

УДК 621.923

*А. И. Грабченко, В. А. Фадеев, В. А. Федорович*

## **РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ИНСТРУМЕНТАМИ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Разработана экспертная система процесса обработки деталей авиационной техники (ДАТ) инструментами из сверхтвердых материалов. Система состоит из двух взаимосвязанных модулей – теоретического и экспериментального, которые решают как самостоятельные задачи, так и дополняют друг друга.*

### **Вступление**

Поскольку в авиационной технике предъявляются повышенные требования к качеству деталей, в технологии их изготовления широко используются инструменты из сверхтвердых материалов (СТМ). Сложность процессов, протекающих в зоне резания инструментами из СТМ, их взаимовлияние обуславливают значительную трудоемкость экспериментальных исследований. Для определения области оптимальных условий эффективного функционирования технической системы «Обрабатываемый материал (ОМ) – инструмент» целесообразно изучать ее на разработанных моделях. Аналитическое описание процессов управляемого микроразрушения (износа) инструмента и ОМ позволяет без трудоемких и дорогостоящих экспериментов определять область оптимальных условий обработки при изготовлении деталей авиационной техники с заданными требованиями по качеству.

Поэтому целесообразна разработка экспертной системы обработки, которая была бы основана на теоретико-экспериментальных данных об управляемых процессах разрушения элементов единой системы «ОМ – инструмент» в условиях, максимально приближенных к реальным. Именно совокупность механизмов и видов взаимного микроразрушения элементов этой единой системы полностью определяют эффективность процесса обработки

Разработана экспертная система процессов обработки инструментами из СТМ, включающая два модуля – теоретический и экспериментальный.

Теоретический модуль экспертной системы базируется на аналитическом описании процессов взаимного управляемого микроразрушения элементов 3D системы «Обрабатываемый материал – инструмент» в различных условиях их взаимодействия. Он позволяет в компьютерном режиме прогнозировать количественные выходные показатели процесса и область оптимальных условий обработки ДАТ. Достоинством этого модуля экспертной системы является возможность без длительных, трудоемких и

дорогостоящих экспериментов анализировать широкий спектр взаимосвязанных факторов, влияющих на эффективность функционирования единой системы «ОМ-инструмент» в процессе резания.

Экспериментальный модуль экспертной системы создан на базе компьютерной обработки результатов обширных экспериментальных исследований. Он позволяет определять оптимальные условия процесса обработки при конкретных ограничивающих факторах, т. е. при определенных реальных возможностях производства.

### **Основная часть**

*Методология разработки экспертной системы процесса*

Современные тенденции создания наукоемкой продукции характеризуются резким расширением приложений математики, во многом связанным с созданием и развитием средств вычислительной техники. Развитие вычислительной техники открывает перспективы разработки трехмерной (3D) методологии комплексного исследования взаимосвязанных процессов изготовления и эксплуатации алмазно-композиционных материалов 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 СТМ, оптимальных условий их изготовления и использования. В качестве алмазно-композиционных материалов будем рассматривать все алмазосодержащие композиции в широком смысле, включая алмазно-абразивные инструменты на различных связках и другие алмазосодержащие инструменталь-

ные материалы.

Создание методологических основ и системы 3D-CAD моделирования СТМ на этапах их изготовления и эксплуатации позволит существенно повысить эффективность их обработки и применения. Предлагаемая 3D методология исследования процессов изготовления и эксплуатации СТМ охватывает все основные этапы жизненного цикла изделия.

Методология включает следующие этапы: 1 – трехмерное компьютерное моделирование процесса спекания СТМ для определения их структуры и 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 обработанной поверхности и топографии рабочей поверхности круга (РПК) методом лазерного сканирования; 5 – трехмерное моделирование процесса заточки лезвийного инструмента из СТМ с целью определения условий его безотказной работы; 6 – трехмерное компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны лезвийной обработки с целью определения рациональных режимов резания и геометрии инструмента из СТМ; 7 – разработка экспертной системы определения рациональных характеристик СТМ 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 СТМ. Некоторые из этих этапов изложены в сборниках, посвященных юбилею М.Ф. Семко [1], Н.В. Новикова [2] и Ф.Я. Якубова [3].

Реализация предложенной последовательности экспериментальным путем является чрезвычайно трудоемким и дорогостоящим процессом. Предлагается вариант реализации этих этапов методом компьютерного 3D моделирования.

Использование компьютерных информационных технологий (КИТ) на всех этапах жизненного цикла СТМ рассматривается как приближение к идеологии CALS-технологии (Computer-Aided Logistics Support) [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; депроизводство.

Решение поставленных задач базируется на использовании пакетов программ COSMOS, ANSYS,

NOSTRAN, предназначенных для исследовательских расчетов методом конечных элементов. В плане моделирования процессов спекания СТМ 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-обрабатываемый материал» 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.

Экспертная система – это компьютерная программа, использующая экспертные знания для обеспечения высокоэффективного решения задач в узкой предметной области [6].

При создании экспертной системы использована процедурная база знаний, т. е. в качестве инженера знаний и предметного эксперта выступают авторы работы.

