

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи

ОГОРОДНИКОВ Алексей Игоревич

**Параметрическое компьютерное моделирование
механической обработки хрупких материалов
для интеграции в автоматизированную систему
технологической подготовки производства**

05.13.12 – Системы автоматизации проектирования
(промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2021

Работа выполнена на кафедре «Электронное машиностроение» Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент

Тихонов Игорь Николаевич

Официальные оппоненты:

Янишевская Анна Генриховна, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», г. Омск, профессор кафедры «Инженерная геометрия и САПР» факультета информационных технологий и компьютерных систем;

Паршин Сергей Владимирович, доктор технических, доцент, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург, профессор кафедры «Металлургические и роторные машины» Института новых материалов и технологий;

Веретенникова Ирина Андреевна, кандидат технических наук, ФГБУН Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, научный сотрудник лаборатории «Микромеханика материалов»

Защита состоится 08 декабря 2021 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.09.24 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=2952>.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ольга Михайловна Огородникова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Существенного сокращения времени и материальных затрат на проектирование новых изделий и технологий их изготовления можно достичь за счет компьютерного моделирования и средств инженерного анализа в составе систем автоматизированного проектирования (САПР) и автоматизации технологической подготовки производства (АСТПП). Одним из наиболее проблематичных и мало изученных направлений в создании средств инженерного анализа и их интеграции в общую архитектуру автоматизированной проектно-производственной среды является компьютерное моделирование технологических процессов механической обработки новых труднообрабатываемых, в том числе, – хрупких материалов, обладающих уникальными эксплуатационными характеристиками.

Компьютерное моделирование, основанное на методе конечных элементов (МКЭ), традиционно используется в расчетном обосновании проектируемых конструкций с целью предотвращения поломок, связанных с разрушением конструкционных материалов. Отличительной особенностью механической обработки является целесообразное локальное разрушение материала, направленное на формирование поверхности заданного качества. Совершенствование средств, применяемых в САПР изделий машиностроения для предварительной оценки качества и возможных разрушений, а также интеграция этих средств в алгоритмы поиска технологических решений механической обработки материалов с использованием АСТПП является актуальным направлением создания инструментов проектного управления качеством в составе автоматизированной проектно-производственной среды.

Компьютерные модели технологических процессов обработки хрупких материалов, алгоритмы анализа ожидаемых результатов воздействия режущего инструмента на заготовку требуют развития в связи с актуальными приложениями в наиболее прогрессивных областях современной индустрии (электроника, оптика, энергетика) и структурным многообразием обрабатываемых материалов (монокристаллические, поликристаллические, аморфные, наноструктурированные, композиционные материалы). Разработка соответствующих методов и средств для анализа технологических решений в САПР и АСТПП позволит оперативно моделировать многофакторные процессы механической обработки материалов с особыми свойствами при назначении параметров режима резания.

Степень разработанности темы исследования. Развитию АСТПП машиностроения способствовали труды таких российских ученых, как Г. К. Горанский, Н. М. Капустин, С. П. Митрофанов, Б. Е. Челищев,

И. П. Норенков, С. Н. Корчак, В. В. Павлов, А. Ф. Прохоров, Ю. М. Соломенцев, В. Д. Цветков и другие. Математические модели технологических процессов механической обработки подробно разработаны применительно к металлическим сплавам в рамках теории пластического поведения материала, срезаемого твердым инструментом. Этой тематике посвящены труды таких российских ученых, как Г. И. Грановский, И. А. Тиме, К. А. Зворыкин, Я. Г. Усачев, Н. Н. Зорев, А. М. Розенберг, М. И. Клушин, В. Н. Подураев, А. Д. Макаров, А. Н. Резников и других. Вместе с тем, разработанные модели технологических процессов в полной мере не реализованы в виде готовых к использованию программных продуктов в составе САПР и АСТПП, не решены многие задачи компьютерного моделирования процессов резания применительно к хрупким материалам. Недостаточная разработанность важных аспектов моделирования процессов резания хрупких материалов, в том числе – с особым поверхностным слоем, отсутствие интегрированных программных решений CAE (Computer-Aided Engineering) – CAM (Computer-Aided Manufacturing), а также теоретическая и практическая значимость решения актуальных задач обработки хрупких материалов в различных областях производства электронной компонентной базы, оптических и топливных элементов определили выбор темы диссертационного исследования, его цель и задачи.

Цель и задачи работы. *Целью* данной работы является совершенствование процессов технологической подготовки изготовления ответственных деталей машин и приборов из хрупких материалов способами механической обработки с учетом предварительной оценки качества обработанной поверхности за счет интеграции средств компьютерного инженерного анализа CAE в автоматизированную систему технологической подготовки производства CAM. Достижение поставленной цели потребовало решения следующих *задач исследования*:

- 1) разработать формализованную модель для расчетного обоснования технологических параметров механической обработки хрупких материалов с учетом предварительной оценки качества обработанной поверхности средствами инженерного анализа в программной среде CAE;
- 2) разработать алгоритм параметрического компьютерного моделирования эффектов силового воздействия режущего инструмента на хрупкий материал для автоматизированного проектирования в интегрированной программной среде CAE/CAM;
- 3) разработать программные модули, реализующие алгоритм параметрического компьютерного моделирования, для автоматизации технологической подготовки процессов механической обработки хрупких материалов в части расчетного обоснования параметров режима резания;

4) апробировать разработанные средства автоматизации процессов компьютерного моделирования в анализе и реализации технологий механической обработки хрупких материалов с применением интегрированной программной среды CAE/CAM.

Объект и предмет исследования: *объект исследования* – компьютерное моделирование и анализ технологических решений в АСТПП деталей на станках с числовым программным управлением (ЧПУ), *предмет исследования* – средства инженерного анализа качества обработанной поверхности на начальном этапе проектирования технологических процессов механической обработки хрупких материалов и метод интеграции CAE/CAM. *Область исследований* соответствует паспорту научной специальности 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования, пункту 1 – «Методология автоматизированного проектирования в технике, включая постановку, формализацию и типизацию проектных процедур и процессов проектирования, вопросы выбора методов и средств для применения в САПР», пункту 3 – «Разработка научных основ построения средств САПР, разработка и исследование моделей, алгоритмов и методов для синтеза и анализа проектных решений, включая конструкторские и технологические решения в САПР и АСТПП».

Научная новизна работы определяется впервые полученными результатами исследований, которые применимы для анализа проектных (технологических) решений в АСТПП и заключаются в следующем.

1. С учетом научно-обоснованных критериев выявления протяженности дефектной зоны в обрабатываемом хрупком материале разработан алгоритм компьютерного моделирования технологических процессов механической обработки хрупких материалов средствами конечно-элементных программ CAE, отличающийся параметрическим представлением входных данных.

2. В соответствии с предложенным алгоритмом компьютерного моделирования процессов резания хрупких материалов разработаны программные модули для препроцессорной подготовки и постпроцессорной обработки данных конечно-элементного анализа напряжений в зоне резания, отличающиеся возможностью передавать данные в виде малоразмерных текстовых файлов между рабочим компьютером технолога с установленной программой CAM и удаленной расчетной станцией с установленной программой CAE. Разработанные программные модули отличаются возможностью автоматизировать технологическую подготовку процессов механической обработки хрупких материалов на этапе расчетного обоснования параметров режима резания и применить методы оптимизации для поиска наилучших параметров режима резания.

