

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Институт новых материалов и технологий
Кафедра электронного машиностроения

На правах рукописи

ОГОРОДНИКОВ Алексей Игоревич

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

Специальность: 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования
(промышленность)

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Тихонов Игорь Николаевич

Екатеринбург – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. Анализ проблематики применения средств компьютерного моделирования механической обработки в задачах автоматизации технологической подготовки производства	
11	
1.1 Анализ проблематики разработки и моделирования технологических процессов механической обработки хрупких материалов.....	11
1.2 Анализ проблематики применения средств САЕ для компьютерного моделирования технологических процессов механической обработки..	21
1.3 Анализ проблематики интеграции ресурсов САЕ и САМ в распределенной системе автоматизированного проектирования	30
1.4 Выводы по главе 1.....	37
Глава 2. Разработка модели и алгоритма для поиска параметров режима резания хрупких материалов с применением средств САЕ ...	
39	
2.1 Теоретическая модель образования дефектной зоны в хрупком материале при механической обработке.....	39
2.2 Компьютерная модель для оценки размеров дефектной зоны в хрупком материале при механической обработке	55
2.3 Алгоритм поиска параметров режима резания с применением средств САЕ	62
2.4 Выводы по главе 2.....	67
Глава 3. Программная реализация разработанного алгоритма компьютерного моделирования в распределенной автоматизированной системе проектирования	
68	
3.1 Программный модуль для расчета напряжений в зоне резания на языке APDL.....	68
3.2 Программный модуль для расчета напряжений в зоне резания на языке APREPRO	87
3.3 Автономный программный модуль для постпроцессорной обработки расчетных напряжений	91

3.4 Выбор средств интеграции ресурсов САЕ/САМ в распределенной системе автоматизированного проектирования.....	94
3.5 Выводы по главе 3	103
Глава 4. Верификация и апробация разработанных средств компьютерного моделирования на примере механической обработки хрупких материалов алмазным инструментом	105
4.1 Верификация разработанной компьютерной модели для технологии скрайбирования кремниевой пластины	105
4.2 Апробация разработанных средств компьютерного моделирования для технологии гравирования стекла	120
4.3 Выводы по главе 4	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
Список основных сокращений.....	128
Список условных обозначений	130
Список литературы	132
Приложение П1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	143
Приложение П2. Выбор параметров решения на сетке в программе ФИДЕСИС	144
Приложение П3. Совместимость программных средств удаленного доступа с операционными системами	146
Приложение П4. Методика подготовки свойств монокристаллического кремния для компьютерного моделирования приборных пластин	147
Приложение П5. Документы об использовании результатов диссертационной работы	149

ВВЕДЕНИЕ

Принципиально важной особенностью современных отраслей машиностроения и приборостроения является применение компьютерных методов моделирования и инженерного анализа на всех этапах проектирования, производства и эксплуатации технически сложных изделий. Внедрение цифровых технологий в производственные процессы и переход к цифровому производству способствует повышению эффективности и производительности труда в промышленности, но требует развития информационной базы проектирования и предпроизводственной подготовки вместе с необходимыми моделями, алгоритмами, методами и средствами для построения автоматизированной проектно-производственной среды.

Актуальность темы исследования. Существенное сокращение времени и материальных затрат на проектирование новых изделий и технологий их изготовления достигается в настоящее время за счет применения в машиностроении и приборостроении средств инженерного анализа, с помощью которых можно тестировать, исследовать и оптимизировать цифровые прототипы изделий на предпроизводственной стадии. 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 системах автоматизации проектирования (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 автоматизированных систем технологической подготовки производства (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 (моноцирсталические, 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.

Курс на импортозамещение в ключевых отраслях индустрии Российской Федерации, закрепленный, в частности, Приказом Министерства связи «Об утверждении плана по импортозамещению программного обеспечения» от 01.02.2015 № 96, становится также немаловажным фактором развития отечественных средств компьютерного инженерного анализа и подсистем автоматизированного проектирования.

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. 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. Вместе с тем, разработанные модели технологических процессов в полной мере не реализованы в виде готовых к использованию программных продуктов в составе САПР и АСТПП, более того, 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 САЕ (Computer-Aided Engineering) – САМ (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 методами механической обработки с учетом предварительной оценки качества обработанной поверхности за счет интеграции средств компьютерного инженерного анализа САЕ в автоматизированную систему технологической подготовки производства САМ. Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач исследования:

- 1) разработать модель и выбрать критерии для расчетного обоснования технологических параметров механической обработки хрупких материалов с учетом предварительной оценки качества обработанной поверхности средствами инженерного анализа в программной среде САЕ;
- 2) разработать алгоритм параметрического компьютерного моделирования эффектов силового воздействия режущего инструмента на хрупкий материал для автоматизации проектирования в интегрированной программной среде САЕ/САМ;
- 3) разработать программные модули, реализующие алгоритм параметрического компьютерного моделирования, для автоматизации техноло-

гической подготовки процессов механической обработки хрупких материалов в части расчетного обоснования параметров режима резания;

4) разработать и апробировать метод интеграции средств компьютерного инженерного анализа хрупких материалов в автоматизированное проектирование технологических процессов механической обработки с использованием облачных сервисов.

Объект и предмет исследования: *объект исследования* – процесс технологической подготовки производства деталей из хрупких материалов на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) в интегрированной программной среде САЕ/САМ; *предмет исследования* – средства инженерного анализа качества обработанной поверхности на этапе проектирования технологических процессов механической обработки и методы интеграции САЕ/САМ; *область исследований* соответствует пункту 3 паспорта специальности 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования.

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 САЕ, 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 САМ и удаленной расчетной станцией с установленной программой САЕ. Разработанные программные модули позволяют автоматизировать технологическую подготовку процессов механической об-

работки хрупких материалов на этапе расчетного обоснования параметров режима резания и применить методы оптимизации для поиска наилучших параметров режима резания.

3. Разработан и апробирован метод интеграции средств компьютерного инженерного анализа хрупких материалов в автоматизированное проектирование технологических процессов механической обработки, отличающийся применением облачных сервисов.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке модели и алгоритма оценки дефектной зоны в хрупком материале при силовом воздействии режущего инструмента средствами инженерного анализа САЕ. Предложенный формализованный подход к параметрическому моделированию технологических процессов резания хрупких материалов позволяет интегрировать средства инженерного анализа в автоматизированную технологическую подготовку таких процессов 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 использована

ны отечественные системы автоматизированного проектирования САЕ ФИДЕСИС, САМ АДЕМ. Уникальность полученных программных решений показана в сравнении с лучшим зарубежным аналогом САЕ ANSYS. Программные модули написаны на языках APDL, APREPRO, C++, Python.

Положения, выносимые на защиту

1. 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/САМ, обеспечивающий повышение эффективности и работоспособности распределенной проектно-производственной системы с участием удаленного расчетного сервера.