В экспертной системе используется как база данных, так и база знаний в предметной области алмазно-абразивной обработки и лезвийной обработки инструментом из СТМ. База данных содержит справочную информацию о характеристиках лезвийных и абразивных инструментов из СТМ (связка, марки зерен, концентрация, зернистость и т. д.), физико-механических свойствах различных марок алмазных зерен и обрабатываемых материалов. Экспертная система разработана на основе процедурной базы знаний. База знаний оперирует такими понятиями, как надежность лезвийного инструмента из СТМ, брак при его заточке, весовой вклад различных факторов в эффективность процесса обработки и построена по предложенному алгоритму определения оптимальных условий микроразрушения элементов

системы «СТМ-зерно-связка». В качестве языка программирования использован Borland Delphi 5. В состав экспертной системы входит программный комплекс по методу конечных элементов (МКЭ) типа Cosmos и Ansys.

Основное назначение экспертной системы – прогнозирование уровня выходных показателей при обработке ДАТ инструментами из СТМ и оптимизация процесса обработки.

На отдельных этапах работы экспертная система предусматривает участие эксперта. Эксперт обладает знаниями процесса и путей воздействия на его эффективность.

Структурно-логическая схема алгоритма экспертной системы процесса алмазно-абразивной обработки представлена на рис. 1.

Согласно схеме экспертная система состоит из нескольких взаимосвязанных между собой модулей и подсистем, каждый из которых решает свою конкретную задачу.

После ввода в экспертную систему исходных данных – физико-механических свойств ОМ, зерен и связки, нормального давления или поперечной подачи, скорости шлифования, зернистости и концентрации алмазных зерен, параметров рабочей поверхности круга (которыми можно управлять в процессе шлифования [7]), производится предварительная проверка обеспечения бездефектности процесса обработки. Для этого проводится расчет 3D НДС системы «Связка-кристаллит-металлофаза-зерно». На этом этапе 3D моделирование НДС системы «СТМ-зерно-связка» анализируется уровень термосиловых напряжений и/или энергии деформации в поликристалле и проверяется, не превышают ли они критических значений. Аналитически подобная задача решена Новиковым Н.В. применительно к разрушению композиционных сверхтвердых материалов, однако без учета силового фактора [5].

Если условия эксплуатации изделия из СТМ известны (например, лезвийный инструмент), то расчет 3D НДС режущего клина лезвийного инструмента из СТМ осуществляется в экстремальных условиях его эксплуатации для обеспечения надежности еще на стадии изготовления.

В теоретический модуль алмазно-абразивной обработки входят подсистемы: определение критической величины заделки зерен в связку, их заглубления в нее (методом 3D НДС); определения числа работающих зерен; определения относительной величины фактической площади контакта в системе РПК-СТМ; определения нагрузки на единичное зерно. Если нагрузка на зерно достаточна для обеспечения его самозатачивания (микроразрушения), реализуется производительный процесс, если

нет-прецизионный, где ответственными за сьем припуска являются термоактивируемые процессы. Расчет объемов разрушенных СТМ и алмазных зерен ведется двумя способами.

Если нагрузки в контакте зерно-СТМ достаточны для их микроразрушения при одноактном взаимодействии, расчет ведется по методу конечных элементов, если нагрузка не достаточна, решается усталостно-циклическая контактная задача [7]. По этим результатам расчета оценивается производительность съема припуска, удельный расход и износ алмазных зерен.

В случае необходимости расчета процесса термоактивируемой доводки (прецизионной обработки) – решение принимает эксперт, последовательность работы подсистем включает: расчет интенсивности термоокислительного и диффузионного съема шероховатого поверхностного слоя СТМ при термосиловом взаимодействии с железосодержащей металлической связкой, полученного после предварительной обработки СТМ; определение производительности и времени, необходимого для съема объема материала, находящегося в слое, по толщине, соответствующей максимальной шероховатости предварительно обработанной поверхности (определяется методом лазерного сканирования).

Теоретический модуль экспертной системы позволяет без проведения дорогостоящих и трудоемких экспериментов количественно оценивать производительность шлифования, удельный износ, шероховатость обработанной поверхности в зависимости от марки ОМ, марки СТМ, алмазных зерен, зернистости и концентрации, нормального давления, нагрузки на единичное зерно, скорости шлифования, фактической площади контакта, относительной опорной площади РПК.

*Подсистема трехмерного моделирования 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 объемы 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.