3. С использованием разработанных средств компьютерного моделирования сформирована и апробирована распределенная интегрированная программная среда CAE/CAM для автоматизированного проектирования технологических процессов механической обработки хрупких материалов, которая отличается применением облачных сервисов.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке формализованной модели и алгоритма оценки дефектной зоны в хрупком материале при силовом воздействии режущего инструмента средствами инженерного анализа CAE. Предложенный формализованный подход к параметрическому моделированию технологических процессов резания хрупких материалов позволяет интегрировать средства инженерного анализа в АСТПП и способствует развитию распределенных систем автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства. *Практическая значимость результатов работы* заключается в разработке программных модулей, реализующих эффективное использование средств компьютерного инженерного анализа с привлечением облачных вычислительных ресурсов, и их применении для решения прикладных задач механической обработки хрупких материалов. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственный контракт № 075-03-2020-582/4). Практическая значимость результатов работы подтверждается свидетельством о регистрации программы для ЭВМ; актами использования в проектно-поисковой работе компании ООО «ИНЖЕТЕХ» (г. Екатеринбург), специализирующейся на механической обработке неметаллических материалов; а также в учебном процессе Уральского федерального университета.

Методология и методы исследования: методы компьютерного инженерного анализа, метод спектральных элементов, метод конечных элементов, методы математического моделирования, методы программирования. Для проведения вычислительных экспериментов в работе использованы отечественные системы автоматизированного проектирования CAE ФИДЕСИС, CAM АДЕМ. Уникальность полученных программных решений показана в сравнении с лучшим зарубежным аналогом CAE ANSYS. Для создания программного обеспечения использованы языки программирования APDL, APREPRO, C++, Python.

Положения, выносимые на защиту:

1. Формализованная модель силового воздействия режущего инструмента на поверхностный слой пластины из хрупкого материала для выбора технологических параметров режима резания с использованием средств инженерного анализа в соответствии с предварительной расчетной оценкой дефектной области в зоне резания.

2. Алгоритм параметрического компьютерного моделирования процесса резания хрупких материалов в интегрированной программной среде САЕ/CAM, обеспечивающий повышение эффективности и работоспособности распределенной проектно-производственной системы с участием удаленного расчетного сервера.

3. Программные модули как средства автоматизации проектирования, реализующие параметрическое компьютерное моделирование силового воздействия режущего инструмента на пластину из хрупкого материала при назначении параметров режима резания на станках с ЧПУ в АСТПП.

Достоверность и обоснованность научных результатов базируется на тщательном анализе имеющихся литературных источников; обеспечивается использованием сертифицированных программ САПР и АСТПП; подтверждается соответствием полученных компьютерных прогнозов наблюдаемым экспериментальным фактам и производственным испытаниям.

Личный вклад автора. Вошедшие в диссертацию результаты получены автором совместно с научным руководителем И. Н. Тихоновым. Диссертантом лично разработаны программные модули (получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ); проведено компьютерное моделирование с использованием авторских программных модулей и коммерческих программ САПР; выполнены экспериментальные работы, включая подготовку управляющих программ и механическую обработку хрупких материалов на станке с ЧПУ; написаны статьи и тезисы.

Апробация работы. Результаты исследований представлены на международных и российских научных конференциях: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment – ICMTMTE (Севастополь, 2021), «Информационные технологии в науке и производстве» (Омск, 2021, 2018, 2016), International Conference on Industrial Engineering (Челябинск, 2018), «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций – МРДМК» (Екатеринбург, 2017, 2016, 2009), «Материаловедение. Машиностроение. Энергетика» (Екатеринбург, 2016), «Параллельные вычислительные технологии – ПАВТ» (Екатеринбург, 2015; Челябинск, 2013), «Новые материалы и технологии – НМТ» (Москва, 2012, 2010), «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике – Hi-Tech» (Санкт-Петербург, 2012), Advanced Computer and Information Technologies – ACIT (Екатеринбург, 2012), «Механика микронеоднородных материалов и разрушение – МММР» (Екатеринбург, 2012), International Workshop on Advanced Spectroscopy and Optical Materials – IWASOM (Poland, 2011), Europhysical Conference on Defects in Insulating Materials – EURODYM (Hungary, 2010).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы представлены в 6 статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 5 статей проиндексировано в международных базах Scopus и WoS; имеется свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы составляет 150 страниц, в том числе 49 рисунков, 6 приложений. Список цитированной литературы содержит 116 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении сформулированы актуальность темы исследования, цель диссертационной работы, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту. Приводятся сведения об апробации работы, достоверности полученных результатов, личном вкладе автора и структуре диссертации.

Первая глава *«Анализ проблематики применения средств компьютерного моделирования механической обработки в задачах автоматизации технологической подготовки производства»* носит обзорный характер, содержит аналитическую информацию о проблематике совершенствования процессов проектирования и технологической подготовки производства деталей машин и приборов из прогрессивных хрупких материалов с уникальным набором служебных характеристик за счет повышения эффективности использования программных решений CAE/CAM и их более глубокой интеграции. Обосновывается актуальность и необходимость развивать новые методы интеграции отечественных систем автоматизированного проектирования с привлечением облачных технологий.

Анализ научно-технических источников информации и текущих возможностей компонентов программного обеспечения САПР и АСТПП показывает, что современные САПР изделий машиностроения и приборостроения имеют развитые средства инженерного анализа для расчета напряжений в виде встроенных или автономных программ CAE. Программы инженерного анализа CAE интегрированы с программами геометрического моделирования CAD и ориентированы на обеспечение эксплуатационных характеристик изделия, включая прочность конструкции. Программы CAE в настоящее время не интегрированы с программами технологической подготовки CAM, но их применение для компьютерного моделирования технологий механической обработки возможно и актуально в связи с существенным изменением номенклатуры инженерных материалов, появлением и активным внедрением новых труднообрабатываемых материалов.

Особенность моделирования напряженно-деформированных состояний в процессах механической обработки, не совпадающая по формулировке с задачами обеспечения прочности конструкций, заключается в следующем: напряжения в зоне резания, в отличие от нагруженных деталей, специально создаются таким образом, чтобы обеспечить локальное разрушение материала режущим инструментом.

Нерешенные задачи интеграции средств компьютерного инженерного анализа в автоматизированное проектирование технологических процессов механической обработки применительно к хрупким материалам включают: создание в структуре программно-технического комплекса средств автоматизации проектирования компонентов математического обеспечения (моделей объекта проектирования и алгоритмов решения задачи в процессе проектирования) и соответствующих компонентов программного обеспечения (программных модулей), а также выбор необходимых компонентов технического обеспечения (каналов связи, средств передачи данных, редактирования информации, построения сетевых структур).

Вторая глава *«Разработка модели и алгоритма для поиска параметров режима резания хрупких материалов с применением средств САЕ»* содержит результаты разработки формализованной модели и соответствующей компьютерной модели для анализа проектных решений в автоматизированной системе технологической подготовки производства при выборе параметров режима резания хрупких материалов. Обсуждается разработанная компьютерная модель, которая может быть использована для автоматизации проектирования ряда технологий механической обработки, поскольку типизируют процессы по признаку хрупкого локального разрушения материала в зоне резания в приближении статического силового нагружения и представляет параметрами геометрию инструмента. Показан разработанный алгоритм параметрического компьютерного моделирования для количественной оценки напряжений в хрупком материале при механической обработке, который выделяет вычислительную стадию и может быть реализован в облаке с использованием зарубежных или российских средств компьютерного инженерного анализа САЕ.