3. Программные модули как средства автоматизации проектирования, реализующие параметрическое 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 авторское свидетельство); 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. Основные результаты диссертационной работы представлены на международных и российских научных конференциях: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment – ICMTMTE (Севастополь, 2021), International Youth Scientific Conference Physics. Technology. Innovations – PTI (Екатеринбург, 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 8 статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 5 статей проиндексировано в международных базах SCOPUS и WoS; в 14 тезисах докладов и статьях в трудах и сборниках материалов международных и российских конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы составляет 150 страниц, в том числе 49 рисунков, 5 приложений. Список цитированной литературы содержит 116 источников.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Первая глава носит обзорный характер, содержит аналитическую информацию о проблематике совершенствования процессов проектирования технологий механической обработки 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 российских систем автоматизированного проектирования и автоматизации технологической подготовки производства с привлечением облачных сервисов.

1.1 Анализ проблематики разработки и моделирования технологических процессов механической обработки хрупких материалов

Технологическая подготовка машиностроительного производства обеспечивает технологическую готовность производства с преимущественным применением методов технологии машиностроения при выпуске изделий и включает разработку технологических процессов механической обработки деталей, подготовку инструмента и технологической оснастки. Механическая обработка деталей и компонентов применяется также в производстве приборов. Новая проблематика в разработке технологических процессов механической обработки определяется стремительным изменением номенклатуры конструкционных и функциональных материалов в машиностроении и приборостроении [1], в результате которого доля металлических сплавов в общем объеме используемых инженерных материалов за последние десятилетия снизилась с 80 % до 25 % (рисунок 1.1).

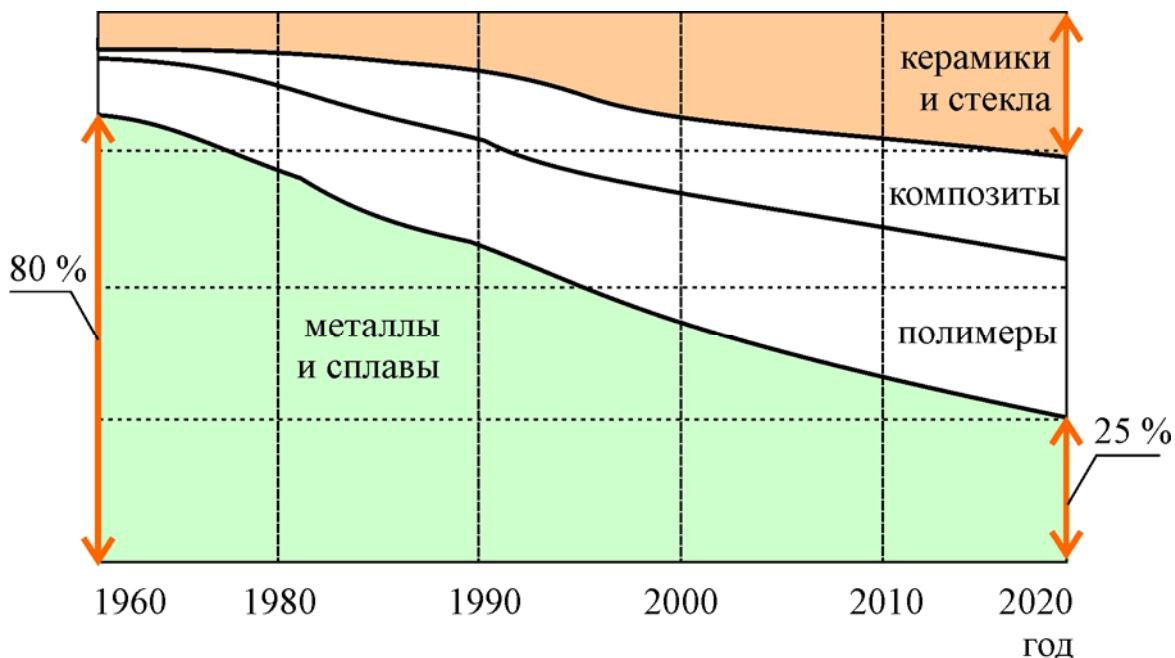


Рисунок 1.1 – Диаграмма изменения номенклатуры инженерных материалов в последние десятилетия

С появлением большого количества новых материалов, конструкционные и технологические свойства которых в значительной мере отличаются от традиционных металлических сплавов, происходит революционное преобразование технологических процессов изготовления новых деталей и компонентов машин и приборов, в том числе, – полупроводниковых и оптико-электронных приборов [2]. Такое преобразование требует разработки новых методов технологической подготовки производства и дальнейшего развития средств автоматизации проектирования с учетом тех прогрессирующих возможностей, которые предоставляются автоматизированными системами управления современным технологическим оборудованием и ресурсами глобальной информационной инфраструктуры.

В соответствии с обсуждаемой тенденцией изменения номенклатуры инженерных материалов увеличивается доля ответственных деталей и компонентов изделий машиностроения и приборостроения, которые выполняются из хрупких неметаллических материалов (керамики [3], ситаллы [4], ферриты, стекла [5], кварц, драгоценные и полудрагоценные мине-

ралы), в том числе – из новых композиционных материалов [6], способных выдерживать повышенные механические, химические и тепловые нагрузки благодаря отличному сочетанию служебных характеристик (например, износостойкости в сочетании с заданными электрофизическими свойствами).

Вместе с тем, твердые хрупкие материалы относятся к группе труднообрабатываемых материалов [7] и вызывают серьезные проблемы на этапе технологической подготовки производства в связи с недостатком сведений о физике их структурных преобразований при механической обработке и отсутствием достоверных теоретических моделей. Именно для таких материалов возникает необходимость привлекать современные методы моделирования и инженерного анализа на базе систем автоматизированного проектирования при разработке технологических процессов с целью повышения качества изделий и снижения стоимости работ. Средства компьютерного инженерного анализа привлекаются для оценки качества обработанной поверхности и минимизации внутренних микротрещин в хрупком материале с учетом направления их распространения.

Для изделий машиностроения в общем случае качество обработанной поверхности определяется состоянием поверхностного слоя детали (заготовки) после воздействия на нее одним или несколькими последовательно применяемыми технологическими методами. Состояние поверхностного слоя характеризуется шероховатостью, волнистостью, а также его физико-механическими свойствами. Физико-механические свойства поверхностного слоя обуславливаются твердостью, структурными и фазовыми превращениями, деформацией кристаллической решетки материала, а также величиной, знаком и глубиной распространения остаточных напряжений. В случае хрупких материалов существенной характеристикой качества обработанной поверхности является направление внутренних микротрещин, которые могут реализоваться в поверхность разрушения [8] и образовать поверхностные сколы. Соответственно, качество поверхности,

наличие дефектов и микротрещин, влияет на надежность работы полупроводниковых приборов в экстремальных условиях, например, в космосе.