Пример расчетов приведенных напряжений в

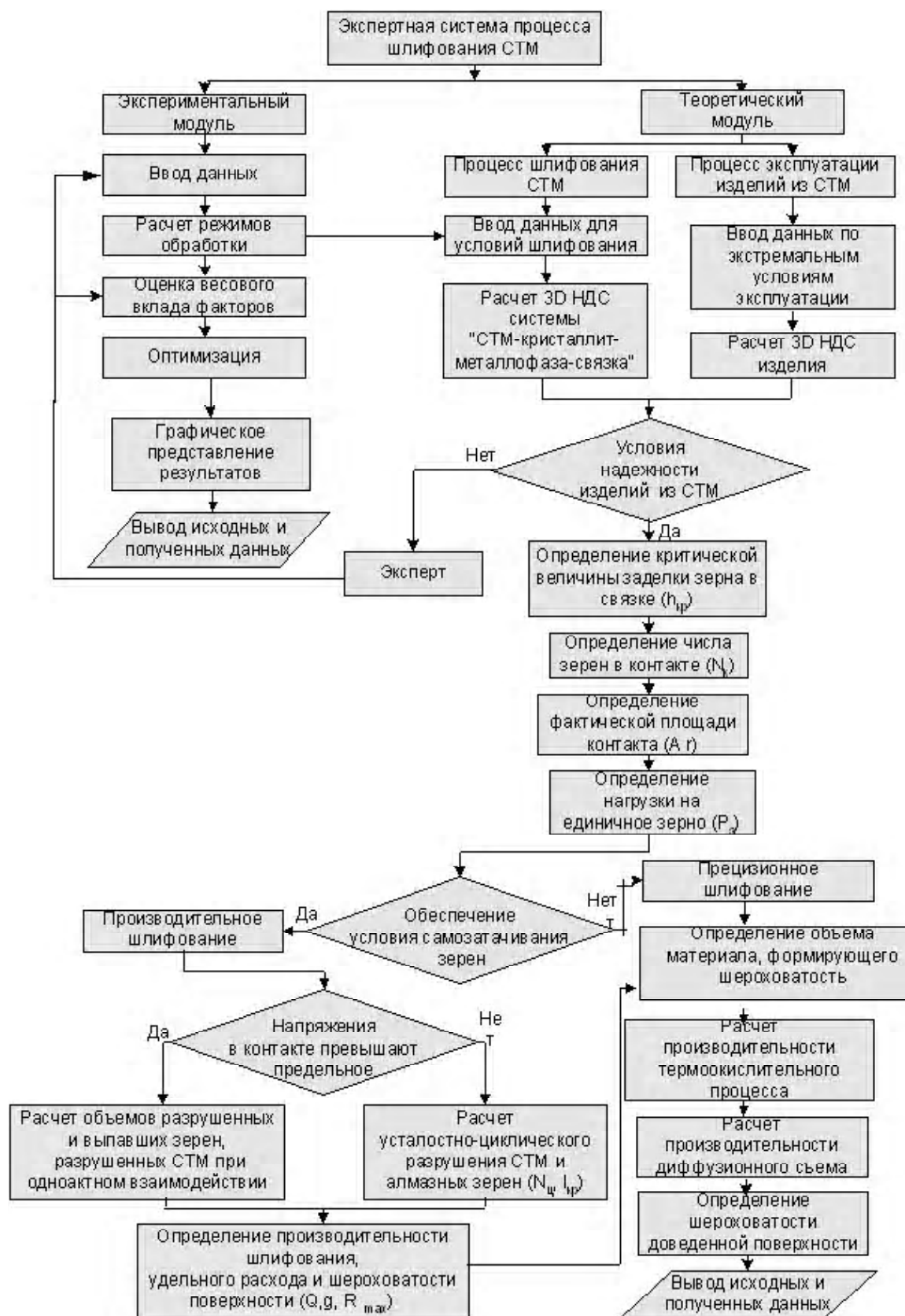


Рис. 1. Структурно-логическая схема экспертной системы процесса шлифования

элементах 3D системы «кристалл алмаза-зерно-связка» приведен на рис. 2. На шкалах результатов расчета условно обозначенные – Von Mises – приведенные напряжения.

Как видно из 3D-модели (рис. 2.), закономерности распределения напряжений отвечают и подтверждают принятую теоретическую модель хрупкого разрушения абразивного зерна кристаллом алмаза [8].

В качестве примера для расчета, абразивное зерно нагружали силой 2,5 Н, которая является недостаточной для полного разрушения абразивного зерна, но достаточной для его микроразрушения. В этом случае максимальные приведенные напряжения достигают величины 541 МПа, а для полного разрушения абразивного зерна контактные напряжения

должны достичь величины 2550 МПа.

Как показали результаты расчетов, при высоких скоростях нагрузки максимальные напряжения концентрируются на площади контакта. С уменьшением скорости взаимодействия до 5 м/с большая часть нагрузки передается связке, вследствие чего напряжения концентрируются в основном в зоне контакта зерно-связка. Но абсолютное значение напряжений меньше, что связано с увеличением деформации связки абразивного круга.

Таким образом, 3D моделирование подтверждает достоверность полученных теоретических закономерностей [8] и позволяет определять условия, при которых обеспечивается управляемое микроразрушение абразивных зерен кристаллом алмаза в процессе формирования требуемого режущего релье-