Для лезвийной обработки твердых хрупких материалов используется алмазный инструмент, изготавливаемый из одного кристалла, на основе трехгранной или четырехгранной пирамиды с полной или усеченной вершиной. Геометрия пирамиды описана в формализованной модели угловыми параметрами лезвийного инструмента в соответствии с общепринятой в токарной обработке терминологией (рисунок 1). В формализованной модели формообразование риски при прохождении алмазного инструмента по поверхности пластины из хрупкого материала можно описать по аналогии с первым проходом резца при нарезании резьбы на токарном станке.

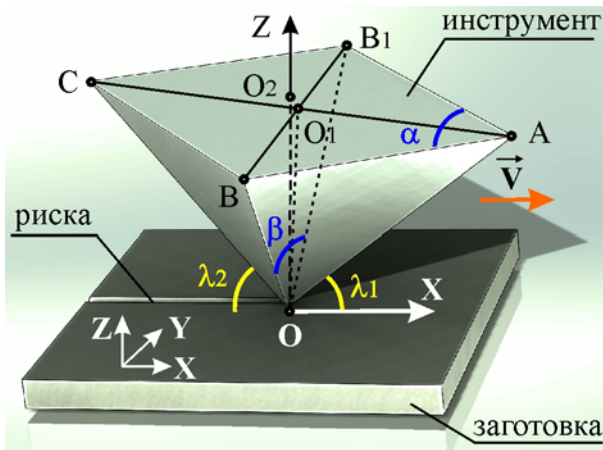


Рисунок 1 – Параметрическая геометрическая модель режущей части алмазного инструмента

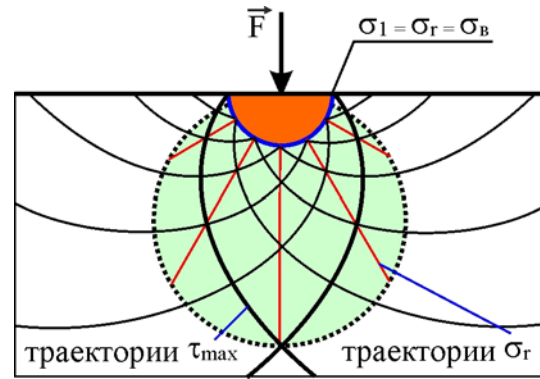


Рисунок 2 – Зона локального разрушения хрупкого материала в результате нажимного воздействия инструмента на поверхность

Формализованная модель учитывает особенности лезвийной обработки хрупкого материала и рассматривает распространение сжимающих ($\sigma_{сж}$) и максимальных касательных ($\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$) напряжений в зоне локального разрушения (рисунок 2). При силовом воздействии режущего инструмента хрупкий материал срезаемого слоя претерпевает упругую деформацию и скалывание. Предположение о том, что в установившемся режиме резания контактное время достаточно велико по сравнению с характерным временем волновых процессов, позволяет рассматривать поведение хрупких материалов в приближении статического силового нагружения. Качество обработанной поверхности хрупкого материала определяется наличием поверхностных сколов и подповерхностных дефектов.

Обоснован критерий для оценки протяженности дефектной зоны в обработанном хрупком материале в соответствии с формализованной моделью. В рамках упругой модели хрупкого разрушения образовавшийся дефектный слой ограничен в пространстве остановившимися трещинами. Трещины возникают в зоне действия разрушающих нормальных напряжений сжатия и распространяются вдоль траекторий (изостат) максимальных касательных напряжений. Распространение трещины останавливается при выполнении одного из трех условий: 1) при встрече растущей трещины с другой трещиной; 2) при выходе растущей трещины на поверхность; 3) при выходе растущей трещины в область, где напряжения оказываются меньше напряжений разрушения.

Алгоритм поиска параметров режима резания хрупких материалов с применением средств компьютерного инженерного анализа CAE в составе интегрированной программной среды CAE/CAM показан на рисунке 3. В рамках сформулированной модели разработанный алгоритм предполагает использование решателя программы CAE для расчета напряжений в локальной зоне резания, где режущий инструмент находится в контакте с об-

рабатываемым хрупким материалом, в соответствии с задаваемыми параметрами модели. Соответственно, ключевым фактором интеграции CAE/CAM является параметрическое моделирование технологических процессов. По расчетным напряжениям проводится анализ протяженности поверхностных и подповерхностных разрушений в хрупком материале при силовом воздействии на поверхность режущего инструмента.



Рисунок 3 – Алгоритм компьютерного моделирования технологического процесса механической обработки средствами CAE

На схеме показаны операции, выполняемые последовательно в трех модулях программы CAE: 1) работа *препроцессора* завершается созданием расчетной сетки и заданием граничных условий вычислительной модели; 2) *процессор* выполняет вычисление напряжений на расчетной сетке и записывает расчетные данные в файл результатов; 3) *постпроцессор* читает расчетные данные из файла результатов, проводит с ними вычисления в соответствии с формализованной моделью, при необходимости визуализирует выбранные расчетные величины в графическом окне.

Разработанный алгоритм выделяет наиболее ресурсоемкую процессорную стадию компьютерного моделирования и допускает выполнение расчетов процессором на удаленной расчетной станции. Препроцессорные

и постпроцессорные операции могут быть выполнены как встроенными модулями программы CAE в интерактивном режиме, так и автономными программами, разработанными в диссертационной работе. Запись данных в текстовый файл и передача данных в виде текстовых файлов позволяет организовать быстрый обмен информацией между удаленным компьютером с установленной программой CAE и рабочим компьютером технолога.

Третья глава *«Программная реализация разработанного алгоритма компьютерного моделирования в распределенной системе автоматизированного проектирования»* содержит результаты реализации разработанного алгоритма для компьютерного моделирования внутренних напряжений в хрупком материале при контактном воздействии режущего инструмента на раннем этапе разработки технологического процесса механической обработки и создания управляющей программы для станка с ЧПУ. Описаны разработанные программные модули инженерного анализа, выполняющие оценку дефектной зоны в параметрическом виде и осуществляющие автоматизацию компьютерного моделирования. Показана интегрированная работа отечественных систем автоматизированного проектирования и технологической подготовки с использованием облачных сервисов.

Для реализации алгоритма автоматизации проектирования процессов механической обработки хрупких материалов разработан программный модуль «Моделирование силового воздействия режущего инструмента на хрупкие материалы с покрытием» BritmaCUT, на который получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Разработанный модуль составлен на языке программирования APDL (ANSYS Parametric Design Language), позволяет выполнить компьютерное моделирование методом конечных элементов в среде CAE ANSYS процессов механической обработки хрупких материалов различного химического состава с учетом комплекса физических, геометрических и силовых параметров. Программа BritmaCUT может запустить вычисление на удаленном компьютере и выполняется в автоматическом режиме.

