

УДК 621.923

В.А. ФЕДОРОВИЧ, д-р техн. наук, Харьков,
В.А. ЗАЛОГА, д-р техн. наук, Сумы,
И.Н. ПЫЖОВ, д-р техн. наук, Харьков,
Д.В. КРИВОРУЧКО, д-р техн. наук, Сумы,
Д.В. ФЕДОРЕНКО, Харьков, Украина

МЕТОДОЛОГИЯ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Розроблено єдину комплексну методологію тривимірного моделювання фізичних процесів виготовлення алмазно-композиційних матеріалів і процесів алмазно-абразивної та лезової обробки інструментами з них. Створення системи 3D-CAD моделювання процесів виготовлення абразивно-алмазних інструментів і процесів обробки дозволяє істотно підвищити вірогідність отриманих результатів, скоротити обсяг експериментальних досліджень для визначення оптимальних умов шліфування і розробити нові технології, інструменти та устаткування.

Ключові слова: процес шліфування, алмазно-композиційний матеріал, алмазозносний шар, 3D моделювання, напружено-деформований стан, умови обробки, характеристика круга, еквівалентні напруги, ультразвукові коливання, правка круга

Разработана единая комплексная методология 3D моделирование физических процессов изготовления алмазно-композиционных материалов и процессов алмазно-абразивной и лезвийной обработки инструментами из них. Создание системы 3D-CAD моделирование процессов изготовления абразивно-алмазных инструментов и процессов обработки позволяет существенно повысить достоверность полученных результатов, сократить объем экспериментальных исследований для определения оптимальных условий шлифования и разработать новые технологии, инструменты и оборудование.

Ключевые слова: процесс шлифования, алмазно-композиционный материал, алмазозносный слой, 3D моделирование, напряженно-деформированное состояние, условия обработки, характеристика круга, эквивалентные напряжения, ультразвуковые колебания, правка круга

The three-dimensional (3D-CAD) methodology of integrated study of interdependent processes of design, manufacture and operation of diamond-abrasive tools and reliability growth of single-point tool at stage of their sharpening is developed. Creation of system of 3D simulation of diamond-abrasive tools and machining processes allows to increase essentially probability of obtained results and to reduce scope of experimental research for defining the best grinding conditions and to develop new technologies, tool and equipment.

Keywords: grinding process, diamond composite material, diamond layer, 3D modeling, stress-strain state, the processing conditions, terms of characterization, equivalent stresses, ultrasonic vibration, correction range

1. Постановка проблеми. К труднообрабатываемым материалам в первую очередь относятся алмазно-композиционные материалы (АКМ). Широкое использование АКМ как особого класса обрабатываемых материалов (ОМ) в различного рода изделиях потребовало разработки современных технологий их высокопроизводительной и прецизионной

обработки. В настоящее время отсутствует единая комплексная методология трёхмерного (3D-CAD) моделирования физических процессов алмазно-абразивной и лезвийной обработок, однако имеется реальная перспектива её разработки. Создание такой методологии позволит существенно сократить объём экспериментальных исследований для определения рациональных конструктивных параметров алмазно-абразивных и лезвийных инструментов, оптимальных условий их изготовления и использования.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Современные тенденции создания наукоемкой продукции характеризуются резким расширением приложений математики, во многом связанным с созданием и развитием средств вычислительной техники [1]. Развитие вычислительной техники открывает перспективы разработки 3D методологии комплексного исследования взаимосвязанных процессов изготовления и эксплуатации АКМ и режущих инструментов из них, повышения их надежности. В мировой практике наблюдается тенденция перехода от двухмерного к трехмерному компьютерному моделированию, диктуемая необходимостью повышения адекватности и информационной достаточности моделей. Предпосылкой такого перехода является развитие метода конечных элементов, аппаратных возможностей вычислительной техники и программного обеспечения. Создание методологии 3D компьютерного моделирования позволит существенно сократить объем экспериментальных исследований для определения рациональных структурных параметров АКМ, оптимальных условий их изготовления и использования.

Создание методологических основ и системы 3D-CAD моделирования АКМ на этапах их изготовления и эксплуатации позволит существенно повысить эффективность их обработки и применения [2]. Анализ литературных источников в исследуемой области показал, что данные по 3D моделированию процессов шлифования и изготовления алмазно-абразивных инструментов практически отсутствуют.

3. Цель исследования. Разработка теоретических основ и средств реализации методологии компьютерного 3D моделирования физических процессов для разработки оптимальных ресурсосберегающих технологий абразивной и лезвийной обработки инструментами из алмазных композиционных материалов (АКМ).

4. Материалы исследований. Предлагаемая 3D методология исследования процессов изготовления и эксплуатации АКМ охватывает все основные этапы жизненного цикла изделия. В качестве АКМ будем рассматривать все алмазосодержащие композиции в широком смысле, включая алмазно-абразивные инструменты на различных связках и другие алмазосодержащие инструментальные материалы. Методология 3D моделирования включает следующие этапы: 1 – трехмерное компьютерное моделирование процесса спекания АКМ для определения условий, при

которых сохраняется целостность алмазных зерен; 2 – трехмерное компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны шлифования с целью определения рациональных условий обработки; 3 – трехмерное компьютерное моделирование процесса правки абразивных кругов алмазным инструментом; 4 – трехмерное исследование параметров топографии рабочей поверхности круга (РПК) и обработанной поверхности методом лазерного сканирования; 5 – трехмерное моделирование процесса заточки лезвийного инструмента с целью определения условий его безотказной работы; 6 – трехмерное компьютерное моделирование НДС зоны лезвийной обработки с целью определения рациональных режимов резания и геометрии инструмента из АКМ; 7 – разработка экспертной системы определения рациональных характеристик АКМ и режимов обработки этих материалов, их использования в режущем инструменте. Таким образом, реализуется идеология полной компьютерной автоматизации моделирования всех процессов, включая изготовление, обработку и эксплуатацию АКМ. Некоторые из этих этапов изложены в сборнике, посвященном юбилею профессора Семко М. Ф. [2].

Реализация предложенной последовательности экспериментальным путем является чрезвычайно трудоемким и дорогостоящим процессом.

Использование компьютерных информационных технологий на всех этапах жизненного цикла АКМ рассматривается как приближение к идеологии CALS-технологии (Computer-Aided Logistics Support) [3-4]. Они обеспечивают компьютерное управление жизненным циклом изделия на всех этапах: разработки концепции изделия; проведения научно-исследовательских работ; проектирования, производства; эксплуатации изделия; модернизации изделия; обеспечения ремонта и технического обслуживания изделия; утилизации.

Для реализации поставленных задач изучения НДС в зоне обработки и в процессе изготовления инструмента были использованы расчетные комплексы ANSYS, LS-DYNA, Third Wave AdvantEdge, CosmosWorks, Abaqus предназначенные для исследовательских расчетов методом конечных элементов. Для построения 3D-моделей, имитирующих упомянутые процессы, применялась система автоматизации проектных работ (САПР) в трёх измерениях (SolidWorks).

В плане моделирования процессов спекания АКМ и исследования зоны обработки эти пакеты (в универсальной комплектации) позволяют решать следующие классы задач: определение перемещений, деформаций и напряжений (НДС) в системе «алмазные зерна – связка - ОМ» при

статических воздействиях (линейная статика); определение НДС системы с использованием нелинейных моделей (физическая, геометрическая нелинейность); НДС при контакте деформируемых твердых тел; НДС в элементах системы при наличии трещин; анализ частот и форм собственных колебаний конструкции; динамический гармонический анализ и случайный отклик – оценка поведения системы при внешнем полигармоническом или случайном воздействии; динамические переходные процессы – расчет поведения системы во времени при действии на нее нестационарной внешней нагрузки; анализ усталостного разрушения элементов системы; анализ стационарной и нестационарной гидродинамики; стационарные и нестационарные нелинейные тепловые процессы – определение распространения тепловых потоков, анализ температурных полей и деформаций; определение чувствительности результатов всех видов анализа к изменению свойств элементов системы; многокритериальная оптимизация с использованием одновременно ограничений разного типа с возможностью управления пользователем ходом процесса; адаптивный анализ напряжений.

Общая концепция проведения статических модельных экспериментов представлена на рис. 1.