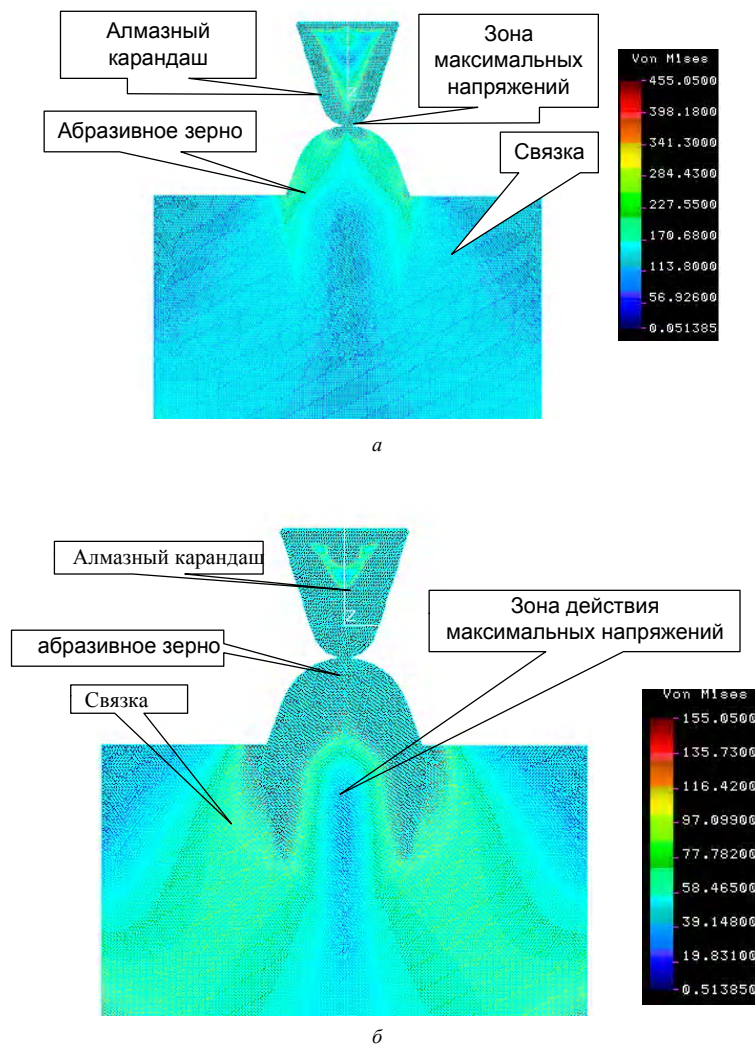


Рис. 2. Влияние скорости взаимодействия на зону действия максимальных напряжений при правке абразивных кругов:

а – при скорости взаимодействия 35 м/с; б – при скорости взаимодействия 5 м/с

фа абразивного круга.

*Подсистема исследования процесса микрорезания единичным алмазным зерном*

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

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

*Подсистема определения 3D параметров качества обработанной поверхности деталей*

Повышенные требования к качеству обработанной поверхности деталей авиационной техники в большой степени обеспечиваются уровнем приспособляемости рабочей поверхности кругов (РПК) и обработанной поверхности детали (ОМ) [7, 9].

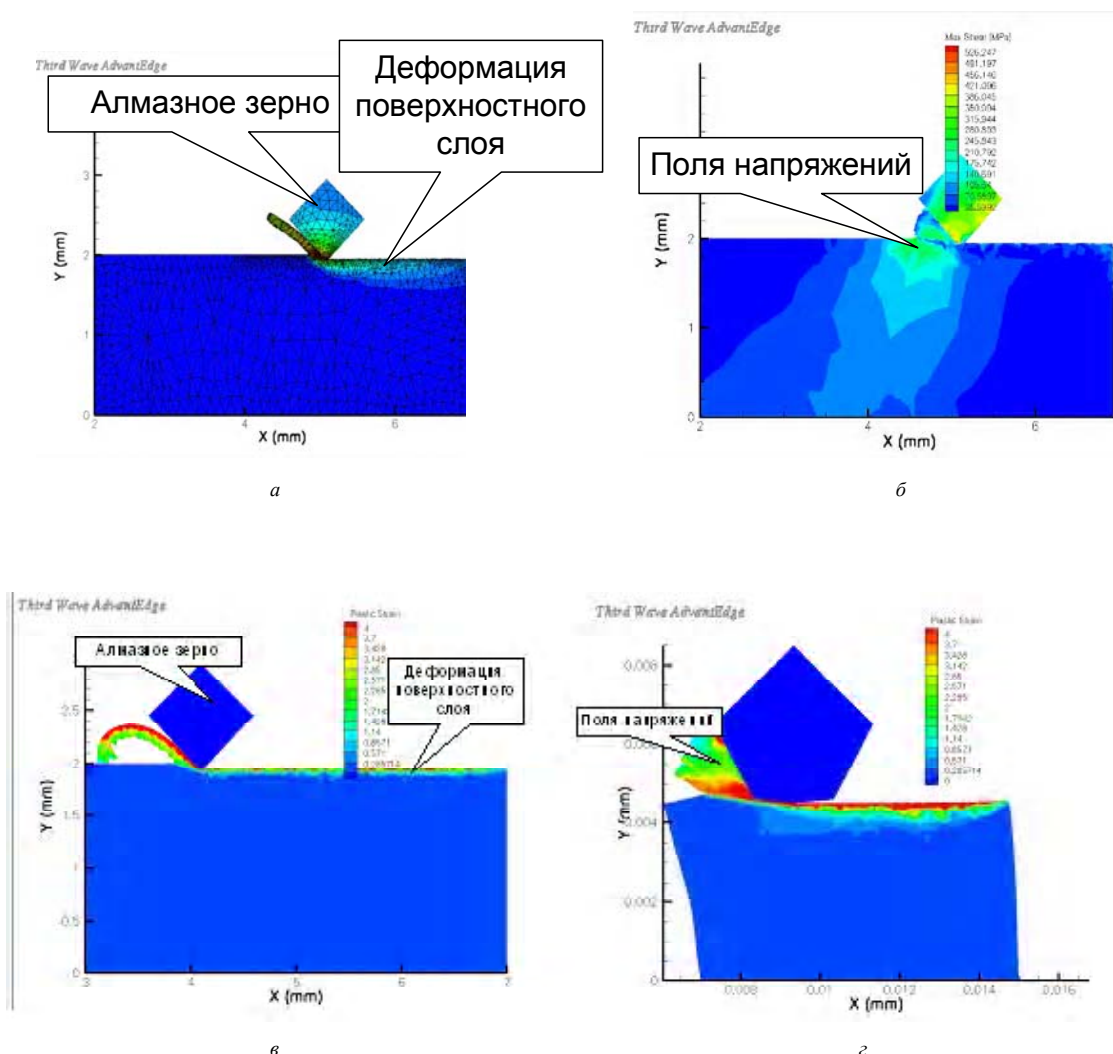


Рис. 3. Моделирование процесса микрорезания единичным алмазным зерном:

*a* – конечноэлементная модель микрорезания зерном с площадкой износа; *б* – результаты расчета полей напряжений; *в* – результаты расчета деформаций поверхностного слоя при микрорезании острым зерном; *г* – результаты расчета деформаций поверхностного слоя при микрорезании зерном с площадкой износа

3D параметры рабочей поверхности алмазно-абразивных инструментов влияют на топографию обработанной поверхности. Поэтому изучение 3D параметров РПК, обработанной поверхности и динамики их изменения в процессах финишной обработки является важнейшим этапом исследований качества обработки деталей авиационной техники. Принципиальным отличием предлагаемой методологии изучения зоны взаимодействия РПК с ОМ является переход от двумерной (2D) к трехмерной (3D) оценке параметров топографии взаимодействующих поверхностей.

Широко применяемые методы профилографирования при исследовании износа круга имеют ряд существенных недостатков, главный из них – искажающее влияние радиуса ошупывающей иглы [3].

Современная методика лазерного сканирования применительно к изучению 3D параметров топографии обработанной поверхности и РПК не только лишена этого недостатка, но и обладает рядом принципиальных достоинств.

Исследование 3D топографии обработанной поверхности и рабочей поверхности алмазных кругов проводилось на лазерном сканирующем приборе «Perthometer S8P» с лазерным датчиком модели FOCODYN, диапазон вертикального разрешения которого составлял  $\pm 250$  мкм, что вполне достаточно для измерения высотных параметров РПК кругов зернистостью до 630/500 (рис. 4, а). Прибор позволяет одновременно фиксировать 9 выбранных из 86 возможных параметров топографии поверхности. Существенным достоинством данного прибора является синхронная компьютерная обработка результатов измерения. Данная методика резко расширяет возможности исследования, уменьшает трудоемкость и повышает точность.

Лазерный измерительный центр позволяет получать визуальное изображение 3D топографии как непосредственно обработанной поверхности (позитив), так и его отпечатка (негатива), обозначаемой символом NEG. Топография РПК может быть получена как с учетом волнистости поверхности (рис. 4, б), так и без, т.е. в отфильтрованном виде (рис. 4, в).

Применительно к процессу прецизионного алмазного шлифования, когда практически отсутствует внедрение алмазных зерен и работают субмикроромки алмазных зерен, особый интерес представляют параметры микрорельефа отдельных алмазных зерен. При изучении 3D топографии РПК с малым шагом сканирования (см. рис. 4 г), в нашем случае равном 2,38 мкм, лазерный луч по каждому алмазному зерну размером 100 мкм проходил более 30 раз. Использование данной методики позволяет подтвердить эффективность способа принудительного

формирования на алмазных зернах режущего субмикрорельефа [7].

Особый интерес представляет изучение параметра относительной опорной площади поверхности ( $t_{ps}$ ), который в большой степени определяет величину фактической площади контакта в системе РПК-ОМ.

С учетом того, что глубина внедрения алмазного зерна в ОМ не превышает несколько мкм, величину  $t_{ps}$  будем определять на уровне 1-5 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 (рабочая поверхность круга), так и на микроуровне – субмикрорельеф отдельных алмазных зерен. Величина «шероховатости» рабочей поверхности отдельных алмазных зерен является важным параметром при определении фактической площади контакта в системе «ОМ-зерно», который сложно получить другими способами.