Следует отметить разнообразие актуальных областей применения хрупких материалов в технике и общность проблематики их моделирования для задач технологической подготовки производства. Так, для изготовления теплонагруженных деталей авиационной и космической техники используются твердые конструкционные материалы, в частности, керамические композиты с уникальным комплексом эксплуатационных свойств. Эффективной механической обработке таких деталей препятствует повышенная хрупкость обрабатываемого материала [9]. При их лезвийной и абразивной обработке на поверхности может формироваться дефектный слой, содержащий микротрещины [10], которые снижают износостойкость и длительную прочность деталей в условиях одновременного воздействия знакопеременной силовой нагрузки, высокой температуры и окислительной рабочей среды. Дефектный слой обработанной поверхности хрупкого конструкционного материала становится также критичным фактором прочности и эксплуатационной надежности в случаях соединения деталей с натягом и узлов трения [11].

В отличие от металлических сплавов, для которых дефектный слой обработанной поверхности образован преимущественно пластической деформацией и может быть нивелирован термической обработкой, в хрупких материалах убрать нагревом микротрещины дефектного слоя на поверхности после механической обработки не представляется возможным. Для хрупких материалов является актуальным предварительное моделирование процессов механической обработки на этапе разработки технологии с целью минимизировать дефектный слой обработанной поверхности и оптимизировать параметры режима резания [12]. Анализируя проблематику моделирования технологических процессов механической обработки хрупких материалов, следует учитывать, что при механическом формообразовании деталей из хрупких материалов путем удаления припуска на об-

работку с заготовки под видимой поверхностью изделия образуется особый слой, который отличается от основного массива накопленными негативными изменениями внутренней структуры обрабатываемого материала.

Характер изменения структуры поверхностных слоев под воздействием лезвийного инструмента изучен для материалов с упруго-пластической моделью поведения при силовом нагружении. К настоящему времени подробно рассмотрены физические явления, составляющие процесс резания металлических сплавов [13, 14], которые включают локализованную пластическую деформацию и наклеп обработанной поверхности; скатие и сдвиг микрообъемов материала в срезаемом слое, прилегающем к передней поверхности режущей части инструмента; трение на контактных поверхностях инструмента и заготовки. В меньшей степени изучены процессы механической обработки неметаллических материалов. Научную основу для выполнения исследовательских работ по моделированию процессов резания неметаллических материалов в УрФУ создали С.И. Самойлов [15], Ю.С. Шарин [16], Ю.Н. Жуков [17], И.Н. Тихонов [18, 19]. К процессам механической обработки деталей из неметаллических материалов в машиностроении относятся фрезерование (глубинное шлифование по целиому), сверление и зенкерование отверстий, координатное и профильное шлифование кромки и фацета, гравирование, резка.

Отличительной особенностью хрупких материалов и хрупких состояний материалов является их поведение при разрушении [20]: хрупкие материалы разрушаются без существенных остаточных деформаций. В данной диссертационной работе рассматривается случай хрупкого разрушения материала после упругой деформации, когда при силовом нагружении в момент достижения предела прочности материал мгновенно переходит из чисто упругого состояния в разрушенное [21].

По внутренней микроструктуре хрупкие материалы электронных и оптических устройств разделяются на монокристаллы (монокристаллические анизотропные материалы), керамики (поликристаллические изотроп-

ные материалы), стекла (аморфные изотропные материалы) и композиты (макроизотропные составные материалы).

В силовой преобразовательной технике, в массовой управляющей электронике, в солнечной фотоэлектроэнергетике используется поликристаллический и монокристаллический кремний [22]. Кремний также остается наиболее распространенным полупроводниковым и конструкционным материалом для производства различных приборов на базе микро-опто-электро-механических систем (МОЭМС), поскольку позволяет интегрировать в одном микромасштабном устройстве мультидисциплинарные функции (электроника, механика, оптика, гидродинамика).

Монокристаллический кремний имеет алмазоподобную кристаллическую решетку с ковалентными связями, поэтому при механическом нагружении он проявляет хрупкость и твердость. Кристаллическая решетка кремния относится к типу кубической гранецентрированной (ГЦК) с параметром решетки, равным 0,54307 нм. Твердость и прочность кристаллического кремния меньше, чем у алмаза, из-за большей длины связи между атомами Si-Si в решетке кремния по сравнению с длиной связи C-C в алмазе. Различие в твердости позволяет механически обрабатывать кремний алмазным инструментом: резать, полировать и шлифовать детали и компоненты из кремния ребрами или гранями кристаллов алмаза.

Используемый инструментальный материал для механической обработки полупроводниковых материалов, а также керамик, стекол, пластиков и композитов, – природные или синтетические алмазы с монокристаллической или поликристаллической структурой. Применение алмаза для лазерной обработки полупроводниковых материалов, имеющих высокую микротвердость (по Виккерсу – 21 ГПа для SiC, 11 ГПа для Si, 7 ГПа для Ge), обусловлено его уникальными свойствами (микротвердость выше 70 ГПа), прежде всего – износостойкостью (до 35 тысяч метров по пути резания при обработке кремния).

Структура поверхностного слоя после лезвийной обработки алмазным инструментом твердых монокристаллических материалов активно исследуется в связи с новейшими приложениями в электронной технике [23]. В теоретических и экспериментальных исследованиях используются методы нанесения рисок алмазным индентором. Проведенные экспериментальные исследования показывают, что при нанесении риски на поверхность пластин кремния, сапфира и карбида кремния образуется дефектный слой, который состоит из трещин, микротрещин и дислокаций [24]. В случае неоптимальных режимов и способов резания величина дефектного слоя в несколько раз превышает ширину нанесенной риски с сечением, близким к треугольному. Отдельные трещины распространяются на внешнюю плоскость пластины, образуя сколы – визуально наблюдаемые дефекты обработанной поверхности. Поскольку эксплуатация компонентов электронной техники с широкой зоной поверхностного повреждения не допустима, технологии ведут поиск прогрессивных способов обработки [25] и усложняют технологические процессы, что ведет к удорожанию готовых изделий.

К технологическим операциям механической обработки хрупких материалов при изготовлении электронных и оптических компонентов в приборостроении относятся резка монокристаллических слитков на плоскопараллельные пластины, разделение пластин на кристаллы, придание компонентам заданной геометрической формы, снятие слоя с поверхности, а также шлифование и полирование, скрайбирование [26]. Для выполнения перечисленных операций не могут быть использованы широко применяемые в машиностроении станки и справочные режимы резания, разработанные для обработки металлических сплавов. Это связано с повышенной хрупкостью монокристаллических и керамических материалов, стекол. Технологии механической обработки современных материалов для электронных и оптических приборов подробно представлены и описаны в зарубежных монографиях [27-29].