Построенная вычислительная модель силового воздействия режущего инструмента на хрупкую пластину с функциональным поверхностным слоем включает расчетную сетку из твердотельных конечных элементов, модели поведения материалов, граничные условия в виде ограничений степеней свободы и силовой нагрузки, контактные элементы и модель контакта, настройки решателя. Исходная геометрическая модель создается в параметрическом виде средствами препроцессора ANSYS. В модели присутствуют пластина, подложка и инструмент. Обособлен поверхностный слой, который может иметь в модели одинаковые с пластиной свойства или отличные, как по величине, так и по модели поведения. Параметрическое задание линейных размеров геометрии позволяет варьировать разме-

ры пластины, покрытия и инструмента. В геометрической модели может быть активирован один из трех вариантов формы режущей части инструмента – конус, трехгранная или четырехгранная пирамида (рисунок 4).

Созданный компьютерный инструментарий может быть использован для исследования и компьютерного анализа широкого спектра материалов и условий механической обработки. В качестве примера на рисунке 5 в графическом виде представлены результаты вычислительного исследования силового воздействия алмазного инструмента на пластину с поверхностным функциональным слоем, которые получены с использованием программы BritmaCUT. Графически представлено распределение расчетного параметра интенсивности напряжений при силовом воздействии алмазного инструмента с внутренним углом 140 градусов в сечении кремниевой пластины с покрытием толщиной 2 мкм и модулем нормальной упругости материала покрытия 200 ГПа.

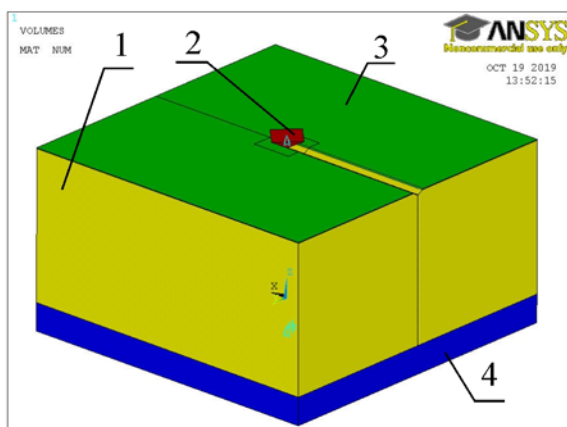


Рисунок 4 – Геометрическая модель, построенная по заданным параметрам средствами препроцессора ANSYS:
1 – пластина, 2 – инструмент,
3 – поверхностный слой, 4 – подложка

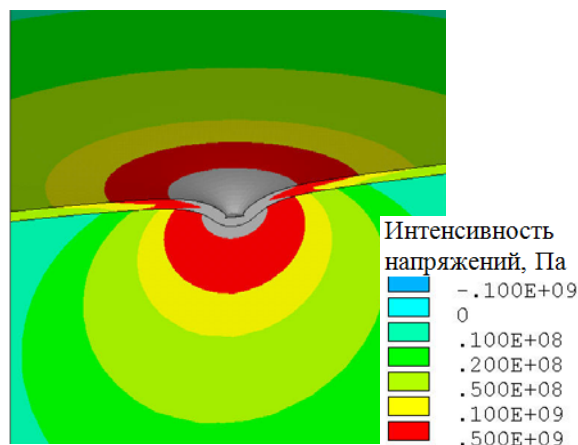


Рисунок 5 – Распределение напряжений в пластине из хрупкого материала с покрытием, визуализированное средствами постпроцессора ANSYS

Программный модуль BritmaCUT является средством автоматизации компьютерного моделирования при выполнении серии расчетов с разными параметрами модели в пакетном режиме (batch mode или silent mode) без вызова графического интерфейса ANSYS. Расчет может быть выполнен с персонального компьютера удаленно на серверах с другой архитектурой, например, на быстро вычисляющих под операционной системой Linux расчетных станциях и суперкомпьютерах.

В данной работе в соответствии с предложенным алгоритмом разработан препроцессорный модуль и составлен программный код на языке APREPRO (an Algebraic PREPROcessor for parameterizing finite element analyses) для решения в параметрическом виде задачи о напряженно-деформированном состоянии пластины из хрупкого материала под сило-

вым воздействием режущего инструмента с использованием в облаке решателя программы САЕ ФИДЕСИС. Препроцессорный модуль представляет собой текстовый файл, готовый к загрузке в командную строку программы САЕ. Препроцессорный модуль выполняет по заданным параметрам построение геометрии, назначение граничных и контактных условий, генерацию расчетной сетки и запуск решателя на расчет напряжений. Вычислительные эксперименты показали, что при использовании решателя САЕ ФИДЕСИС, реализованный в программе метод спектральных элементов оказывается более эффективным, чем метод конечных элементов.

Для организации вычислений решателем программы на удаленной расчетной станции в пакетном режиме созданы компоненты программного обеспечения на языке Python 2.8.10. В пакетном режиме решатель FidesysCalc.exe многократно вызывается как подпроцесс с изменяющимися параметрами без обращения к графическому интерфейсу.

В данной работе в соответствии с предложенным алгоритмом разработан постпроцессорный модуль на языке C++ для чтения, обработки и графического представления расчетных результатов (рисунок 6), который организован в виде автономной программы и может обрабатывать расчетные данные программы САЕ, представленные текстовым файлом. Такой подход позволяет использовать решатель САЕ для получения расчетных результатов на платном удаленном сервере и вести постпроцессорную обработку расчетных результатов на пользовательском компьютере.

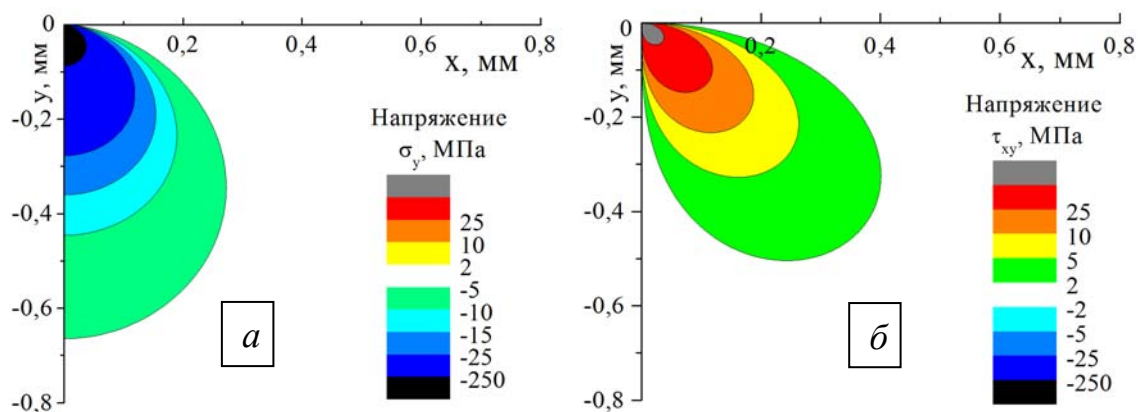


Рисунок 6 – Результат постпроцессорной обработки текстового файла с расчетными напряжениями в сечении пластины из хрупкого материала: нормальными (а) и тангенциальными (б)

Разработанные модули для препроцессорной и постпроцессорной обработки данных позволяют автоматизировать проектирование технологии механической обработки хрупких материалов на этапе расчетного обоснования технологических параметров. Применение разработанных программных модулей, реализующих алгоритм автоматизированного проектирования и технологической подготовки с использованием облачных

сервисов, проиллюстрировано на рисунке 7 для случая выполнения работы с мобильного телефона.