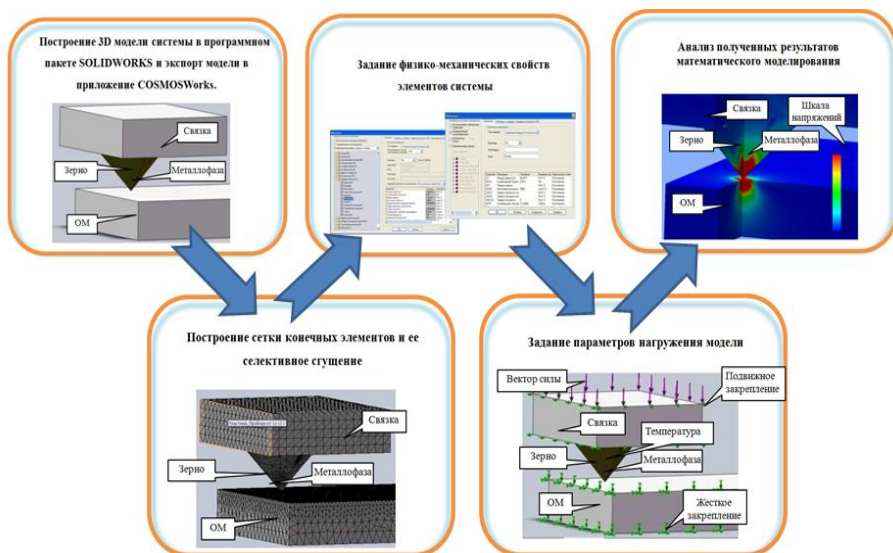


Рисунок 1 – Последовательность статического 3D моделирования процесса шлифования

Общая концепция проведения динамических модельных экспериментов представлена на рис 2.

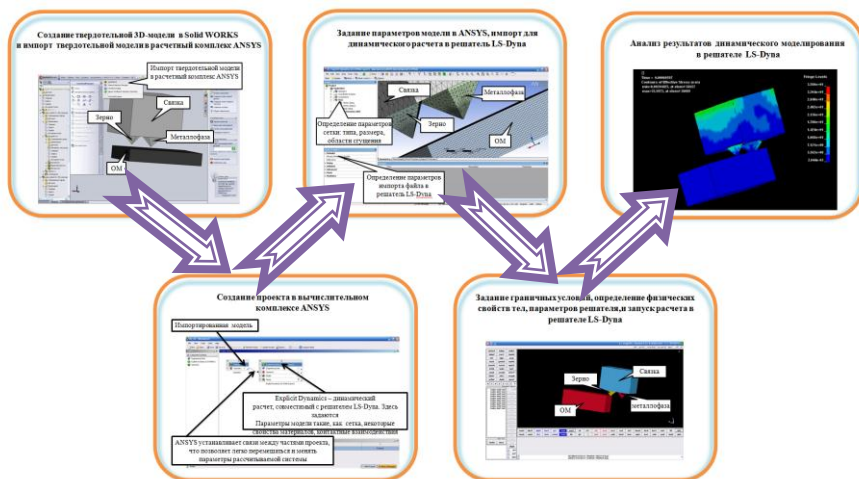


Рисунок 2 – Последовательность динамического 3D моделирования процесса шлифования

Моделирование процесса спекания АКМ [2]. Эффективность работы инструментов из АКМ обусловлена рядом причин, в число которых входит дефектность структуры, связанная с разрушением части зерен в процессе изготовления инструмента. В институте сверхтвердых материалов НАН Украины, под руководством академика Новикова Н. В. доказали, что при спекании композиционных алмазосодержащих материалов типа «твесал» до 90% алмазных зерен разрушаются [5]. Подобие процессов спекания композиционных алмазосодержащих материалов типа «твесал» и алмазосодержащего слоя шлифовальных кругов на металлических и керамических связках, а также измерение размеров зерен алмазного порошка, извлеченных из фрагмента алмазосодержащего слоя не работавшего круга, свидетельствуют о дроблении алмазных зерен в процессе его изготовления. Факторами, в значительной степени влияющими на целостность зерен, являются состав связки, марка алмазного зерна, его зернистость и концентрация в спеке, а также технологические особенности изготовления АКМ.

Задачей процесса 3D моделирования НДС зоны спекания АКМ является определение оптимального сочетания прочностных свойств связки и алмазных зерен, а также зернистости и концентрации последних, при которых обеспечивается сохранение целостности алмазных зерен в процессе спекания

АКМ.

Применительно к процессу спекания фрагмент алмазонасного слоя круга моделировался кубом связки с размерами 300х300х300 мкм с помещенными в него алмазными зернами в форме эллипсоида вращения размерами 120х100 мкм, что соответствует 100% концентрации алмазного круга. Металлофаза в алмазном зерне моделировалась в виде прослойки толщиной 5-10 мкм различной формы и длины. Схема и конечно-элементная (КЭ) модель процесса спекания АКМ представлена на рис. 1.

Расчеты по методу конечных элементов в пакете прикладных программ «Cosmos» и «Ansys» позволили в компьютерном режиме количественно оценить главные и приведенные напряжения, энергию деформации и плотность энергии деформации в спекаемых элементах в зависимости от их размеров, физико-механических свойств и условий спекания (температура, давление). Объемы материалов считались разрушенными, если приведенные напряжения и/или плотность энергии деформации в них превышали соответствующие предельные значения.

Пример разработанной 3D модели системы «связка – покрытие - алмазное зерно - металлофаза» с граничными условиями, температурным и силовым нагружением, а также КЭ модель представлена на рис. 3.

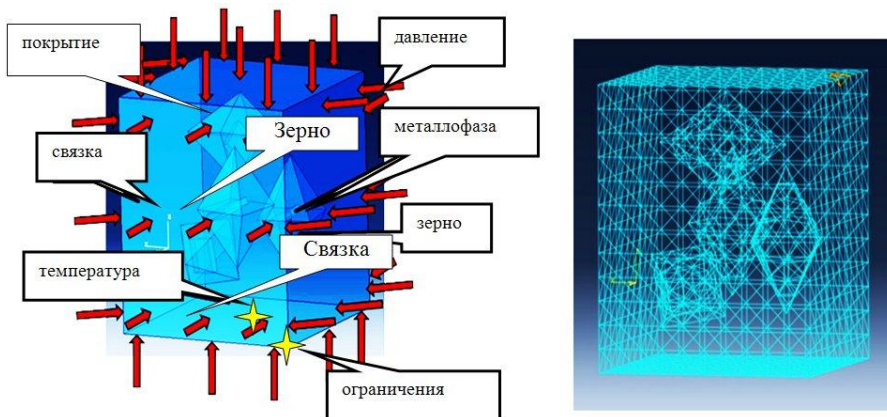


Рисунок 3. – Схематическая (а) и КЭ (б) модели системы «связка – покрытие - алмазное зерно - металлофаза»

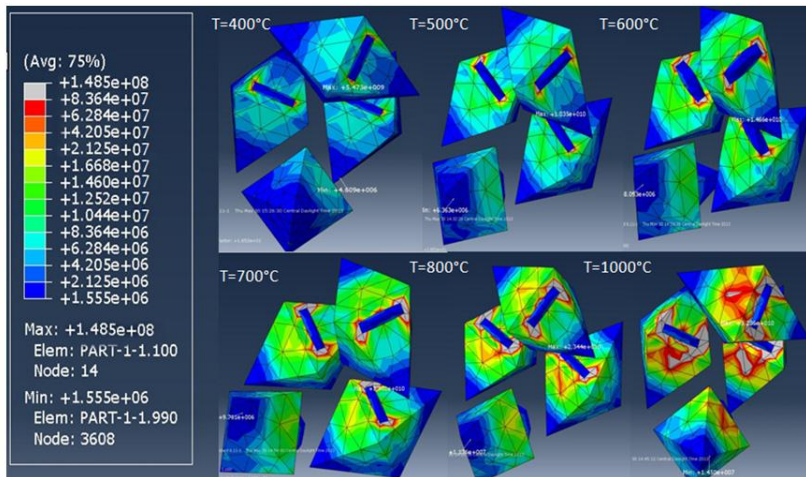
Моделировался процесс спекания АКМ различной концентрации на различных металлических, керамических и органических связках с различными по прочности алмазными зернами от AC2 до AC160T. Модель нагружалась давлением и температурой, соответствующей реальному процессу спекания АКМ.