В последнее время активно изучаются и совершенствуются актуальные методы лезвийной обработки хрупких материалов в связи с разработкой новых перспективных устройств. Так, в наноэлектронику и точное приборостроение интенсивно внедряется карбид кремния SiC – сверхтвердый материал, обладающий химической инертностью, высоким уровнем теплопроводности и температурного сопротивления, повышенной жесткостью. Данный материал может быть использован в квантовых компьютерах, космических лазерных зеркалах, формах для горячего прессования асферических стеклянных линз. Существующие способы резания, даже с использованием самых твердых алмазных инструментов, не могут обеспечить необходимое качество поверхности перечисленных изделий. Соответственно, ведется поиск режимов и методов одноточечного алмазного точения (Single Point Diamond Turning – SPDT), которые позволяют создавать 3D геометрию и получать поверхность лучше по качеству, чем применяемые в приборостроении методы полирования [30]. Такие режимы и методы могут включать эффекты перехода к микропластическим деформациям, компьютерное моделирование которых основано на анализе напряженного состояния поверхностного слоя в локальной зоне воздействия на него режущим инструментом.

Теоретическое моделирование процессов механической обработки хрупких материалов учитывает основные положения теории хрупкого разрушения [31] и основывается на предположении, что новая поверхность образуется путем зарождения и развития трещины, опережающей движение инструмента. В рамках данной концепции резание можно моделировать как процесс вдавливания в хрупкий материал (рисунок 1.2) резца – несимметричного жесткого клина. В результате воздействия резца на хрупкий материал возникают трещины отрыва (I рода) или сдвига (II рода), развитие которых приводит к образованию стружки. Теоретическая модель [32] рассматривает два этапа локального хрупкого разрушения – 1) образование стационарной опережающей трещины и 2) распространение динами-

ческой или стационарно-динамической трещины, которая движется впереди резца со скоростью, равной или превышающей скорость перемещения инструмента V .

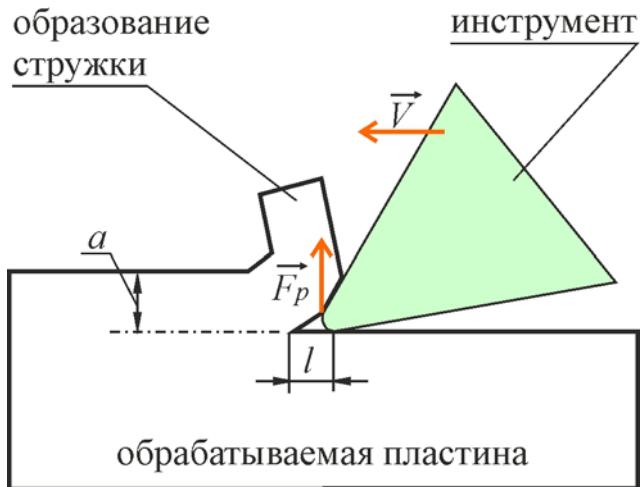


Рисунок 1.2 – К моделированию процессов механической обработки хрупких материалов: схема одностороннего расклинивания инструментом

На схеме твердый инструмент движется со скоростью V , при этом в соответствии с теоретической моделью хрупкого разрушения образуется стружка толщиной a и шириной b . В рассматриваемой теоретической модели по условию хрупкого разрушения Гриффитса [33] критическое усилие F_p , необходимое для распространения стационарной трещины длиной l при толщине стружки a с учетом энергии сдвига, когда $l < 3a$, определяется выражением [12]:

$$F_p = ab \sqrt{\psi E \frac{a}{3l^2 + 0.98a^2}} , \quad (1.1)$$

где a – толщина срезаемой стружки, b – ширина стружки, l – длина хрупкой трещины, ψ – удельная поверхностная энергия разрушения хрупкого материала, E – модуль нормальной упругости обрабатываемого материала.

Существующие теоретические модели разрушения хрупких материалов [34] определяют параметры, которые необходимо задать для компьютерного моделирования технологических процессов их механической обработки лезвийным инструментом. Необходимыми характеристиками обрабатываемого материала являются физико-механические свойства мате-

риалов, например, модуль нормальной упругости E , что обусловлено коэффициентами решаемых дифференциальных уравнений при определении напряженно-деформированного состояния хрупкого материала под действием силовой нагрузки. В настоящее время такие уравнения решаются численно методом конечных элементов с привлечением ряда коммерческих программ. В частности, система уравнений равновесия изотропного упругого тела в общем случае статического нагружения имеет вид [35]:

$$\frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k^2} + \frac{E}{2(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j} + \rho g_i = 0 , \quad (1.2)$$

где E – модуль нормальной упругости (модуль Юнга), ν – коэффициент поперечного сжатия (коэффициент Пуассона), x – пространственные координаты (с индексами i, j, k), u – компоненты вектора перемещений, ρ – плотность материала, g – компоненты вектора гравитации.

Альтернативой технологическим процессам механической обработки хрупких материалов в приборостроении является лазерная резка. Вместе с тем, обработка лезвийным инструментом остается важной технологией механической обработки деталей из хрупких материалов, поскольку не все материалы, особенно функциональные покрытия, нанесенные на поверхность, способны выдержать тепловое воздействие при обработке лазером.

Решение возникающих проблем механической обработки хрупких материалов состоит в исключении или уменьшении дефектного слоя обработанной поверхности, а также вероятности его возникновения в дальнейшем – при эксплуатации изделия, что в свою очередь, требует предварительного моделирования процессов образования дефектного слоя на этапе проектирования технологии с привлечением средств компьютерного инженерного анализа, и соответственно, – создания необходимых компонентов математического обеспечения (модели объекта проектирования и алгоритма решения задачи в процессе проектирования) в структуре программно-технического комплекса средств автоматизации проектирования.

1.2 Анализ проблематики применения средств САЕ для компьютерного моделирования технологических процессов механической обработки

В текущей практике автоматизированного проектирования изделий машиностроения и приборостроения быстро развивающиеся программные модули и многодисциплинарные комплексы САЕ в составе интегрированных систем CAD/CAE/CAM решают преимущественно задачи расчетного обоснования конструкторских решений, давая оценку номинальных и предельных состояний технических систем [36]. В перспективной парадигме цифрового производства предполагается применять компьютерное моделирование режимов эксплуатации изделия и симуляцию технологий изготовления деталей в программной среде САЕ, что в сочетании с сервисами суперкомпьютерного инжиниринга позволяет создавать цифровые прототипы [37] изделий, способные обеспечить более точное и полное описание проектируемых объектов.

В настоящее время использование программного обеспечения САЕ для компьютерного моделирования технологических процессов механической обработки ограничивается решением исследовательских задач [38], когда разрабатываются принципиально новые комплексные методы обработки и возникает необходимость конструировать уникальное оборудование для реализации нестандартных технологических процессов.