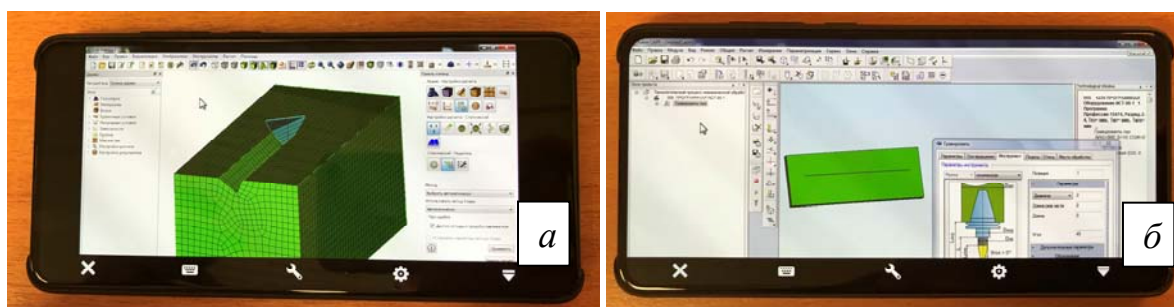


Рисунок 7 – Иллюстрация удаленной работы с мобильного телефона по компьютерному моделированию процесса резания (а) и подготовке управляющей программы для станка с ЧПУ (б)

С локального сервера (или персонального компьютера, мобильного телефона, смартфона, планшета) на удаленном расчетном компьютере с установленной программой ФИДЕСИС консольно запускается программный код, составленный нами на языке программирования APREPRO. Программный код содержит параметры вычислительной модели и производит компьютерное моделирование технологического процесса. Анализ напряжений позволяет выбрать технологические параметры процесса. Используя полученные данные, технолог запускает на другом удаленном компьютере программу АДЕМ и создаёт управляющую программу. Далее созданная программа передается на производственный участок для управления станком и выполнения технологического процесса. Предлагаемая структура распределенной облачной проектно-производственной системы не содержит принципиальных ограничений по типу технологий механической обработки и станочного оборудования. Информационная интеграция и согласованность подсистем проектирования САЕ и САМ проявляется в обработке автономным программным модулем выходных данных подсистемы САЕ и использовании результата обработки в качестве исходных данных при решении задач в подсистеме САМ.

В методе облачной интеграции средств компьютерного инженерного анализа хрупких материалов в автоматизированное проектирование технологических процессов механической обработки учтены две основные инфраструктурные проблемы программ САЕ: 1) требования по скорости вычислений и объему оперативной памяти обеспечиваются ресурсами облачных сервисов; 2) передача больших по объему файлов с расчетными результатами заменяется передачей текстовых файлов и постпроцессорной обработкой расчетных результатов на пользовательском компьютере.

Четвертая глава *«Верификация и апробация разработанных средств компьютерного моделирования на примере механической обработки хрупких материалов алмазным инструментом»* показывает приме-

нение разработанных программных модулей и реализацию механической обработки хрупких материалов. В натурных и вычислительных экспериментах исследованы технологические процессы скрайбирования кремниевых приборных пластин и гравирования стекла, которые выполняются алмазным инструментом. Разработанные программные модули при этом решают задачу об оценке дефектного слоя в зоне силового воздействия режущего инструмента на пластину из хрупкого материала с использованием сформированной инфраструктуры автоматизированного проектирования в распределенной системе CAE/CAM.

Компьютерному моделированию подвергнут технологический процесс алмазного скрайбирования кремниевых пластин. В силовой преобразовательной технике, в массовой управляющей электронике, в солнечной фотоэлектронике используются пластины из поликристаллического и монокристаллического кремния. Операция скрайбирования кремниевых пластин заключается в нанесении на поверхность однонаправленных рисок, которые далее используются для разделения приборной пластины на отдельные готовые приборы.

Скрайбирование пластины можно выполнить ребром или гранью алмазного инструмента с прямолинейными режущими кромками. К скрайбированию предъявляется требование минимизации дефектного слоя вдоль риски. Альтернативой технологическим процессам механической обработки хрупких материалов в приборостроении является лазерная резка. Вместе с тем, обработка лезвийным инструментом остается важной технологией обработки хрупких материалов, поскольку не все материалы, особенно функциональные покрытия, нанесенные на поверхность, способны выдерживать тепловое воздействие при обработке лазером.

С использованием разработанных программных модулей выполнены вычислительные эксперименты для поиска параметров режима резания кремниевой пластины алмазным резцом в программной среде ANSYS. Представлена методика подготовки свойств монокристаллического кремния для компьютерного моделирования приборных пластин. Сравнению подвергнуты три варианта геометрии вершины резца с одинаковой величиной внутреннего угла $\beta = 120^\circ$: конус, 3-гранная пирамида и 4-гранная пирамида. Изменение нормированной интенсивности напряжений вычислено в тангенциальном направлении от вершины резца (ось Y) по нормали к траектории движения инструмента, соответствующие зависимости представлены графиками на рисунке 8 (а).

Влияние внутреннего угла режущего инструмента на напряжения в пластине исследовано для конической геометрии. Напряжения в кремниевой пластине существенно зависят от внутреннего угла алмазного резца (рисунок 8 (б)): чем меньше угол β , тем выше интенсивность напряжений.

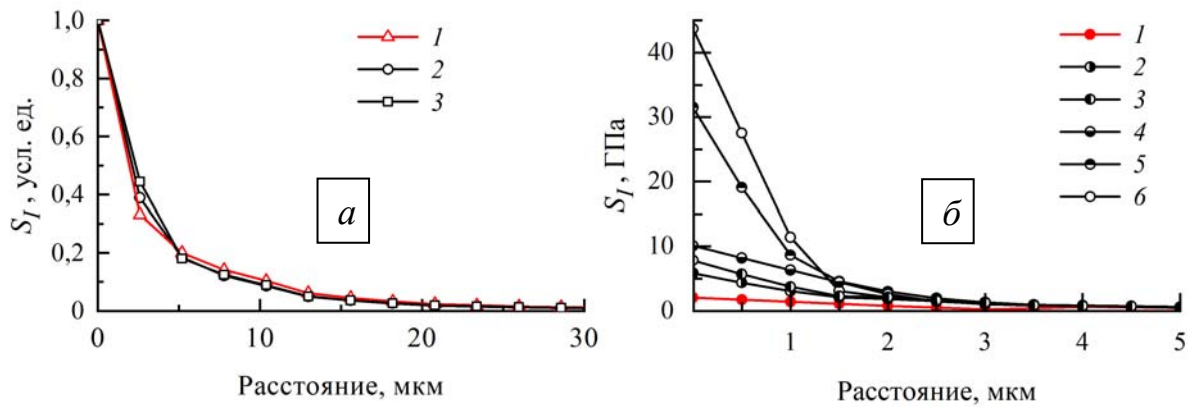


Рисунок 8 – Падение интенсивности напряжений S_I в кремниевой пластине от точки контакта с вершиной резца в тангенциальном направлении (ось Y) для геометрии резца – конус ($\circ$), 3-гранная (Δ) и 4-гранная ($\square$) пирамида (а); для конической геометрии с внутренним углом в градусах – 140 (1), 120 (2), 100 (3), 80 (4), 60 (5), 40 (6)

Наименьший уровень напряжений обеспечивается в случае внутреннего угла $\beta = 140^\circ$. Следует отметить, что широко применяемый в измерительных приборах алмазный индентор – пирамидка Берковича – имеет геометрию 3-гранной пирамиды с внутренним углом $\beta = 142.3^\circ$ и, согласно вычислительным экспериментам, представляет оптимальную геометрию алмазного инструмента для механической обработки кремниевых пластин.

