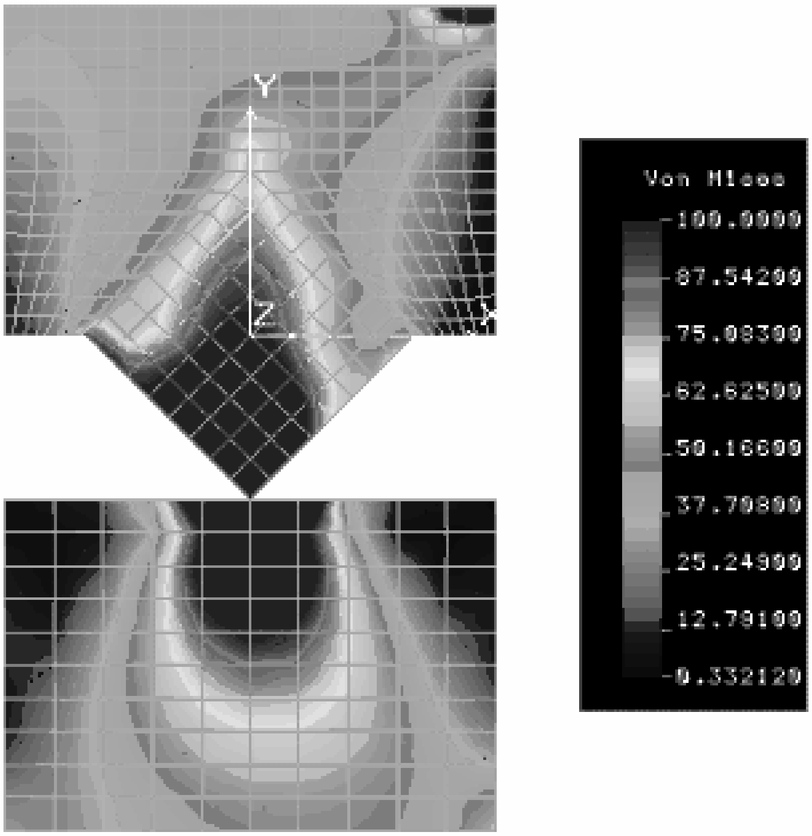


Рисунок Д.4 – Графическое решение задачи НДС в пакете «CosmosM»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. д-ра техн. наук проф. А. Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.

2. Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное изд. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.

3. Алмазная обработка технической керамики / Д. Б. Ваксер, В. А. Иванов, Н. В. Никитков, В. Б. Рабинович. – Л.: Машиностроение, 1976. – 160 с.

4. Байкалов А. К. Введение в теорию шлифования материалов. – К.: Наукова думка, 1978. – 207 с.

5. Беззубенко Н. К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов: Дис... докт. техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 1996. – 468 с.

6. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. – М.: Вычислительный центр АН СССР, 1968. – 474 с.

7. Броек Д. Основы механики разрушения. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.

8. ГОСТ 9206-80 Порошки алмазные. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 33 с.

9. Грабченко А. И. Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов: Диссертация в форме научного доклада докт. техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 1995. – 59 с.

10. Грабченко А. И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. – Харьков: Вища шк., 1985. – 184 с.

11. ДСТУ 3292-95. Порошки алмазные синтетические. Общие технические условия. – Киев: Госстандарт Украины. – 1996. – 71 с.

12. Демкин Н. Б. Контактирование шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 227 с.

13. Динамика удара: Пер. с англ. / Зукас Дж. А., Николас Т., Свифт Х.В., Джонсон В. Л. и др. – М.: Мир, 1985. – 296 с.

14. Доброскок В. Л. Научные основы формирования рабочей поверхности кругов на токопроводных связках в процессе шлифования: Дис...докт. техн. наук: 05.03.01 – Харьков, 2001. – 447 с.

15. Инструменты из сверхтвердых материалов: Учебное пособие / Под ред. Н. В. Новикова. – Киев: ИСМ НАНУ, 2002. – 528 с.

16. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Рыжов Э. В., Сагарда А. А., Ильицкий В. Б., Чеповецкий И. Х. – К.: Наук. думка, 1979. – 244 с.

17. Кизиков Э. Д., Верник Е. Б., Кошевой Н. С. Алмазно-металлические композиции. – К.: Техніка, 1988. – 136 с.

18. Колкер Я. Д. Математический анализ точности механической обработки деталей. – К.: Техника, 1976. – 200 с.

19. Костецкий Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении. – Киев.: Техніка, 1976. – 232 с.

20. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

21. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.

22. Мишнаевский Л. Л. Износ шлифовальных кругов. – К.: Наукова думка, 1982. – 192 с.

23. Мюллер П., Нойман П., Шторм Р. Таблицы по математической статистике: Пер. с нем. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 278 с.

24. Никитин Ю. И. Технология изготовления и контроль качества алмазных порошков. – К.: Наук. думка, 1984. – 264 с.