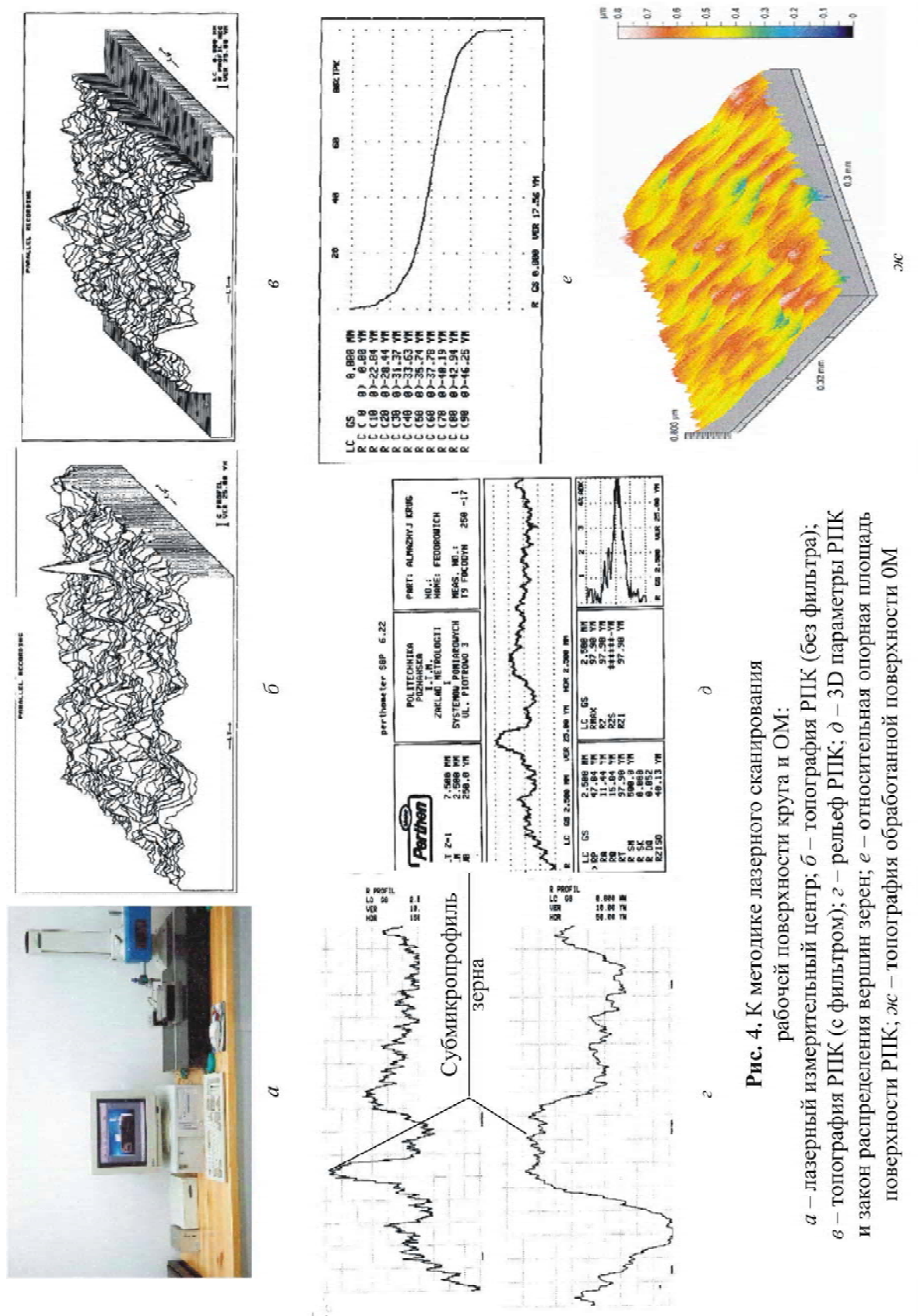
Методика лазерного сканирования позволяет в 3D варианте в компьютерном режиме определять величину  $t_{ps}$  как на макроуровне (рабочая поверхность круга), так и на микроуровне – субмикрорельеф отдельных алмазных зерен и обработанной поверхности ДАТ. Величина «шероховатости» рабочей поверхности отдельных алмазных зерен является важным параметром при определении фактической площади контакта в системе «ОМ-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-ОМ».

Значительный практический и методический интерес представляет возможность фильтрации, которой обладает лазерный сканирующий измерительный центр. Она позволяет отделить волнистость макропрофиля РПК и ОМ от рельефа алмазных зерен над уровнем связки и шероховатости ОМ. Такая методика особенно важна при анализе роли процесса управления продольным и поперечным профилем РПК [4].

Существенным достоинством данной методики является компьютерная обработка результатов сканирования и построения законов распределения высоты зерен над уровнем связки (рис. 4, д) и их изменения в процессе шлифования.

С использованием этой же методики исследовались и параметры топографии обработанной поверхности (рис. 4, ж).

Таким образом, важнейшим достоинством метода лазерного сканирования является возможность



**Рис. 4.** К методике лазерного сканирования рабочей поверхности центра; **б** – топография РПК (без фильтра); **в** – топография РПК (с фильтром); **г** – рельеф РПК; **д** – 3D параметры РПК и закон распределения вершин зерен; **е** – относительная опорная площадь поверхности РПК; **ж** – топография обработанной поверхности ОМ

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 – субмикрорельеф отдельных алмазных зерен. Характеристика субмикрорельефа отдельных алмазных зерен является важным параметром при определении фактической площади контакта в системе «ОМ-зерно», который трудно получить другими способами.

Результаты экспериментальных исследований изменения величины фактической площади контакта в системе «РПК-ОМ» будут использованы в экспертной системе процесса финишной обработки деталей авиационной техники. Проведенный анализ показывает, что при прецизионном шлифовании понятие крупнозернистый и мелкозернистый круг приобретает новое особое понимание, поскольку в процессе съема припуска принимает участие не все зерно, а только его субмикрорельеф, т. к. внедрение зерна в ОМ незначительно. Крупнозернистое зерно с развитым субмикрорельефом может оказаться более эффективным с точки зрения съема припуска, чем мелкое, но с гладкой площадкой или овали-

зированное. Поэтому даже крупнозернистым кругом можно осуществлять прецизионную доводочную операцию обработки деталей авиационной техники. Такой процесс может иметь место при массовом образовании на крупных зернах площадок износа с очень мелким субмикрорельефом. Такие субмикрорельефы выполняют роль доводочной алмазной пасты с микрокромками, жестко закрепленными в алмазном зерне.

Алгоритм теоретического модуля экспертной системы процессов обработки инструментами из СТМ представлен на рис. 5.