На рисунке 9 показано распределение интенсивности напряжений в поверхностном слое кремниевой пластины в случае резания ребром и гранью 3-гранной пирамиды. Концентрация сверхвысоких разрушающих напряжений в узкой зоне под режущей кромкой, обозначенная на рисунке 9 (б) серым цветом, позволяет снизить тангенциальную составляющую силы резания в случае резания гранью, этот вариант выбран для реализации резания с наклоном инструмента относительно направления движения.

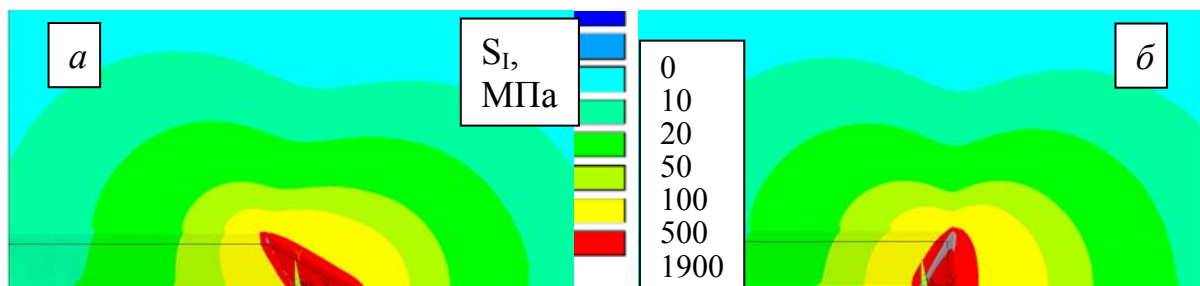


Рисунок 9 – Распределение интенсивности напряжений в поверхностном слое кремниевой пластины при резании ребром (а) и гранью (б) алмазной пирамиды

Темнопольное изображение риски, нанесенной ребром пирамиды в кристаллографическом направлении $\langle 112 \rangle$ на поверхности монокристаллической кремниевой пластины $\{111\}$, показано на рисунке 10. Темнопольное изображение выявляет симметричную зону подповерхностных дефектов шириной 25 мкм вдоль риски в виде трещин. На рисунке 11 показано изображение риски, нанесенной на поверхность кремниевой пла-

стины гранью наклоненной пирамиды, при этом одна поверхность риски оказывается свободной от дефектов.



Рисунок 10 – Темнопольное изображение риски, нанесенной ребром пирамиды

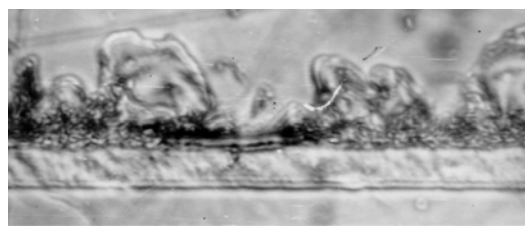


Рисунок 11 – Дефектный слой вдоль риски, нанесенной гранью пирамиды с наклоном

Рекомендуемые условия формирования качественных поверхностей при скрайбировании монокристаллической кремниевой пластины гранью алмазного инструмента включают: обработку гранью инструмента с минимальными радиусами скругления режущих кромок (менее 1 мкм); отношение длин главной режущей кромки к вспомогательной более 2,5 при углах в плане ϕ от 3 до 20°; возможно больший угол между передней поверхностью инструмента и рабочей плоскостью.

В программной среде САЕ/САМ выполнено проектирование технологии гравирования стекла коническим алмазным инструментом. При этом программа САМ АДЕМ была установлена на локальном компьютере технолога, программа САЕ ФИДЕСИС запущена на удаленной расчетной станции. В программе САЕ ФИДЕСИС выполнено параметрическое компьютерное моделирование напряжений в зоне силового воздействия инструмента на пластину (рисунок 12), выбран параметр режима резания – глубина резания: 0,4 мм. Выбранная глубина резания задана при разработке управляющей программы для станка с ЧПУ в САМ АДЕМ (рисунок 13).

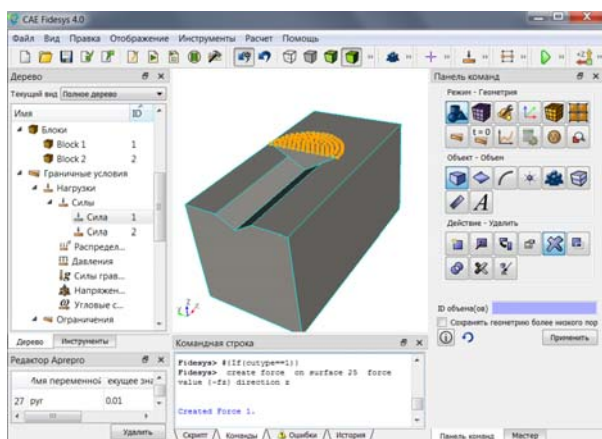


Рисунок 12 – Модель процесса гравирования в САЕ ФИДЕСИС

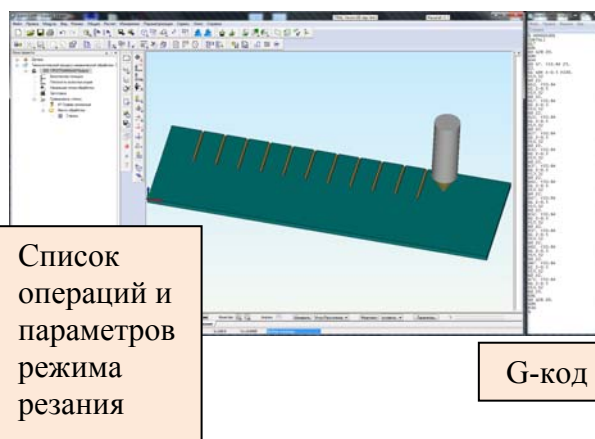


Рисунок 13 – Технологическая подготовка процесса в САМ АДЕМ

Гравирование пластины выполнено на фрезерном станке ROLAND MODELA MDX-40A коническим гравером ZDC-A2000 (рисунок 14).