На первом этапе расчеты проводились для фрагмента алмазонасного слоя, включающего единичное алмазное зерно, окруженное массивом металлической связки. При этом варьировались размер зерна, соответствующий зернистостям от 50/40 до 500/400, температура и давление спекания, а также физико-механические свойства исследуемых компонентов спека. На втором этапе рассматривался фрагмент алмазонасного слоя, включающий несколько алмазных зерен, объединенных связкой (рис. 3, а). В этой серии варьировалось соотношение размеров алмазных зерен и размеров массива связки, окружающего эти зерна, что соответствовало различным значениям зернистости и концентрации (от 5 до 200%) алмазов в спекаемом слое. В модели зерна и связка рассматривались упругими сплошными телами. Алмазные зерна моделировались в виде эллипсоидов вращения с размерами от 50x30 до 500x300 мкм в зависимости от рассматриваемой зернистости. Наличие металлической фазы в алмазных зернах моделировалось произвольно ориентированными прослойками, объемное содержание которых составляло 0,1–10% в зависимости от марки зерна. Связка представлялась в виде призматического фрагмента с размерами от 0,5x0,5x1,1 до 3x3x6 в зависимости от марки, размера и концентрации зерен. Модель нагружалась статической одноосной равномерно распределенной нагрузкой в виде прикладываемых давления с учетом температуры.

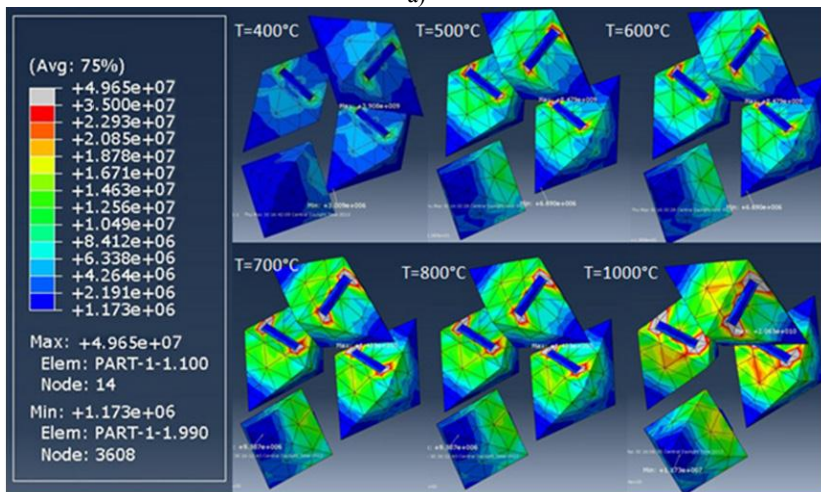
Были проведены теоретические исследования процесса спекания АКМ на различных связках с целью определения условий, при которых обеспечивается целостность алмазных зерен в материале. Установлено, что напряжения, превышающие пределы прочности алмазных зерен и располагающиеся вдоль прослоек металлофазы, обуславливают появление внутренних трещин в зерне. Напряжения на периферии спекаемого зерна распределены таким образом, что могут приводить к скалыванию субмикрокромки на зернах и тем самым скруглять режущие кромки. Это впоследствии может отрицательно сказаться на режущей способности зерен в алмазном круге [2]. Результаты 3D моделирования в виде эпюр распределения напряжений при спекании кругов, возникающих при одновременном термосиловом нагружении для случаев металлофазы разного состава представлены на рис. 4.

Влияние пористости связки. Часть объема круга, не занятая абразивом и связкой, представлена порами, заполненными воздухом (или пропиткой в случае импрегнированных кругов). Роль пор, их размеров и плотности распределения настолько велика, что они считаются третьей по значимости (после абразивных зерен и связки) составляющей структуры алмазного круга.

Высокая пористость круга способствует лучшему подводу охлаждающей жидкости в зону шлифования и отводу отработанного шлама, что уменьшает «засаливание» кругов.



а)



б)

Рисунок 4 – Эпюра распределения НДС в системе «алмазное зерно – металлофаза - связка» при термосиловом нагружении: а) металлофаза на основе меди; б) металлофаза на основе железа

Информация в литературе о влиянии пористости круга на целостность алмазных зерен при спекании нами не найдена. Пористость абразивного инструмента может изменяться в широких пределах: от 29 об. % (для обдирочных и отрезных кругов) до 65 об. % (для кругов, предназначенных для шлифования труднообрабатываемых металлов и сплавов). Однако, следует отметить, что высокопористые круги изготавливают на основе абразивно-керамических композиций с использованием в качестве абразива электрокорунда, карбида кремния или эльбора. Учитывая вышеизложенное, с использованием моделей, отражающих количественный показатель пористости (об. % пор) было проанализировано влияние пористости связки на НДС исследуемой системы. Пример такой модели представлен на рис. 5, а и результаты расчета НДС в пористом круге на рис. 5, б.

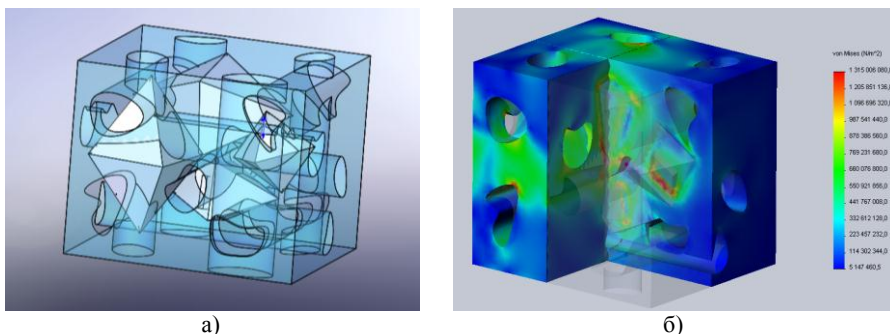


Рисунок 5 – Модель системы «металлофаза – зерно – связка - поры» (а) и распределение напряжений при спекании композита, содержащего алмазные зерна АС4 125/100 и керамическую связку К1 при концентрации пор 30 об. % (б)

Варьированием сочетания различной прочности алмазных зерен и их концентрации в круге для различных связок определялось такое из них, при котором обеспечивалось сохранение целостности алмазов. Установлено, что, например, далеко не все серийно выпускаемые алмазные круги с используемым сочетанием марок алмазных зерен с металлическими и керамическими связками могут быть изготовлены со стандартной концентрацией алмазных зерен без нарушения их целостности. 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 [6], [7].

Проведенными расчетами установлены оптимальные сочетания свойств связки и алмазных зерен с предельно допустимой концентрацией их в АКМ, обеспечивающие сохранение их целостности в процессе изготовления. Полученные на первом этапе оптимальные соотношения прочностей связки, алмазных зерен и их концентрация в алмазно-абразивном инструменте являются лишь ограничивающими параметрами и должны быть уточнены для процесса алмазного шлифования в зависимости от прочностных свойств обрабатываемого материала.

Исследование процесса микрорезания единичным алмазным зерном. Использование специализированного программного пакета «Third Wave Advant Edge», базирующегося на методе конечных элементов, позволяют проводить модельные эксперименты по исследованию процесса микрорезания единичными алмазными зернами, различной геометрии и в различных условиях нагружения системы, различных материалов. Компьютерное 3D моделирование процесса микрорезания различными алмазными зернами позволяет в динамике проследить изменение полей напряжений, температур и деформаций при обработке различных материалов (рис. 6).

Результаты модельных экспериментов процесса микрорезания единичным алмазным зерном позволяют определять рациональные сочетания прочностных свойств алмазных зерен и обрабатываемого материала и рациональные режимы шлифования (скорость, подача, глубина).

Моделирование процесса алмазно-абразивной обработки АКМ. Поскольку эффективность любого процесса алмазно-абразивной обработки определяется уровнем НДС зоны шлифования, НДС моделировалось в зоне обработки в различных условиях. Количественная оценка уровня напряжений, энергии деформации или плотности энергии деформации, возникающих в ОМ, алмазных зернах и связке круга при различных условиях шлифования открывает новые возможности для определения условий повышения эффектности процесса обработки.