Все программы САЕ, которые используются для решения задач, связанных с автоматизированным проектированием и подготовкой производства механических узлов машин и приборов, можно разделить на два больших класса – конструкторские и технологические программы. Те конструкторские программы САЕ, в которых для решения дифференциальных уравнений применяется численный метод конечных элементов, универсальны и участвуют в расчетном обосновании конструкции при проектировании всех типов изделий. Благодаря применяемому математическому

обеспечению конечно-элементные комплексы САЕ многодисциплинарны и составляют преобладающий сектор программ данного класса.

Технологические программы САЕ узко специализированы на выполнение компьютерного моделирования и симуляции определенного типа технологических процессов изготовления заготовок, формообразования деталей и обеспечения их механических свойств. Конечно-элементное моделирование поддерживается коммерческими программами для технологических процессов литья металлических сплавов (ProCast [39], Полигон [40]) и пластмасс (MoldFlow [41]), обработки металлов давлением (Deform [42], QForm [43]), термообработки (ThermoSim [44], модуль QForm Heat Treatment [45]), сварки (SysWeld [46]), механообработки (модуль Deform Machining [47]). Ограничения метода конечных элементов и недостаточный уровень разработки теоретических моделей локального разрушения материалов обуславливают отсутствие в списке технологических программ САЕ специализированных программ для моделирования физических явлений и микроструктурных изменений материалов в технологических процессах механической обработки.

Механическая обработка материалов лезвийным инструментом составляет особый класс технологических процессов машино- и приборостроения, наиболее сложный для компьютерного моделирования, что связано с необходимостью учитывать большое количество нелинейных параметров, определяющих локальное разрушение материалов, нагрев, режимы резания, геометрию инструмента, трение и износ, образование и съем стружки, поведение поверхностного слоя и другие эффекты взаимодействия режущего инструмента с обрабатываемым материалом [48, 49]. Многие перечисленные эффекты в настоящее время не могут быть в полной мере учтены в компьютерных моделях. Классические работы по моделированию процессов механической обработки в машиностроении [50] базируются на полуэмпирических методах исследования с привлечением

большого объема справочных данных и статистическим обоснованием параметров модели.

Важным объектом моделирования является количественная оценка сил резания. В настоящее время для оценки усилий резания используются различные методы получения и обработки больших массивов экспериментальных данных. В качестве примера можно привести теоретическую модель лезвийной обработки, в которой главная составляющая силы резания $P_{\text{гл}}$ при токении представляется произведением степенных функций [51]:

$$P_{\text{гл}} = C_{\Sigma} K_{\Sigma} t_p^{p_1} s^{p_2} V^{p_3}, \quad (1.3)$$

где $P_{\text{гл}}$ – главная составляющая силы резания, сонаправленная с вектором скорости; C_{Σ} – эмпирический коэффициент, отражающий влияние постоянных факторов процесса резания; K_{Σ} – обобщенный поправочный силовой коэффициент, который может быть получен экспериментально или взят из справочников по режимам резания [52]; t_p – глубина резания; s – подача; V – скорость резания; p_1, p_2, p_3 – подбираемые в модели степенные показатели.

Недостаток классического полуэмпирического подхода к моделированию процессов механической обработки заключается в большом объеме затратных производственных экспериментов и в отсутствии четкой связи подобранных эмпирических коэффициентов с физической природой наблюдавших явлений. Программы САЕ могут предоставить новые возможности для вычислительного исследования и разработки перспективных технологий механообработки [53].

Следует отметить, что используемые преимущественно конструкторскими подразделениями конечно-элементные программы САЕ не имеют в своем составе готовых шаблонов и необходимых наборов свойств для моделирования процессов лезвийной обработки конструкционных материалов с особыми свойствами. Поэтому адаптация возможностей и средств САЕ для компьютерного моделирования и оптимизации технологических

процессов механической обработки является актуальным направления совершенствования систем автоматизированного проектирования и автоматизации технологической подготовки производства.

На основании анализа литературных источников нами выделены основные актуальные объекты компьютерного моделирования технологических процессов механической обработки и возможные практические приложения, которые представлены схемой на рисунке 1.3.

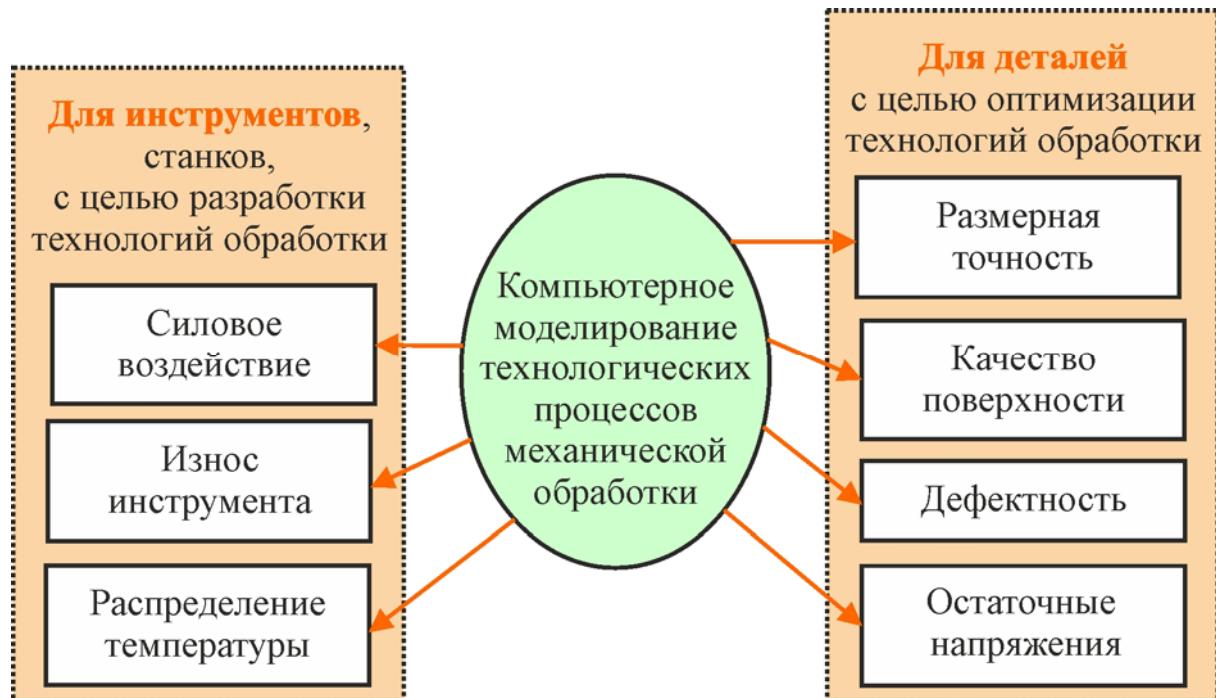


Рисунок 1.3 – Основные объекты и практические приложения компьютерного моделирования технологических процессов механической обработки

Ключевыми задачами компьютерного моделирования технологических процессов механической обработки могут быть выбор вида и размеров заготовки, определение припусков на обработку, выбор приспособлений и режущего инструмента, проектирование геометрии режущего инструмента и заготовки, выбор материалов для заготовки и инструмента, назначение параметров режима резания (глубина резания, подача, скорость резания), обоснование дополнительных технологических условий (гравитация, температура, вибрационное воздействие), оценка температурных полей и напряженно-деформированных состояний, уточнение модели тре-

ния скольжения между инструментом, заготовкой и стружкой. Перечисленные задачи не имеют готовых справочных решений для новых неметаллических материалов, в том числе – хрупких материалов, поэтому развитие и использование средств САЕ для быстрого поиска параметров и условий их обработки является актуальной областью научных исследований.