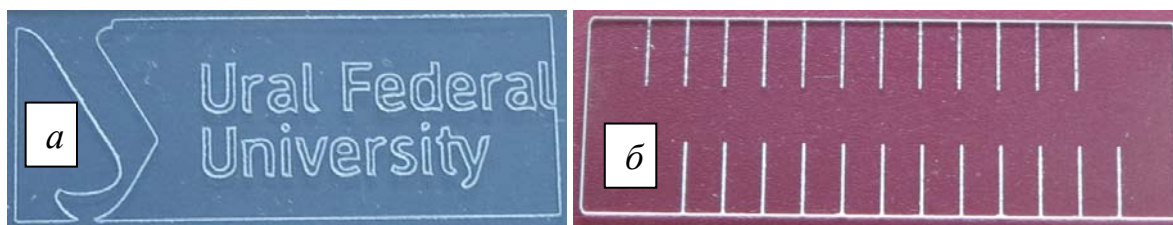


Рисунок 14 – Гравировка, выполненная на пластине из стекла (а),
и опытный образец с рисками (б)

Экспериментальная проверка дефектной зоны после обработки стекла алмазным гравером выполнена с помощью конфокального микроскопа Carl Zeiss AXIO LSM 710. Для этого подготовлены образцы с рисками, нанесенными на стекло коническим гравером с нарастающей глубиной резания. При задании глубины резания до 0.01 мм происходит пластическое деформирование материала, вдоль рисок не наблюдаются сколы и трещины (рисунок 15 а,б). С увеличением глубины резания вдоль рисок появляются трещины и сколы, которые определяют ширину дефектной зоны (рисунок 5 в,г).

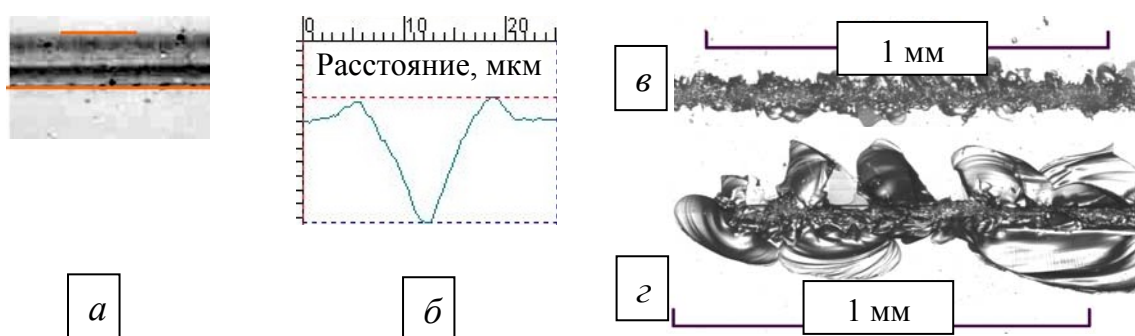


Рисунок 15 – Микроскопическое изображение риски глубиной 9 мкм (а)
и профиль риски (б); риски с допустимой (в) и недопустимой (г) шириной
дефектной зоны

При заданной глубине резания свыше 0.05 мм происходит переход к стабильному локальному разрушению материала в зоне резания с образованием стружки путем вырывания или откалывания частиц материала неправильной формы; соответствующий режим резания является оптимальным для процесса гравирования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проведенного исследования решена актуальная научная задача, направленная на совершенствование процессов технологической подготовки изготовления деталей из хрупких материалов, модель поведения которых при механической обработке режущим инструментом отличается от рассматриваемых классической теорией резания металлических сплавов. Эффективность функционирования АСТПП достигнута за счет предиктивной оценки качества обработанной поверхности и интеграции средств компьютерного инженерного анализа хрупких материалов в авто-

матизированное проектирование технологических процессов механической обработки с применением современных облачных методов. Основные выводы и результаты диссертационной работы заключаются в следующем.

1. Для компьютерного анализа проектных решений АСТПП **обоснована теоретическая модель** силового воздействия режущего инструмента на пластину из хрупкого материала, которая отличается формализованным параметрическим представлением геометрии режущей части инструмента. Предложенная формализованная модель адаптирует параметрическое описание токарного резца к процессам формообразования риски на поверхности пластины из хрупкого материала в рамках приближения квазистатического силового нагружения и предиктивно показывает границы первичного разрушения хрупкого материала, а также области подповерхностных трещин в зависимости от напряженного состояния в зоне резания.

2. В соответствии с обоснованной формализованной моделью **разработан алгоритм** поиска параметров механической обработки хрупких материалов с применением средств компьютерного инженерного анализа в интегрированной программной среде CAE/CAM.

3. Согласно разработанному алгоритму для количественной оценки напряжений в зоне резания методом конечных элементов с использованием решателя программы CAE ANSYS **разработан препроцессорный программный модуль на алгоритмическом языке APDL**, который отличается параметрическим представлением входных данных и автоматической записью расчетных результатов в текстовый файл, а также возможностью учесть влияние на образование дефектной области в обрабатываемом хрупком материале поверхностного слоя, обладающего иными физикомеханическими свойствами. На разработанный программный модуль BrittaCUT получено свидетельство о государственной регистрации.

4. Для расчетного обоснования параметров технологического процесса механической обработки по результатам предиктивного компьютерного анализа напряженного состояния обрабатываемого хрупкого материала методом спектральных элементов с использованием решателя программы CAE ФИДЕСИС **разработан препроцессорный программный модуль на алгоритмическом языке APREPRO** как средство информационной интеграции российских программ САМ АДЕМ и CAE ФИДЕСИС в парадигме распределенной автоматизированной проектно-производственной среды.

5. Для реализации разработанной модели и алгоритма в облаке **разработан постпроцессорный программный модуль на языке C++**, который запускается автономно на пользовательском компьютере и позволяет автоматизировать постпроцессорную обработку расчетных данных CAE по компонентам тензора напряжений для поиска и визуализации зоны подпо-

верхностных разрушений в обработанном хрупком материале при силовом воздействии режущего инструмента. Разработанный постпроцессорный программный модуль читает и анализирует массивы данных в узлах расчетной сетки из текстовых файлов.

6. Разработан метод интеграции в облаке программ САПР и АСТПП от разных разработчиков, а также удаленных вычислительных ресурсов для анализа технологических решений, который включает использование разработанных программных модулей и учитывает ресурсную специфику программ САЕ. Разработанный метод предполагает обеспечение требований по скорости вычислений и объему оперативной памяти за счет ресурсов облачных сервисов, а также автоматизацию препроцессорной и постпроцессорной обработки данных, которая выполняется с использованием разработанных программных модулей. Экономическая эффективность разработанного метода заключается в том, что из оплаченного времени пользования облачными сервисами исключаются этапы подготовки модели и анализа расчетных данных в интерактивном режиме, при этом передача информации между пользовательским компьютером и расчетной станцией осуществляется в виде текстовых файлов.

7. Разработанные средства автоматизированного проектирования применены в технологической подготовке механической обработки хрупких материалов и **апробированы при решении практических задач** по выбору оптимальных параметров скрайбирования приборной пластины из монокристаллического кремния и гравирования стекла. Эмпирически показано соответствие прогнозируемой дефектной зоны и наблюдаемой полосы разрушений вдоль риски, нанесенной на поверхность кремниевой пластины алмазным инструментом. На основании проведенных вычислительных экспериментов выявлены условия формирования качественных поверхностей при скрайбировании монокристаллической кремниевой пластины гранью алмазного инструмента.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Параметрическое моделирование технологического процесса, предложенное в диссертационной работе, определяет дальнейшее развитие темы в направлении оптимизации технологических параметров и автоматизации обработки расчетных данных в итерациях приближения к оптимальным значениям. Важным условием обеспечения достоверности результатов компьютерного моделирования процессов резания являются входные эмпирические данные о предельных характеристиках разрушения хрупких материалов, которые можно получить с применением метода склерометрии, но это потребует создания и обоснования специальной методики.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. **Ogorodnikov A. I.** Predictive Modeling of Scribing Brittle Material Using Diamond Tool with Improved Geometry / A. I. Ogorodnikov, Yu. N. Zhukov // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2019. – V. 2195. – P. 1867-1874; 0.4 п.л./ 0.2 п.л. (SCOPUS).