Исследование НДС зоны шлифования проведены применительно к процессу алмазного шлифования АКМ. Основной задачей исследования НДС зоны шлифования являлось определение условий, обеспечивающих рациональное распределение энергии, подводимой в зону обработки, между элементами системы. Методика 3D моделирования НДС системы «АКМ – зерно - связка» позволяет определять энергию и плотность энергии деформации в каждом элементе системы при различных условиях

нагружения и определять условия, при которых максимальная часть подводимой энергии в зону шлифования будет направлена на микроразрушение АКМ, минимизируя разрушение алмазных зерен и исключая их выпадение из связки.

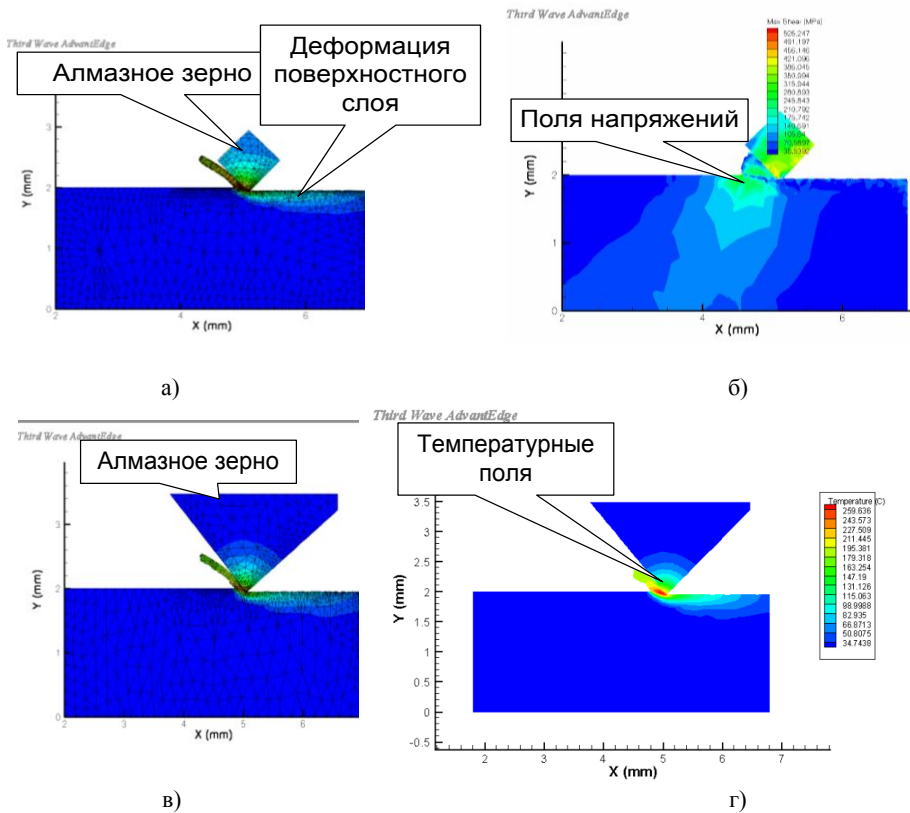


Рисунок 6 – Моделирование процесса микрорезания единичным алмазным зерном
 а) – КЭ модель микрорезания зерном с площадкой износа;
 б) – результаты расчета полей напряжений;
 в) – КЭ модель микрорезания острым алмазным зерном;
 г) – результаты расчета температурных полей

Использование современных пакетов прикладных программ для метода конечных элементов типа «Cosmos» при 3D моделировании НДС единой системы «ОМ – зерно - связка» позволило в максимально приближенных к реальным условиям оценивать влияние физико-механических свойств алмазных зерен, ОМ и связки на уровень главных и приведенных силовых,

температурных, и термосиловых напряжений, энергии и плотности энергии деформации. Методика позволяет оценивать 3D НДС всех элементов системы одновременно, что важно при определении области оптимальных сочетаний их физико-механических свойств и режимов взаимодействия.

Для определения фактической площади контакта в системе «РПК - ОМ» реализована методика лазерного сканирования и компьютерной обработки топографии рабочей поверхности круга (РПК) и обработанной поверхности, позволяющая исследовать изменения 3D параметров РПК и ОМ, субмикрорельефа отдельных алмазных зерен, в компьютерном режиме оценивать относительную опорную площадь топографии поверхности t_{ps} . [8]. 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 «АКМ - зерно», который трудно получить другими способами. А поскольку именно субмикрорельеф алмазных зерен определяет эффективность микроразрушения ОМ, исследование этого параметра представляется чрезвычайно важным. Примеры 3D топографии рабочей поверхности круга (РПК) и ее параметров приведены на рис. 7.

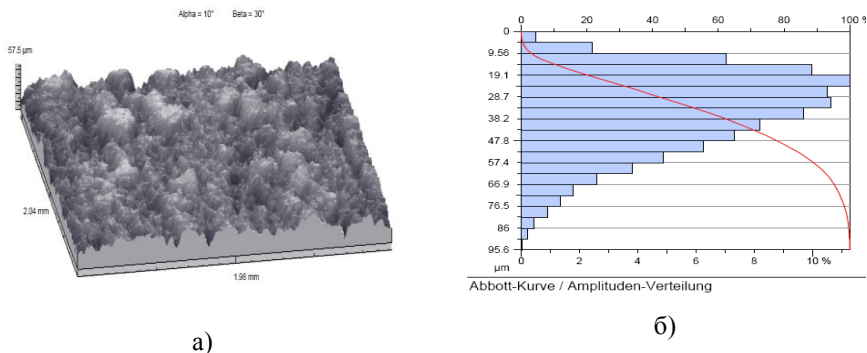


Рисунок 7 – 3D топография поверхности РПК (а)
и плотность распределения относительной опорной площади РПК (б)

Для повышения эффективности процессов алмазного шлифования вопросы оптимального сочетания физико-механических свойств алмазных зерен их зернистости и концентрации должны решаться для каждой конкретной металлической или керамической связки в зависимости от физико-механических свойств ОМ. Оптимальное сочетание прочностей связки, зерен и их концентрация должно обеспечивать такой уровень НДС в зоне шлифования, при которых: обеспечивается удержание алмазных зерен в

связке; исключается хрупкое микроразрушение алмазных зерен (при шлифовании «мягких» материалов) или их самозатачивания без образования площадок износа (при шлифовании «твердых» материалов); обеспечиваются максимальные напряжения в ОМ (съем припуска); исключается образование недопустимого дефектного слоя (брак).

Расчетная схема и пример результатов расчета НДС системы «АКМ – зерно – связка» приведен на рис. 8.

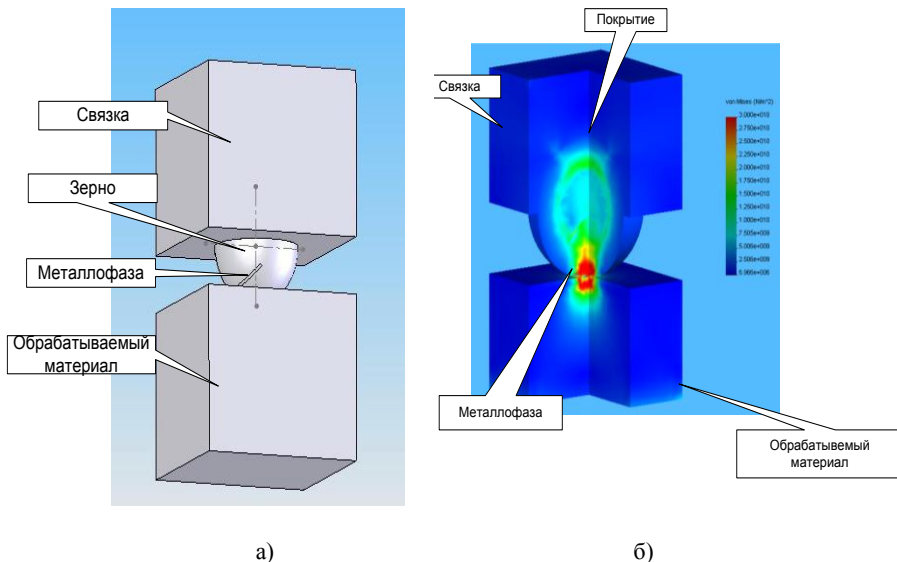


Рисунок 8 – Расчетная схема 3D модели зоны шлифования (а) и пример результатов расчета 3D НДС системы «АКМ – зерно – связка»