Особого внимания при технологической подготовке производства требуют изделия и материалы с уникальными поверхностными свойствами и функциональными покрытиями. Для обеспечения служебных свойств создаваемых приборов применяют тонкие металлические и диэлектрические пленки, различными методами воздействия формируют плоскую или пространственную структуру на поверхности хрупких компонентов, в том числе – на монокристаллических кремниевых пластинах [54]. Программы САЕ имеют средства для выделения в конечно-элементной модели тонких поверхностных слоев и анализа их поведения при нагружении [55].

Необходимость разрабатывать новые технологии для обработки материалов с особыми поверхностными свойствами и привлекать современный компьютерный инструментарий на этапе проектирования определяет актуальность развития компьютерных моделей и их последующей реализации в комплексах программ, разрешающих высокопроизводительные вычисления и вычислительные эксперименты. В этой связи следует выделить три важных особенности механической обработки хрупких материалов лезвийным режущим инструментом, которые требуют развития специальных подходов к определению граничных условий в моделях.

- 1. Механическая обработка направлена на управляемое локальное разрушение поверхностного слоя.* Соответственно, компьютерную модель процессов обработки резанием можно сформулировать как контактное, динамическое и кинематическое взаимодействие двух твердых тел – обрабатываемого объекта и режущего инструмента. Материал, срезаемый с поверхности, подвергается интенсивному силовому воздействию, причем только в зоне контакта с инструментом, локально и кратковременно. Под

действием приложенных сил небольшой объем обрабатываемого материала частично разрушается и удаляется с поверхности в виде стружки.

2. Границные условия включают сингулярный эффект. Системы автоматизированного проектирования и необходимые модели прочности хрупкой среды под действием сосредоточенной силы активно развиваются применительно к горным породам и строительным конструкционным материалам. В таких моделях нередко анализируются сингулярные напряжения и способы их представления конечным эквивалентом. Определение прочности в сингулярных точках требует специальных подходов, например, градиентный критерий прочности [56] для хрупких материалов учитывает неоднородное напряженное состояние и включает характерное напряжение $\sigma(r)$ и его относительное изменение на характерной длине δ :

$$\max_{0 \leq r \leq \delta} \frac{\sigma(r)}{1 + \delta |\nabla \sigma(r)| / \sigma(r)} = |\sigma_{\lim}|, \quad (1.4)$$

где $\sigma(r)$ – характерное напряжение в направлении распространения напряжения, σ_{\lim} – критическое напряжение; соответственно, росту градиента напряженного состояния $\nabla \sigma(r)$ отвечает увеличение прочности.

3. Модели поведения хрупких материалов с выделенным поверхностным слоем при силовом воздействии режущего инструмента не разработаны. Напряженно-деформированное состояние поверхностных слоев исследуется экспериментально методом нанесения риски алмазным инструментом в связи с решением проблем прочности покрытий и эффективности технологий их нанесения на оптические и электронные компоненты. Для исследования таких объектов представляют интерес численные методы, в частности, метод конечных элементов [57].

Программы САЕ с решателями, основанными на методе конечных элементов, используются для моделирования и вычислительного исследования напряженно-деформированных состояний инструмента и заготовки при лезвийной обработке. Теоретические основы МКЭ изложены в монографиях [58, 59]. В соответствии с основной концепцией МКЭ анализи-

руемая область (сплошная среда) разбивается на конечное число малых пространственных подобластей (конечных элементов) и представляется конечно-элементной расчетной сеткой. Приближенное решение дифференциальных уравнений, описывающих поведение технической системы в условиях заданного нагружения, ищется в виде разложения по базису из кусочно-непрерывных функций, каждая из которых отлична от нуля в достаточно малой области конечного элемента.

Конечные элементы контактируют друг с другом, передавая воздействие, в общих узловых точках (узлах). При моделировании процессов механической обработки материалов решаются задачи механики, и основными неизвестными дискретной модели являются перемещения u_k узловых точек конечного элемента, совокупность которых для элемента представляется в виде вектора $\{u\}_k = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}^T$, где N – общее число узловых перемещений конечного элемента. Узловыми перемещениями могут быть компоненты вектора перемещения узлов вдоль осей координат, а также углы поворота конечного элемента в узловых точках.

В пределах конечного элемента для вектора перемещения $\{u\}$ произвольной точки М задают аппроксимацию через узловые перемещения $\{u\}_k$:

$$\{u\} = [\Phi] \{u\}_k , \quad (1.5)$$

где величины Φ_{ik} , составляющие матрицу $[\Phi]$, являются функциями формы конечного элемента.

Функции формы Φ_{ik} конечного элемента выражают связь между узловыми перемещениями $\{u\}_k$ и перемещением произвольной точки тела. В качестве функций формы обычно используют полиномы; вне элемента данные функции полагаются равными нулю. По порядку аппроксимирующих полиномов обозначают порядок конечных элементов; в большинстве случаев используются линейные или квадратичные конечные элементы.

Анализ литературных источников показывает, что различные конечно-элементные программы САЕ могут быть использованы для компьютерного моделирования технологических процессов механической обработки

материалов. Точение, фрезерование и сверление металлов с пластической или упруго-пластической моделью поведения обрабатываемого материала моделируют в специализированном модуле программы DEFORM Machining. Поскольку разогрев рабочей зоны и системы охлаждения важны в технологиях механической обработки, как правило, на конечно-элементной сетке решается связанная термомеханическая задача.