2. **Ogorodnikov A. I.** Computer-aided analysis of cutting processes for brittle materials / A. I. Ogorodnikov, I. N. Tikhonov // AIP Conference Proceedings. – 2017. – V. 1915. – AN 030014; 0.38 п.л./ 0.19 п.л. (SCOPUS, WoS).

3. **Ogorodnikov A. I.** Finite-element simulation of scratching a coated brittle plate / A. I. Ogorodnikov // AIP Conference Proceedings. – 2016. – V. 1785. – AN 030020; 0.23 п.л. (SCOPUS, WoS).

4. Zhukov Yu. N. Cutter for Splitting Brittle Sheet Blanks / Yu. N. Zhukov, E. E. Tikhonov, K. M. Savinykh, **A. I. Ogorodnikov** // Russian Engineering Research. – 2015. – V. 35, No. 6. – P. 413–416; 0.33 п.л./ 0.08 п.л. (SCOPUS).

Жуков Ю. Н. Лезвийный инструмент для разделительных операций хрупких листовых заготовок / Ю.Н. Жуков, Э.Е. Тихонов, К.М. Савиных, **А. И. Огородников** // Вестник машиностроения. – 2015. – № 3. – С. 25-29; 0.33 п.л./ 0.08 п.л.

5. Власов В. Н. Компьютерная оценка ожидаемого качества в системе управления технологическими процессами механической обработки / В. Н. Власов, О. М. Огородникова, **А. И. Огородников** // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2015. – №1. – С. 146-150 0.33 п.л./ 0.11 п.л.

6. **Ogorodnikov A. I.** Simulation of defect zones in scribed silicon wafers / A. I. Ogorodnikov, O. M. Ogorodnikova, I. N. Tikhonov // Materials Science and Engineering: IOP Conf. Series. – 2010. – V. 15. – AN 012046; 0.33 п.л./ 0.11 п.л. (WoS).

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

7. Огородников А. И. Моделирование силового воздействия режущего инструмента на хрупкие материалы с покрытием "BritmaCUT" / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616642. – Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 15 июля 2013 г.

Другие публикации:

8. Огородников А. И. Интеграция программ CAE и CAM в составе распределенного производства / А. И. Огородников // Физика. Технологии. Инновации : тезисы докладов VIII Международной молодежной научной конференции, 17-21 мая 2021 г. – Екатеринбург : изд-во УрФУ, 2021. – С. 947-948; 0.08 п.л.

9. Огородников А. И. Моделирование силового воздействия режущего инструмента на хрупкий материал с выделенным поверхностным слоем / А. И. Огородников // Информационные технологии в науке и производстве :

материалы VIII Всероссийской молодежной научно-технической конференции; 20-21 апреля 2021 г. – Омск: изд-во ОмГТУ, 2021. – С. 67-74; 0.38 п.л.

10. Жуков Ю. Н. Формирование дефектного слоя при лезвийной обработке хрупких материалов / Ю. Н. Жуков, И. Н. Тихонов, А. И. Огородников // Известия вузов. Машиностроение. – 2019. – № 5. С. 10-16; 0.48 п.л./ 0.16 п.л.

11. Огородников А. И. Скрайбирование изотропной хрупкой пластины / А. И. Огородников // Информационные технологии в науке и производстве : материалы V молодежной научно-технической конференции, 22-26 апреля 2018 г. – Омск: изд-во ОмГТУ, 2018. – С. 119–124; 0.22 п.л.

12. Огородников А. И. Компьютерный анализ процесса лезвийной обработки хрупких материалов / А. И. Огородников, И. Н. Тихонов // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций : сборник материалов XI международной конференции, 11-15 декабря 2017 г. – Екатеринбург, 2017. – С. 88; 0.08 п.л./ 0.04 п.л.

13. Огородников А. И. Компьютерное исследование процессов резания пластины с выделенным поверхностным слоем / А. И. Огородников // Информационные технологии в науке и производстве: материалы III Всероссийской молодежной научно-технической конференции, 8-9 февраля 2016 г. – Омск: изд-во ОмГТУ, 2016. – С. 187-192; 0.36 п.л.

14. Огородников А. И. Конечно-элементный анализ скрайбирования хрупкой пластины с функциональным покрытием / А. И. Огородников // Материаловедение. Машиностроение. Энергетика: сборник научных трудов международной научной конференции, 6-11 июля 2015 г. – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – С. 438-443; 0.4 п.л.

15. Огородников А. И. Включение суперкомпьютера в АСУТП / А. И. Огородников, С. И. Рябухин // Параллельные вычислительные технологии : труды международной научной конференции ПАВТ'2015, 1-5 апреля, 2015 г. – Екатеринбург : изд-во УрФУ, 2015. – С. 214; 0.08 п.л./ 0.04 п.л.

16. Огородников А. И. Разработка программного модуля в среде ANSYS APDL для численного исследования новых технологий и материалов приборостроения / А. И. Огородников // Научное обозрение. – 2013. – №1. – С.119-123; 0.29 п.л.

17. Огородников А. И. Реализация вычислительного эксперимента в грид-системе с удаленным доступом / А. И. Огородников, С. И. Рябухин // Параллельные вычислительные технологии: труды международной научной конференции ПАВТ'2013, 1-5 апреля 2013. – Челябинск: изд-во Южноуральского государственного университета, 2013. – С.613; 0.08 п.л./ 0.04 п.л.

18. Ogorodnikov A. I. Computer simulation of machining processes in high-precision electronics engineering / A. I. Ogorodnikov // Инженерная мысль машиностроения будущего : сборник материалов Всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием, 14-16 ноября 2013 г. – Екатеринбург : УрФУ, 2013. – С. 83-86; 0.24 п.л.

19. Огородников А. И. GRID-офис как эффективный метод производительных инженерных вычислений / А. И. Огородников, С. И. Рябухин // Новые материалы и технологии : материалы Всероссийской научно-технической конференции НМТ-2012, 20-22 ноября 2012 г. – Москва : МАТИ, 2012. – С. 373-374; 0.06 п.л./ 0.03 п.л.

20. Ogorodnikov A. I. Scratching and tension on the surface of brittle materials / A. I. Ogorodnikov // Высокие технологии, экономика, промышленность : сборник статей XIII международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике» HiTechXIII, 24-26 мая 2012 г. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 11-14; 0.22 п.л.

21. Огородников А. И. Конечно-элементное моделирование процессов механической обработки кремния / А. И. Огородников, И. Н. Тихонов // Механика микронеоднородных материалов и разрушение : тезисы докладов VII Российской конференции, 23-27 апреля 2012. – Екатеринбург, 2012. – С. 6; 0.1 п.л./ 0.05 п.л.

22. Ogorodnikov A. I. Finite element modeling of stresses and defects in brittle materials under force loading / A. I. Ogorodnikov, I. N. Tikhonov, O. M. Ogorodnikova // The Third International Workshop on Advanced Spectroscopy and Optical Materials : Book of Abstracts, 17-22 июля, 2011 г. – Гданьск, 2011. – Р. 151; 0.06 п.л./ 0.02 п.л.