Методика 3D моделирования позволяет теоретически определять область оптимального разрушения элементов системы «АКМ – зерно – связка», в которой зерно удерживается в связке и не разрушается, а АКМ разрушается в контакте, но не растрескивается при воздействии общей нагрузки всех зерен, т.е. исключается брак. Теоретически может быть определена область оптимальных условий алмазного шлифования различных марок АКМ, в том числе и вновь создаваемых. Дальнейшие экспериментальные исследования с целью сокращения их объема, будут проводиться в этой области. Такое соотношение прочностных свойств ОМ, 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 АКМ, но и твердых сплавов, керамики, полимеров и других ОМ является одним из важных резервов повышения эффективности конкретного вида обработки. Установлено, что прочность связки круга является важнейшим параметром, определяющим не только степень алмазодержания, но и производительность процесса шлифования АКМ. Концентрация алмазных зерен в круге должна назначаться, исходя из соотношения прочностей элементов системы «ОМ – зерно - связка». Уровень дефектности при алмазном шлифовании АКМ определяется соотношением прочностей АКМ, связки, алмазных зерен и их концентрацией в круге.

Трехмерное моделирование процесса ультразвукового (вибрационного) алмазного шлифования. Перспективным направлением повышения производительности и улучшения качества поверхности при алмазно-абразивной обработке является введение в зону резания ультразвуковых колебаний (УЗК) малой амплитуды. Установлено, что ультразвуковые колебания оказывают положительное влияние на силы при микрорезании отдельными зернами и в целом на сьем обрабатываемого материала (ОМ) и тем самым способствуют повышению эффективности абразивной обработки [8, 9].

При изучении процесса вибрационного шлифования, прежде всего, необходимо определить влияние УЗК, прикладываемых к РПК во время шлифования, на НДС системы «связка – зерно - ОМ». Используемый нами программный пакет *CosmosWorks* позволяет проводить трехмерное статическое моделирование. Прежде всего, была построена исходная 3D-модель «связка - алмазное зерно - ОМ» (рис. 9, а).

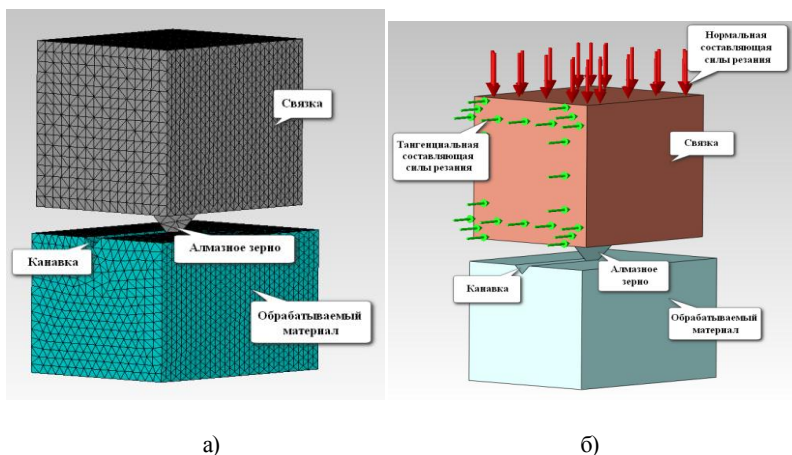


Рисунок 9 – Исходная 3D-модель системы «связка – зерно - ОМ» с сеткой конечных элементов и задание параметров нагружения

Затем были заданы физико-механические свойства всех элементов системы, представленные на рис. 10.

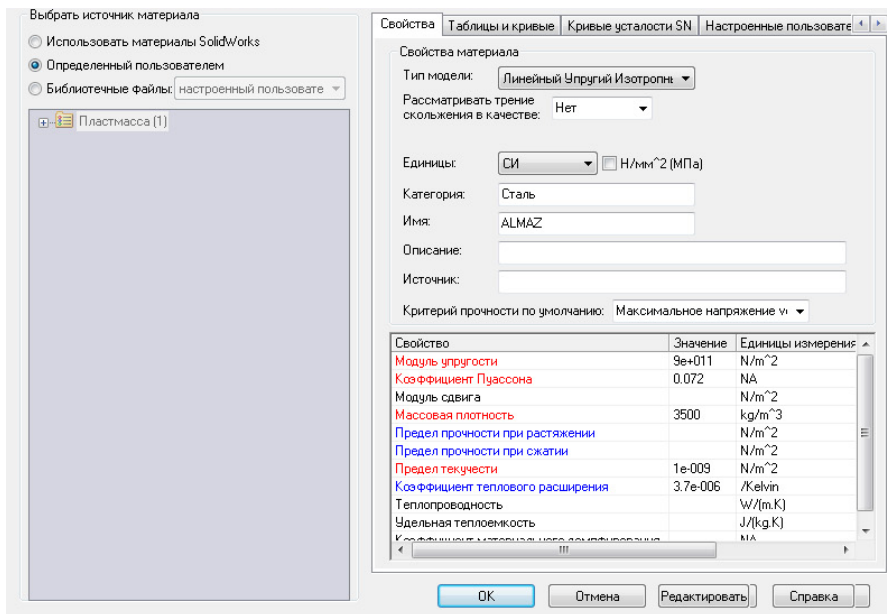


Рисунок 10 – Пример задания физико-механических свойств зерна марки AC100

Отметим, что в исходной модели была использована связка на основе меди, в качестве ОМ – алмаз, марка алмазного зерна принималась как AC 100. Для задач как без использования УЗК, так и с их использованием все начальные условия были заданы одинаково, отличие состояло только в наличии или отсутствии самих ультразвуковых колебаний.

Следующим этапом моделирования являлось задание параметров нагружения модели. В ходе расчетного эксперимента, модель нагружалась распределенной нагрузкой приложенной к верхней грани связки, что позволяло моделировать усилие прижима алмазного шлифовального круга во время абразивной обработки. С целью моделирования подачи равномерная нагрузка прикладывалась к боковой грани связки (рис. 9, б).

Для моделирования вибрационного шлифования усилие прижима алмазного шлифовального круга варьировали во времени. Для этого усилие прижима задавалось как гармоническая нагрузка, график которой был создан заранее в виде синусоиды (рис. 11) с частотой $10 \div 50$ кГц и амплитудой (А), выраженной в единицах давления.

Влияние вибрационных колебаний на НДС зоны шлифования. В исходной модели рассматривалось алмазное зерно марки AC100 зернистостью 200/160,

обладающее следующими прочностными характеристиками: $\sigma_{\text{раст.}}=2,2$ ГПа; $\sigma_{\text{сж.}}=12,9$ ГПа].

В первой части расчетов задавалось усилие прижима (нормальная составляющая силы резания), реализующая давление на алмазное зерно равное 2 МПа, а также величина усилия, создаваемого тангенциальной составляющей силы резания, равная 1 МПа. В качестве ОМ принят алмаз, а связка на основе меди.