Исследовательские задачи механической обработки решаются на двухмерных конечно-элементных сетках средствами программы ABAQUS Explicit [60], которая использует явные методы дискретизации при моделировании быстро протекающих процессов. Так, напряженное состояние тонких монокристаллических и поликристаллических пластин кремния в технологических процессах изготовления солнечных батарей исследовано в работе [61]. Методология численного исследования методом конечных элементов прочности хрупкого покрытия и распространения трещины в твердом или податливом износостойком покрытии при силовом нагружении представлена в работе [62], где рассматриваются различные теории контакта, влияние толщины и свойств покрытия, образование и развитие трещины, профиль которой задан изначально. На конечно-элементных моделях изучены процессы локального разрушения и частичного удаления материала в виде стружки [63]. Показано, что морфология стружкообразования зависит от параметров режима резания (скорость резания, величина подачи, глубина резания), от геометрии инструмента и его относительной ориентации к обрабатываемой поверхности, от контактного взаимодействия с учетом термомеханического нагружения и трения.

Аналогичные численные исследования ведутся с привлечением программ LSDYNA [64], MSC.Marc [65], AdvantEdge [66, 67] на двух- и трехмерных конечно-элементных моделях. В тех случаях, когда динамическая задача усложняется, например, к лезвийной обработке добавляется эффект вибрации, используется программный комплекс ANSYS Multiphysics [68, 69]. Так, влияние механических колебаний на качество приборных кри-

сталлов может быть не только негативным, но и полезным, если, например, вибрации специально генерируются в ультразвуковом диапазоне в зоне собственных резонансных частот конструкции прибора [70]. Соответственно, вибрационное резание снижает силовое воздействие инструмента.

Практическое применение результатов компьютерного моделирования процессов обработки материалов сопряжено с возможностью передать полученные данные в подсистему САМ, где создаются программы управления станком и назначаются параметры режима резания. Спецификой постпроцессорной обработки расчетных результатов в программах САЕ является возможность представления массива скалярных данных в виде изопараметрических областей на графических изображениях. Графическое представление расчетных результатов предполагает непосредственное участие специалиста в визуальном анализе данных.

Для автоматизации проектирования и интеграции подсистем автоматизированного проектирования САЕ и САМ полезным является инструментарий постпроцессора САЕ, позволяющий представлять расчетные параметры в виде таблиц, временных или пространственных зависимостей. Для поиска оптимальных параметров процесса механообработки требуется в качестве расчетных параметров проанализировать те физические величины, которые характеризуют эффективность процесса резания и качество обработанной поверхности. Такими величинами могут быть силы резания, температура в зоне резания, остаточные напряжения в заготовке, характеристики упругой и пластической деформации. Критериальные условия оптимизации можно сформулировать на основании выявленной зависимости между критериями, характеризующими эффективность резания (стойкость инструмента, качество и шероховатость обработанной поверхности) и начальными технологическими условиями. Соответственно, для реализации имеющихся возможностей программ САЕ требуется создание компонентов программного обеспечения (программных модулей) в структуре программно-технического комплекса средств автоматизации проектирования.

1.3 Анализ проблематики интеграции ресурсов САЕ и САМ в распределенной системе автоматизированного проектирования

В работах [60-70] показано, что с использованием программ САЕ выполняется компьютерное моделирование технологических процессов механообработки проблемных материалов. Причем, в отличие от технологических процессов литья или обработки давлением, для моделирования механообработки отсутствуют специализированные коммерческие программы. Соответственно, исследователями создаются и верифицируются необходимые компьютерные модели с использованием решателей многофункциональных программ САЕ, в том числе, – в составе интегрированных программных комплексов CAD/CAE/CAM.

Методическая и техническая проблематика создания интегрированной системы проектирования САЕ/САМ для технологических процессов механической обработки заключается в том, что подсистемы проектирования САЕ и САМ требуют разных машинных ресурсов и устанавливаются на разных компьютерах. В связи с высокой стоимостью многофункциональных программ САЕ и их повышенными требованиями к вычислительной мощности компьютера возможным способом их использования в разработке и симуляции технологий механообработки является установка на удаленном суперкомпьютере общего пользования и обращение по мере необходимости с привлечением облачных сервисов.

В последние годы облачные сервисы активно развиваются и становятся базовым ресурсом цифровой экономики, который пользуется большим спросом на мировом информационном рынке [71]. Концепция облачных сервисов включает структурную модель хранения и обработки данных, обеспечивающую удобный удаленный сетевой доступ к обобщенному спектру конфигурируемых вычислительных ресурсов (сетей, серверов, хранилищ, приложений, лицензионных программ, услуг). Облачные сервисы могут быть быстро подготовлены и использованы в цифровом произ-

водстве с минимальными усилиями конечного пользователя по их организации или обслуживанию. Через облачные сервисы решается вопрос объединения и неограниченного масштабирования информационных ресурсов и производственных мощностей, недоступных для индивидуального владения из-за их высокой суммарной стоимости.

Облачные сервисы открывают новые возможности для организации коллективной работы над интеллектуально-ёмкими проектами, но эти возможности на текущий момент в полной мере не реализованы [72]. Необходимость совершенствовать и эксплуатировать облачные сервисы в автоматизированном проектировании изделий современного машиностроения и приборостроения существует, поскольку с развитием дорогостоящих программных комплексов САЕ и их установкой на суперкомпьютерах автоматизированное проектирование мехатронных по своему составу изделий машиностроения и приборостроения в интегрированной среде CAD/CAE/CAM/PLM становится ресурсоемким.

Необходимые аппаратные ресурсы для развертывания облачных сервисов способны предоставить многие data-центры, включая крупнейшие – Amazon, Google, Azure. Вместе с тем, для эффективной работы и настройки облачных сервисов требуют решения организационные и прикладные задачи, связанные с созданием гетерогенной среды и интеграцией элементов сервиса, а также с корреляцией разных форматов информационных данных, стандартов их хранения и передачи [73].

Существует две концепции в организации проектирования в облаке – «тонкий клиент» и «толстый клиент» [74], представленные графически на рисунке 1.4. При организации автоматизированного проектирования в облаке основанный на веб-технологиях тонкий клиент (веб-клиент) не требует установки лицензионного программного обеспечения в полном объеме на рабочих местах пользователей. В случае тонкого клиента мощные вычислительные ресурсы сосредоточены на сервере, где фактически ведутся проектные работы и сопутствующие вычисления. Загруженный работой

сервер распределяет задачи и посыпает пользователям информацию на мониторы, он может обеспечить одновременную работу нескольких десятков инженеров в действующем проекте. Основная проблематика в использовании тонких клиентов при проектировании связана с настройкой и организацией центрального сервера.