25. Новиков Н. В., Майстренко А. Л., Кулаковский В. Н. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1993. – 220 с.

26. Основы алмазного шлифования / Семко М. Ф., Грабченко А. И., Раб А. Ф., Узунян М. Д., Пивоваров М. С. – К.: Техника, 1978. – 192 с.

27. Островский В. И. Теоретические основы процесса шлифования. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 144 с.

28. Попилов Л. Я. Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов. – Л.: Машиностроение, 1971. – 544 с.

29. Попов С. А., Малевский Н. П., Терещенко Л. М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с.

30. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: Уч. пособие / Под. ред. А. И. Грабченко. – Харьков: ХГПУ, 1999. – 436 с.

31. Резников А. Н. Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.

32. Рыжов Э. В., Колесников Ю. В., Суслов А. Г. Контактирование твердых тел при статических и динамических нагрузках. – Киев: Наук. думка, 1982. – 168 с.

33. Семко М. Ф., Грабченко А. И., Ходоревский М. Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. – Харьков: Вища школа, 1980. – 192 с.

34. Синтетические сверхтвердые материалы: В 3-х т. Т. 2. Композиционные инструментальные сверхтвердые материалы / Редкол.: Новиков Н. В. (отв. ред.) и др. – Киев: Наук. думка, 1986. – 280 с.

35. Справочник по алмазной обработке металлорежущего инструмента / Под ред. В. Н. Бакуля. – К.: Техника, 1971. – 208 с.

36. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган: Пер. с англ. – М.: Наука, 1979. – 832 с.

37. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.

38. Точность производства в машиностроении и приборостроении / Под ред. А. И. Гаврилова. – М.: Машиностроение, 1973. – 567 с.

39. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. Кн. 2. / Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1979. – 358 с.

40. Тюрин Ю. Н., Макаров А. А. Статистический анализ данных на компьютере / Под ред. В. Э. Фигурнова. – М.: ИНФРА-М, 1998. – 528 с.

41. Федорович В. А. Разработка научных основ и способов практической реализации управления приспосабливаемостью при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: Дис... докт. техн. наук: 05.03.01. – Х., 2002. – 469 с.

42. Хастингс Н., Пикок Дж. Справочник по статистическим распределениям: Пер. с англ. – М.: Статистика, 1980. – 95 с.

43. Чачин В. Н., Дорофеев В. Д. Профилирование алмазных шлифовальных кругов. – Минск: Наука и техника, 1974. – 160 с.

44. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

45. Ящерицын П. И., Дорофеев В. Д., Гринин Г. Н. Профилирование алмазно-абразивных инструментов пластическим деформированием. – Саратов: Изд-во Сарат. ун.-та, 1982. – 112 с.

46. Kaczmarek J.: Zastosowanie metodoy SCGC do oceny technologii i prognozy uzytkowania powierzchni obrobianych skawaniem.Prace Miedzynaroddowego Sympozjum nt.: "Zaganienia Inzynierii Powiezchni w Obrobce Skawaniem". Wroslaw – Szklarska Poreba, czerwiec 1999.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Навчальне видання

ГРАБЧЕНКО Анатолій Іванович,
ДОБРОСКОК Володимир Ленінмирович,
ФЕДОРОВИЧ Володимир Олексійович

3D МОДЕЛЮВАННЯ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНИХ ІНСТРУМЕНТІВ І ПРОЦЕСІВ ШЛІФУВАННЯ

Навчальний посібник
Російською мовою

Роботу до друку рекомендував *О.М. Шелковий*

В авторській редакції

Комп’ютерна верстка *В.О. Склепус*

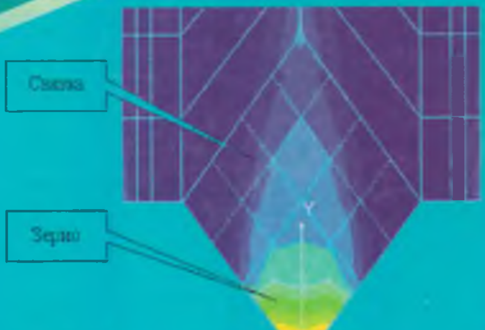
План 2004, поз. 90/144-04

Підп. до друку 17.10.2006 р. Формат $60 \times 84\ 1/16$. Папір офісний. Riso-друк. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк.арк. 21,1. Обл.-вид. арк. 22,8. Наклад 300 прим.Зам. № 356. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ».
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07. 2000 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня НТУ «ХПІ». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

В учебном пособии излагаются основы 3D моделирования алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования. Рассматриваются современные тенденции объектно-ориентированного статистического моделирования применительно к алмазно-абразивным инструментам, напряженно-деформированному состоянию зоны шлифования, а также вопросы практического применения результатов 3D моделирования. Предназначено для студентов, магистров и аспирантов, преподавателей технических вузов, а также может быть полезным для специалистов-технологов.



ISBN 966-593-457-0