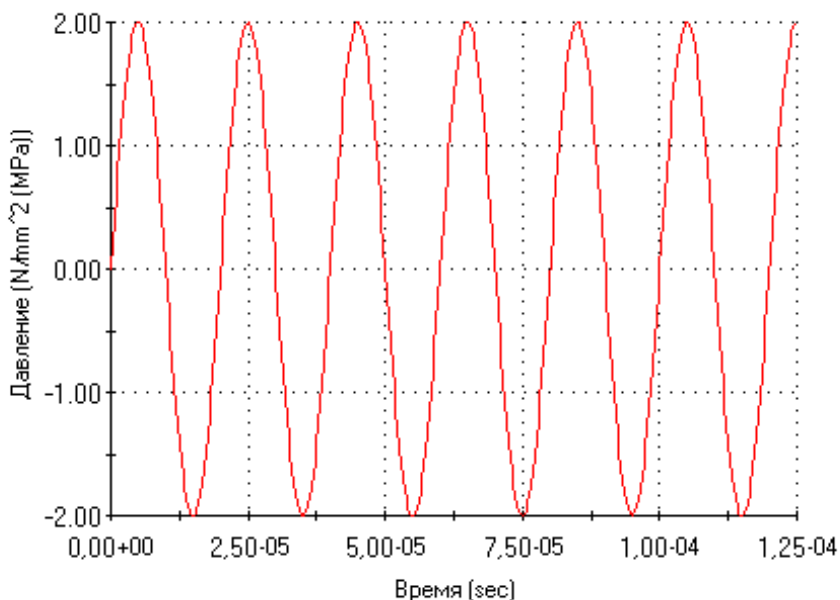
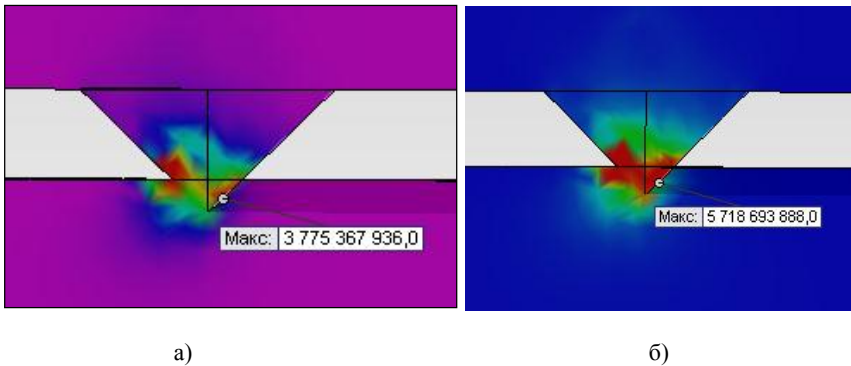


Рисунок 11 – График гармонической нагрузки ($f=50$ кГц, $A=2$ МПа)

Для моделирования вибрационного шлифования усилие прижима задавалось с частотой колебаний $f=50$ кГц (рис. 11). Задачей исследования на данном этапе являлось определение влияния ультразвуковых колебаний на производительность шлифования путем определения НДС зоны обработки (рис. 12). При этом в качестве косвенного параметра, характеризующего производительность, служила величина эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$.

На основании проведенных модельных экспериментов по определению НДС зоны шлифования можно сделать вывод о существенном влиянии УЗК на объем разрушенного материала.

Рисунок 12 – Уровень $\sigma_{\text{эКВ}}$ при шлифовании без УЗК (а) и с УЗК (б)

Проведенные расчеты показали, что с повышением частоты УЗК, прикладываемых к модели, НДС в зоне резания существенно меняется. Этот эффект можно использовать на практике. Путем изменения частоты УЗК появляется возможность существенно снизить гамму шлифовальных кругов в плане их характеристик. Т.е. используя круги ограниченного диапазона характеристик, можно достичь таких же результатов, для получения которых ранее требовались шлифовальные круги довольно большого набора характеристик.

Таким образом, расчеты НДС зоны шлифования указывают на существенное влияние УЗК на объем разрушенного ОМ, свидетельством чему служит увеличение $\sigma_{\text{эКВ}}$ в зоне шлифования в 1,5 – 2 раза.

Трехмерное моделирование процесса правки абразивных кругов алмазным инструментом. 3D моделирование процесса правки алмазных кругов алмазным карандашом позволяет в компьютерном режиме определять рациональные режимы (скорость круга, подача, глубина правки) для конкретных марок абразивных зерен и связок. При этом представляется возможным проследить изменение характера и объема разрушения абразивных зерен от субмикро– до микро– и макроразрушения, что позволяет обеспечивать рациональные параметры РПК и получать требуемое качество обработанной поверхности.

В программном пакете COSMOS рассчитаны поля главных и приведенных напряжений, энергии и плотности энергии деформации при различных режимах правки.

Изучение влияния количества металлофазы показало увеличение напряжений в зернах в местах сосредоточения металлофазы. Установлено, что увеличение количества металлических включений в зернах приводит к снижению их прочности и термостойкости.

Из эпюр напряжений видно, что наибольшие напряжения

сконцентровані в області металофази і саме вона грає ключову роль в руйнуванні алмазних зерен в процесі правки алмазно-абразивного інструмента. Моделювання процесу правки з зернами з трьома включеннями металофази показали наявність більших напружень порівняно з зернами з одним включенням (рис. 13). Можливо зробити висновок, що правка кругів з більшим кількістю включень в алмазних зернах проходить більш інтенсивно.

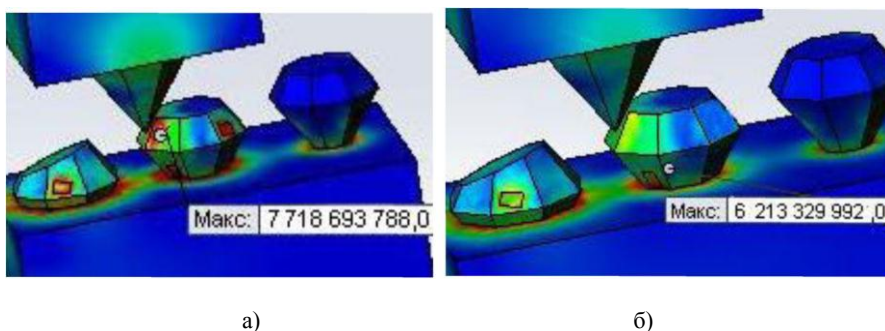


Рисунок 13 – Влияние количественного содержания металофази в зерне на изменение эквивалентных напряжений, возникающих в зоне правки алмазоносного слоя:
а) - содержание металофази -10%, б) - содержание металофази - 5%

Трёхмерное моделирование процесса заточки лезвийного инструмента из АКМ [2]. Широко применение лезвийного инструмента из АКМ сдерживается относительно невысокой надёжностью его эксплуатации. Этот недостаток обусловлен несовершенством процессов синтеза (получения) АКМ: наличием остаточных напряжений, внутренних дефектов, которые проявляются даже после заточки инструмента, то есть в процессе его эксплуатации. Образование микротрещин на поверхности АКМ может быть результатом действия одного или сразу нескольких механизмов термосилового разрушения, обусловленных различием коэффициентов термического расширения алмазных кристаллитов и металофази, окислением меж- и внутрикристаллитных включений АКМ и др.

Включения металла-катализатора сохраняются в АКМ и алмазных зернах после синтеза и концентрируются преимущественно в плоскости (111) [10]. Существенное различие величин коэффициентов термического расширения алмаза и металофази, а также анизотропия теплофизических свойств кристаллитов АКМ и алмазных зерен могут влиять как на процесс микроразрушения (съём припуска), так и на макроразрушение (образование дефектного слоя) при шлифовании. По-видимому, это является одной из

причин образования трещин на резцах из АКМ 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°), трещины не образуются. Визуальный контроль после заточки и доводки не гарантирует надежность работы такого инструмента.

По данным Н.В. Новикова и Л.Н. Девина [11] вероятность разрушения резцов из сверхтвердых материалов 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 АКМ, однако не рассматривают влияние температуры в зоне резания.

В связи с этим нами была сделана попытка разработки методологии заточки лезвийного инструмента, обеспечивающей его надежность уже на этапе изготовления.

Использование метода конечных элементов в пакете программ позволяет определять НДС исследуемого объекта, вызванное как отдельно силовыми и температурными факторами, так и их суммарным воздействием.

Для повышения надежности лезвийного инструмента из АКМ предложен новый методологический подход, позволяющий определять надежность такого инструмента еще на этапе его заточки. При этом процесс заточки и 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 АКМ). Целесообразно так затачивать и доводить лезвийные инструменты из АКМ, 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 нецелесообразным выбор щадящих условий его заточки и доводки. Поступая таким образом изготовители лезвийного инструмента из АКМ 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 методом конечных элементов

рассчитываются предельные термосиловые напряжения в режущем клине резца при экстремальных условиях его эксплуатации.

Для этого трехмерная модель лезвийного инструмента нагружается силой резания и температурой до величины, несколько превышающей те значения, которые этот инструмент может испытывать в экстремальных условиях его эксплуатации. 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. 14.