*Разработка экспериментального модуля экспертной системы*

Экспериментальный модуль экспертной системы создан на базе компьютерной обработки результатов экспериментальных исследований по многофакторным планам и позволяет с участием пользователя – эксперта (или без него) определять оптимальные условия процесса алмазного шлифования различных СТМ при конкретных ограничивающих факторах, т. е. при определенных реальных возможностях производства. Определен весовой вклад в повышение эффективности алмазного шлифования СТМ различных входных параметров процесса об-

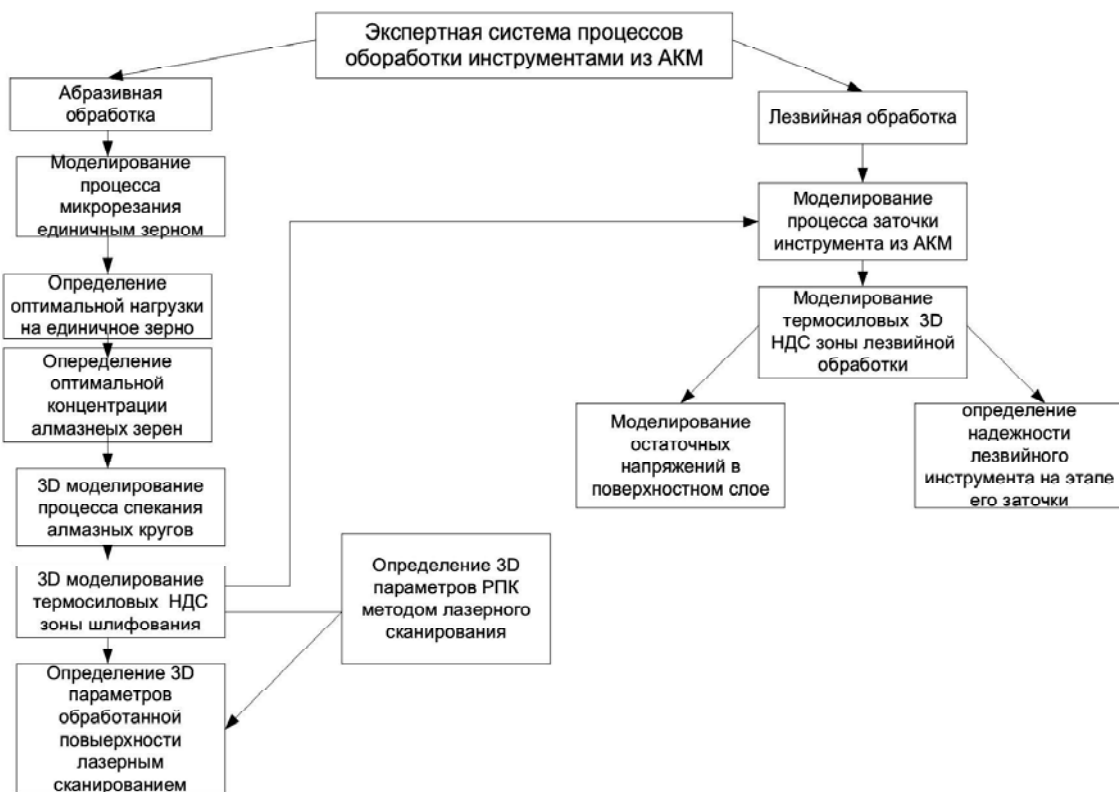


Рис. 5. Алгоритм экспертной системы процессов обработки инструментами из СТМ

работки, что позволяет в отдельных случаях принимать решение без участия эксперта.

Экспериментальный модуль экспертной системы состоит из банка данных, предназначенного для практического пользования на промышленных предприятиях, занимающихся обработкой инструментами из сверхтвердых материалов, например, при заточке различных лезвийных инструментов из них. Банки данных содержат сведения о применяемом оборудовании, о заготовках, алмазных кругах, оснастке. Разработанная экспертная система должна обеспечивать получение оптимальных условий алмазного шлифования (режимы обработки и характеристики кругов, режимы управления процессом приспособляемости).

В основу экспертной системы положены экспериментальные целевые функции, описывающие зависимости производительности обработки  $Q$ , шероховатости граней и кромки обработанных поверхностей  $t_{ps}$ , радиуса округления режущей кромки  $\rho$  от режимов обработки (скорость круга  $V$ ), поперечная подача  $S_{non}$ , нормальное давление), характеристик алмазных кругов (зернистость, концентрация) и режимов правки (ток в цепи управления и частота ультразвуковых колебаний). Назначение экспертной системы – определение оптимальных режимов шлифования и характеристик кругов при оптимизации процесса алмазного шлифования СТМ по максимальной производительности, минимальной (или заданной чертежом) шероховатости обработанной поверхности или минимальному радиусу округления режущих кромок. Для реализации поставленной задачи создано программное обеспечение в рамках пакета Delphi 3.

Экспериментальный модуль экспертной системы [10] позволяет оптимизировать процесс алмазного шлифования различных ДАТ по производительности, шероховатости, а также качеству граней и режущей кромки, радиусу ее округления у затачиваемых прецизионных лезвийных инструментов.

Таким образом, разработан экспериментальный модуль экспертной системы процесса обработки ДАТ инструментами из СТМ. При пользовании экспертной системой потребителю достаточно выбрать необходимый вид оптимизации и нажатием клавиши получить результат.

### *Оптимизация процесса обработки ДАТ*

Разработанная экспертная система процесса алмазного процесса обработки ДАТ инструментами из СТМ позволяет оптимизировать процесс бездефектной обработки по любому из выбранных параметров оптимизации. Придерживаясь выбранной методологии 3D моделирования на всех этапах проводимых исследований, процесс оптимизации также осуществляем в трехфакторном пространстве [10].

Особенностью предложенной методологии оптимизации является производимая оценка весового вклада каждого из входных параметров в выходные показатели процесса обработки. Такой подход является необходимым элементом экспертной системы, поскольку по уровню весового вклада фактора экспертная система может без участия эксперта принять решение по изменению входных параметров условий обработки.

### **Выводы**

1. На базе комплексного теоретико-экспериментального моделирования 3D напряженно-деформированного состояния системы «ОМ-деталь», изучения 3D топографии обрабатываемой поверхности и рабочей поверхности лезвийного инструмента и шлифовального круга методом лазерного сканирования, динамики износа их элементов предложена экспертная система, позволяющая прогнозировать и оптимизировать процесс бездефектной обработки различных ДАТ.

2. Разработанный теоретический модуль экспертной системы позволяет оценивать производительность обработки, удельный износ, шероховатость обработанной поверхности в зависимости от марки СТМ, марки зерна, зернистости, концентрации, нормального давления, скорости шлифования, фактической площади контакта и относительной опорной площади РПК. Теоретический модуль базируется на 3D моделировании НДС системы «инструмент-деталь». В модуль абразивной обработки входят следующие подсистемы: определения числа работающих зерен и фактической площади контакта; определения критической величины заделки алмазных зерен в связке, величины их заглубления в связке, объемов разрушенных СТМ и алмазных зерен; определения условий бездефектной обработки; расчета 3D НДС режущего клина лезвийного инструмента из СТМ в экстремальных условиях эксплуатации для обеспечения надежности еще на стадии его изготовления; расчета процесса усталостно-циклического разрушения СТМ и алмазных зерен для определения производительности и удельного расхода; расчета производительности термоактивируемой доводки.

3. На основе результатов широких экспериментальных исследований с применением методов многофакторного планирования получены уравнения регрессии, описывающие зависимость выходных показателей обработки различных ДАТ от условий обработки, являющиеся основой для формирования целевых функций. На базе целевых функций разработан экспериментальный модуль экспертной системы, позволяющий оптимизировать процесс по производительности, удельному расходу, себестои-

мости обработки, качеству обработанной поверхности и граней, режущей кромки заточиваемого инструмента из различных СТМ и радиусу ее округления.

4. Стойкостные испытания лезвийного инструмента из СТМ, изготовленных в предложенных условиях, показали их эффективность и надежность. При этом установлено, что определяющим параметром оценки качества обработанной поверхности ДАТ является не традиционно применяемые параметры шероховатости  $R_a$  и  $R_z$ , а относительная опорная площадь обработанной поверхности, измеряемая методом лазерного сканирования.

#### Перечень ссылок

1. Грабченко А.И., Федорович В.А., Аносов В.И. 3D методология исследования процессов алмазно-абразивной обработки // Современные технологии в машиностроении: Сборник научных статей / Под ред. А.И. Грабченко. – Том 1. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – С. 64-84.
2. Грабченко А.И., Федорович В.А., Кундрак Я. Методология 3D моделирования процессов в технологии алмазно-композиционных материалов // Современные технологии в машиностроении: Сборник научных статей / Под ред. А.И. Грабченко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – С. 269-287.
3. Грабченко А.И., Федорович В.А., Аносов В.И., Малиняк А.М. Теоретический анализ процесса самозаточивания шлифованных кругов на органических и керамических связках // Современные технологии в машиностроении: Сборник научных статей / Под ред. А.И. Грабченко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – С. 232-247.
4. Информационные технологии в наукоёмком машиностроении: Компьютерное обеспечение индустриального бизнеса / Под общ. ред. А.Г. Братухина. – К.: Техніка, 2001. – 728 с.
5. Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1993. – 220 с.
6. Уотермен Д. Руководство по экспертным системам / Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 369 с.
7. Федорович В.А. Разработка научных основ и способов практической реализации управления приспособляемостью при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: Дис... д-ра техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 2002. – 469 с.
8. Шахбазов Я. А. Научные и технологические основы формирования режущего рельефа шлифовальных кругов с целью повышения эффективности обработки: Дис... д-ра техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 2007. – 322 с.
9. Костецкий Б.И., Шульман А.П., Ляшко В.А., Носовский И.Г. Инверсия структурной приспособляемости в процессах финишной алмазной обработки // Синтетические алмазы – ключ к техническому прогрессу. – Киев. – 1977. – Ч. 1. – С. 273-279.
10. Грабченко А.И., Федорович В.А. Экспертная система процесса алмазного шлифования сверхтвердых материалов // Вопросы механики и физики процессов резания и холодного пластического деформирования: Сб. науч. тр. Серия Г: Процессы механической обработки, станки и инструменты. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАНУ, 2002. – С. 481-489.

Поступила в редакцию 11.12.2007

*Розроблено експертну систему процесу обробки деталей авіаційної техніки (ДАТ) інструментами з надтвердих матеріалів. Система складається з двох взаємозалежних модулів – теоретичного й експериментального, котрі вирішують як самостійні задачі, так і доповнюють один одного.*

*Developed is the expert system for the process of machining the parts of aviation equipment (PAE) with tools made of extra-hard materials. The system consists of two interrelated modules, the theoretical and experimental that solve separate problems and complement each other as well.*