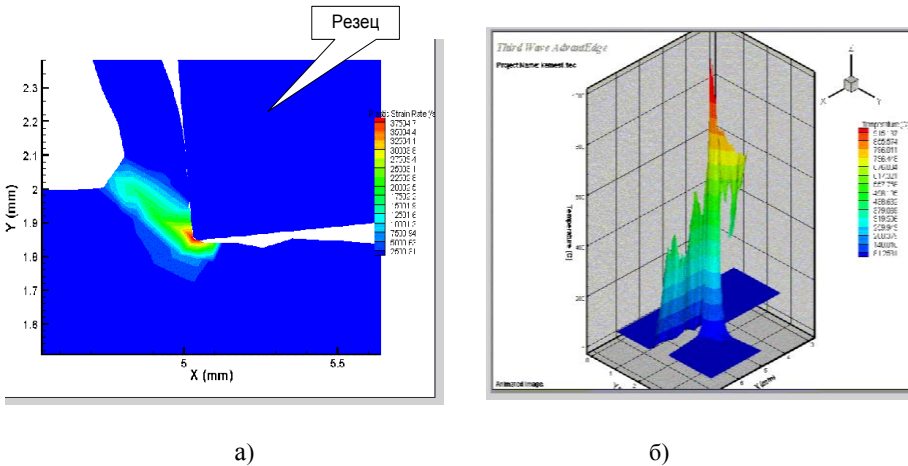


Рисунок 14 – Модель процесса лезвийной обработки (а) и результаты расчета температуры в зоне резания (б)

Полученные значения термосиловых напряжений являются базовыми для решения обратной задачи – нахождения режимов и условий заточки по известному напряженному состоянию резца из АКМ в экстремальных условиях его работы.

Применяемый пакет позволил решить задачу в трехмерном измерении, что выгодно отличает данную методику от применявшейся ранее другими авторами. 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 АКМ, алмазных зерен и связки шлифовального круга.

Полученные в ходе решения обратной задачи значения режимов алмазного шлифования обеспечат наличие в модели затачиваемого АКМ термосиловых напряжений, превышающих эксплуатационные. Таким образом, определяются условия заточки, при которых дефекты АКМ вскрываются еще на стадии изготовления инструмента.

Следовательно, исходной информацией при назначении режимов заточки и доводки лезвийного инструмента из АКМ 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, 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 АКМ термосиловых напряжений, превышающих эксплуатационные. Тем самым определяются условия заточки и доводки, при которых дефекты синтеза АКМ должны проявиться еще на стадии изготовления.

Исследование процесса лезвийной обработки инструментами из АКМ. Для компьютерного исследования процесса лезвийной обработки инструментами из АКМ использован специализированный программный пакет «Third Wave Advant Edge», созданный для этих процессов и базирующийся на методе конечных элементов.

Программа позволяет при реальных режимах резания (скорость, подача, глубина) для различной геометрии режущего инструмента определять поля напряжений и деформаций, температурные поля в зоне резания и величину остаточных напряжений в обработанной поверхности (рис. 15).

Компьютерная обработка результатов моделирования процесса лезвийной обработки позволяет определять динамику изменения сил резания (рис. 16), а также изменение напряжений и температур в поверхностном слое материала в зависимости от удаления от зоны контакта (рис 17).

Таким образом, моделирование процесса лезвийной обработки инструментами из АКМ позволяет в компьютерном режиме проводить модельные эксперименты по исследованию влияния физико-механических свойств обрабатываемых материалов, геометрии инструмента и режимов резания на выходные показатели процесса.

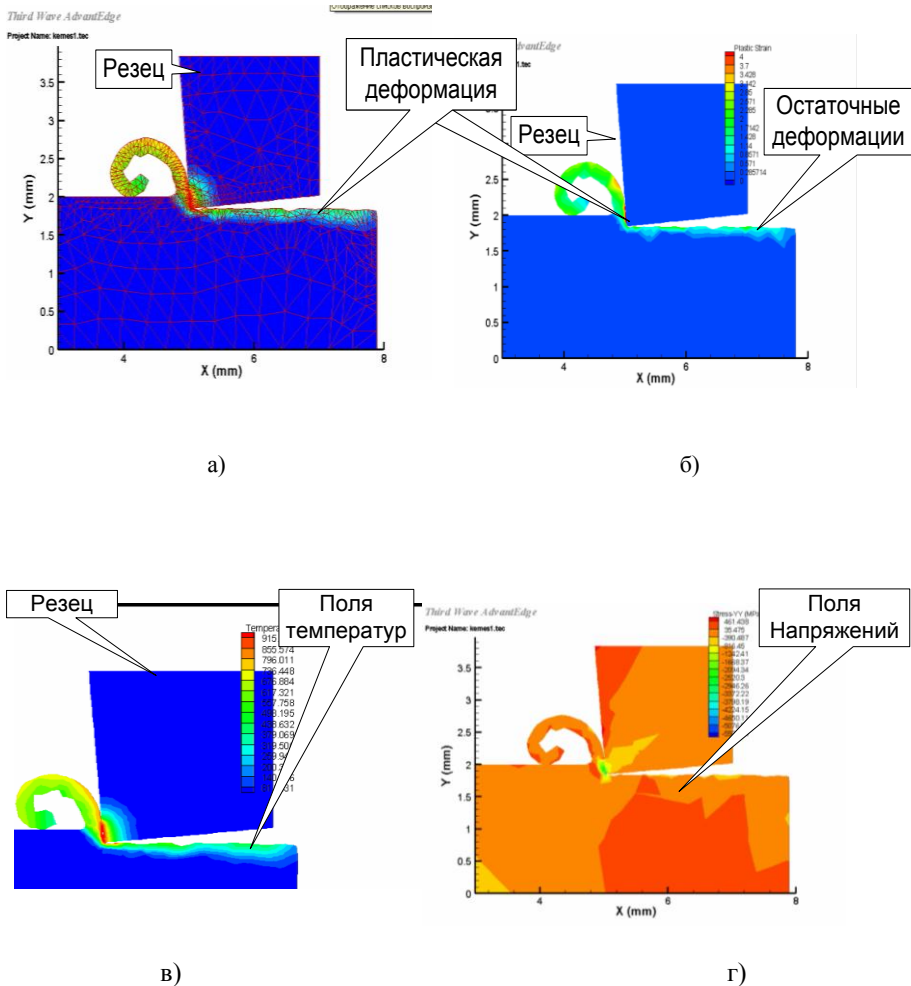


Рисунок 15 – КЭ модель процесса резания (а) и результаты расчета деформаций (б), температурных (в) и полей приведенных напряжений (г) в зоне резания

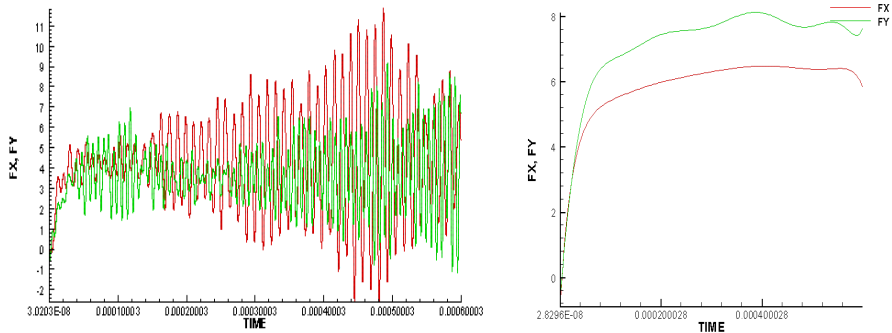


Рисунок 16 – Динамика изменения нормальной (FY) и тангенциальной (FX) составляющих силы резания

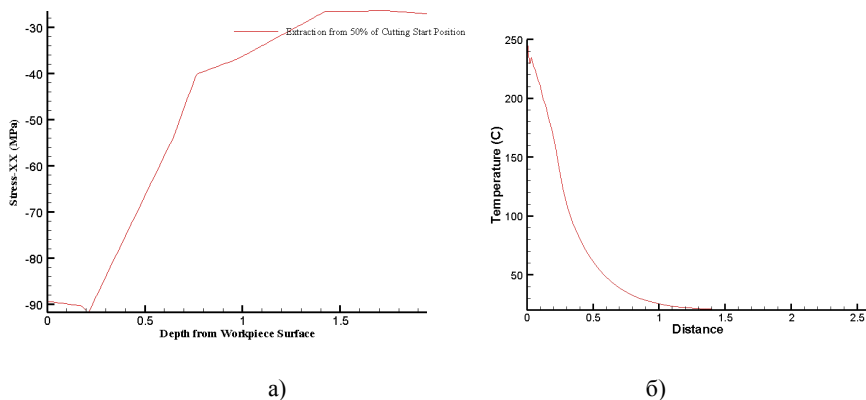


Рисунок 17 – Результаты расчета зависимости напряжений и температур в поверхностном слое от удаления от зоны контакта

Выводы и перспективы развития

1. Разработана и обоснована методология 3D моделирования процессов изготовления, обработки и эксплуатации АКМ.

2. Предложена и обоснована методология 3D моделирования термосилового НДС зоны спекания АКМ и зоны шлифования как единой системы «ОМ – зерно – металлофаза - связка», которая включает экспериментальное изучение 3D топографии взаимодействующих поверхностей лазерным сканированием. На этой основе создана имитационная 3D модель НДС системы «кристаллиты алмаза – металлофаза –

зерно - связка», которая позволяет анализировать её поведение в зависимости от условий спекания и обработки, характеристик кругов с учетом анизотропии зерен и наличия или отсутствия СОТС.

3. Впервые на базе 3D моделирования НДС в АКМ, возникающего в процессе спекания его компонентов определены рациональные композиции марок, зернистостей и концентраций алмазных зерен с марками металлической, керамической и органической связок, которые обеспечивают целостность зёрен в АКМ. Установлено, что снижение концентрации алмазов в круге до 5-40 % позволяет при оптимальном выборе их марки, зернистости и марки связки обеспечить минимальную дефектность зерен круга. Разработаны научно обоснованные рекомендации по оптимальным составам алмазно-металлических и керамических композиций для изготовления шлифовальных кругов.

4. Разработаны теоретические основы и средства реализации методологии компьютерного 3D моделирования физических явлений для определения оптимальных ресурсосберегающих процессов правки абразивных кругов, прецизионной абразивной и лезвийной обработки инструментами из АКМ.

5. На основе разработанной методологии открывается возможность создания экспертной системы для создания эффективных технологических ресурсосберегающих комбинированных процессов прецизионной обработки АКМ с учётом анизотропии их свойств. Предложенная методология дает возможность разработать высокоэффективные технологические процессы предварительной и прецизионной обработки различных АКМ, которые позволят в 1,5 - 2 раза повысить производительность, на 30-40% сократить расход дорогостоящих алмазных зёрен и на 20-40% повысить надёжность лезвийного инструмента из сверхтвёрдых материалов, что очень важно в случае его использования в автоматизированном производстве. Разработанная экспертная система для прогнозирования и оптимизации процессов производства и эксплуатации алмазно-абразивного инструменте существенно ускорит процесс технологической подготовки производства.

Список использованных источников: 1. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: Уч. пособие / Под. ред. *А.И. Грабченко*. - Харьков: ХГПУ, 1999. - 436 с. 2. 3D методология исследования процессов алмазно-абразивной обработки // Современные технологии в машиностроении: Сб. науч. статей. Под ред. *А.И. Грабченко*. - Том 1. - Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. - С. 64-84. 3. Информационные технологии в наукоемком машиностроении: Компьютерное обеспечение индустриального бизнеса/Под общ. ред. А.Г. Братухина.-К.: Техніка, 2001. -728 с. 4. *Новиков Н.В., Воронин Г.А.* Расчет напряженно-деформированного состояния кристаллов синтетических алмазов методом конечных элементов. - Сверхтвердые материалы, 1983, № 1, с. 13-16. 5. *Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н.* Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. - Киев: Наук. думка, 1993. - 220 с. 6. *Грабченко А.И., Федорович В.А., Образков Б.В.* Роль концентрации алмазов в круге при шлифовании поликристаллов сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы.-1984.-Вып.1.-С.49-52. 7. *Козакова Н.В., Федорович В.А.* Оценка влияния размера и концентрации зерен на их

целостность при спекании алмазных кругов на металлических связках // Междунар. науч.-техн. сб. «Резание и инструмент в технологических системах», Харьков, НТУ «ХПИ», 2006. Вып. 71. - С. 64 – 71. **8.** Федорович В.А. Разработка научных основ и способов практической реализации управления приспособляемостью при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: Дис...докт. техн. наук: 05.03.01. - Харьков, 2002. - 469 с. **9.** Кумабэ Д. Вибрационное резание. Пер. с яп. С.Л. Масленникова / Под ред. И.И. Портнова, В.В. Белова. - М.: Машиностроение, 1985. - 424 с. **10.** Новиков Н.В., Примак Л.П. и др. Исследование распространения усталостных трещин в монокристаллах синтетических алмазов // ДАН СССР. - 1981. - Вып. 256. - С. 1122-1126. **11.** Новиков Н.В., Девин Л.Н. Надежность лезвийных инструментов из ПАКМ при чистовом точении закаленных сталей // Сб. науч. тр. Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины. Серия Г: Процессы механической обработки, станки и инструменты. - Киев, 2002. - С. 273-280.

Bibliography (transliterated): 1. Rabochie processy vysokih tehnologij v mashinostroenii: Uch. posobie / Pod. red. A.I. Grabchenko. - Har'kov: HGPU, 1999. - 436 s. **2.** 3D metodologija issledovanija processov almazno-abrazivnoj obrabotki // Sovremennye tehnologii v mashinostroenii: Sb. nauch. statej. Pod red. A.I. Grabchenko. - Tom 1. - Har'kov: NTU «HPI», 2006. - С. 64-84. **3.** Informacionnye tehnologii v naukoemkom mashinostroenii: Komp'juternoe obespechenie industrial'nogo biznesa/Pod obshh. red. A.G. Bratuhina.-К.: Tehnika, 2001. -728 s. **4.** Novikov N.V., Voronin G.A. Raschet naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija kristallov sinteticheskikh almazov metodom konechnyh jelementov. - Sverhtverdye materialy, 1983, № 1, s. 13-16. **5.** Novikov N.V., Majstrenko A.L., Kulakovskij V.N. Soprotivlenie razrusheniju sverhtverdyh kompozicionnyh materialov. - Kiev: Nauk. dumka, 1993. - 220 s. **6.** Grabchenko A.I., Fedorovich V.A., Obrazkov B.V. Rol' koncentracii almazov v krugе pri shlifovanii polikristallov sverhtverdyh materialov // Sverhtverdye materialy.-1984.-Vyp.1.-S.49-52. **7.** Kozakova N.V., Fedorovich V.A. Ocenka vlijanija razmera i koncentracii zeren na ih celostnost' pri spekanii almaznyh krugov na metallicheskih svjazkah // Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. «Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah», Har'kov, NTU «HPI», 2006. Vyp. 71. - С. 64 – 71. **8.** Fedorovich V.A. Razrabotka nauchnyh osnov i sposobov prakticheskoy realizacii upravlenija prisposablivaemost'ju pri almaznom shlifovanii sverhtverdyh materialov: Dis...dokt. teh. nauk: 05.03.01. - Har'kov, 2002. - 469 s. **9.** Kumabje D. Vibracionnoe rezanie. Per. s jap. S.L. Maslennikova / Pod red. I.I. Portnova, V.V. Belova. - М.: Mashinostroenie, 1985. - 424 s. **10.** Novikov N.V., Primak L.P. i dr. Issledovanie rasprostraneniya ustalostnyh treshhin v monokristallah sinteticheskikh almazov // DAN SSSR. - 1981. - Vyp. 256. - S. 1122-1126. **11.** Novikov N.V., Devin L.N. Nadezhnost' lezviyных instrumentov iz PAKM pri chistovom tochenii zakalennyh stalej // Sb. nauch. tr. Instituta sverhtverdyh materialov im. V.N. Bakulja NAN Ukrainy. Serija G: Processy mehanicheskoy obrabotki, stanki i instrumenty. - Kiev, 2002. - S. 273-280.