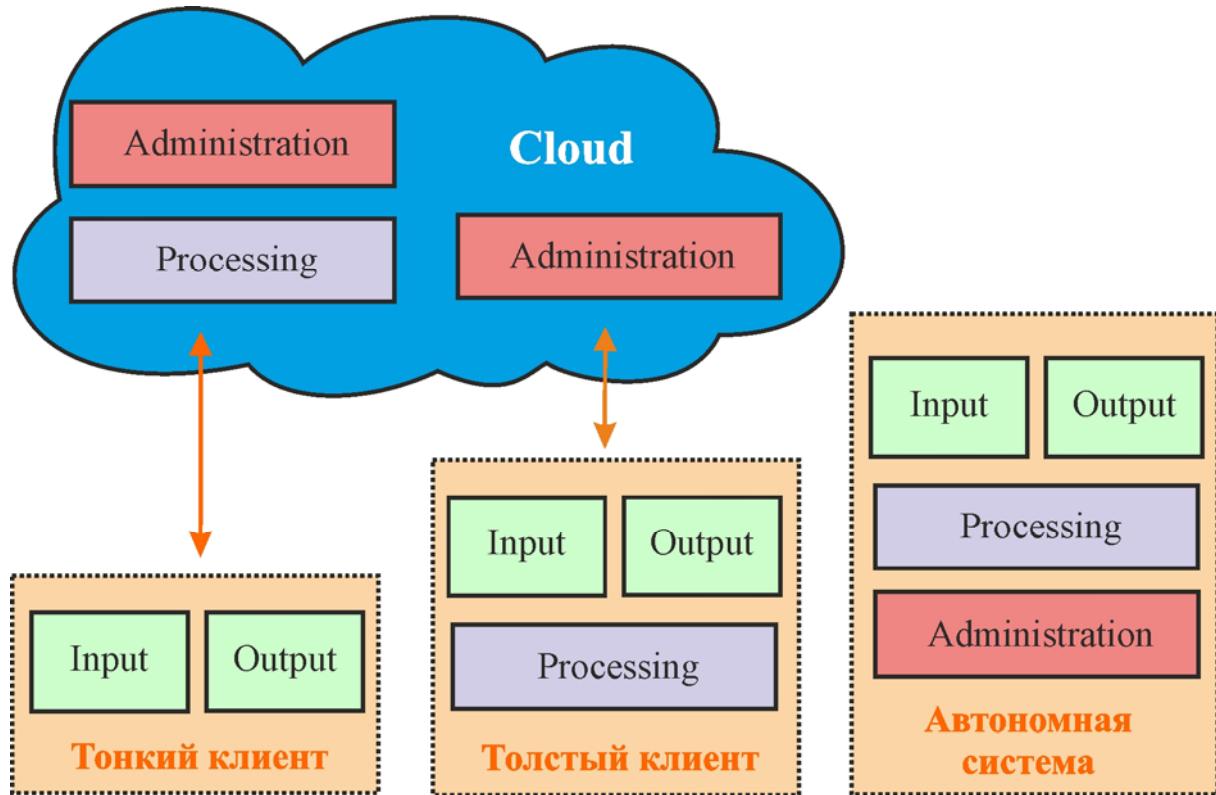


Рисунок 1.4 – Тонкий и толстый клиент в сравнении с автономно работающим расчетным комплексом

На сегодняшний день в практике автоматизированного проектирования большее распространение получило полнофункциональное клиентское приложение «толстый клиент» (полный клиент), которое предназначено, в первую очередь, для пользователей, создающих проектные данные (конструкторов, технологов и специалистов различных служб обеспечения). В случае толстого клиента проектная работа выполняется инженерами на персональных компьютерах (автоматизированных рабочих местах, терминальных станциях), а результаты проектирования передаются на центральный серверный компьютер и там сохраняются.

Анализ существующих программных и аппаратных ресурсов показывает, что в случае интеграции ресурсов САЕ и САМ в облаке формируется не только облачная среда автоматизированного проектирования изделий машиностроения и приборостроения, но и интегрированная среда технологической подготовки производства и управления технологическими процессами в составе цифрового производства. Программа САМ может быть установлена на рабочем месте технолога в непосредственной близости от технологического оборудования, а программа САЕ может быть установлена на удаленном суперкомпьютере, к которому технолог обращается при необходимости в процессе разработки технологического процесса. Поскольку программы САМ и САЕ от разных разработчиков представляют собой автономно функционирующие программы, актуальной становится задача их объединения в информационно-согласованный комплекс подсистем для последовательного выполнения автоматизированных действий по разработке технологии механической обработки на станке с ЧПУ.

Вовлечение современных многоядерных компьютеров, оснащенных быстро вычисляющими программными комплексами, в системы адаптивного и предсказательного управления технологическими процессами является актуальным направлением развития САПР и прикладных научных исследований в парадигме цифрового производства [75]. Способствует этому стремительное развитие суперкомпьютеров, программ САЕ и методов компьютерного инженерного анализа.

Неуклонно растет количество и производительность суперкомпьютеров, которые стали доступными для рядовых пользователей, их владельцы активно предлагают услуги коммерческим организациям и юридическим лицам. Вместе с тем, следует отметить, что наращивание вычислительной мощности суперкомпьютеров, их создание и ввод в эксплуатацию опережает спрос на их использование промышленными предприятиями в решении производственных задач. В частности, представляет интерес включение суперкомпьютеров одновременно в автоматизированную сис-

тему подготовки технологических процессов производства (АСТПП) и в автоматизированную систему управления технологическими процессами (АСУТП), что не реализовано в полной мере нигде в мире. Развитие данного направления облачных сервисов с использованием внешних вычислительных ресурсов потребует разработки дополнительных мер информационной безопасности в соответствии с требованиями ГОСТ 27002-2012 [76].

Совместная работа суперкомпьютерных центров и машиностроительных заводов ориентируется, в первую очередь, на решение задач расчетного обоснования конструкторских проектов в нелинейной постановке, например, краш-тесты для автомобилестроения или симуляция эксплуатационных режимов ракетных двигателей [77]. С этой целью на суперкомпьютеры инсталлируются сертифицированные программные комплексы конечно-элементного моделирования ANSYS, ABAQUS, COMSOL, NASTRAN. Перечисленные конструкторские программы обладают перспективным для оптимизации и автоматизации технологических процессов средством – встроенным языком программирования, который позволяет создавать вычислительные модели в параметрическом виде.

Наличие средств параметрического моделирования в ведущих программах САЕ становится поводом подробно обсудить вопрос об использовании удаленного суперкомпьютера для быстрой оценки ожидаемого качества при назначении технологических параметров в АСТПП и АСУТП. Компьютерное моделирование может быть использовано для предсказания поведения системы с учетом текущих входных параметров. Параметризация цифровой модели технологического процесса формирует также благоприятные условия для вовлечения сложных методов оптимизации в алгоритмы компьютерного инженерного анализа.

В настоящее время обсуждается организация распределенных производств с участием облачных вычислений [78] и интернет-сервисов, разрабатываются методы организации таких производств. Например, компания SAMSUNG разрабатывает технологию быстрой трансляции информации о

геометрии разделяемой печатной платы в параметрическую модель для расчёта в САЕ ABAQUS ожидаемых тепловых деформаций; в обсуждаемом примере задействован рядовой компьютер и одна единица технологического оборудования.

Разрабатывается концепция гетерогенной распределенной системы управления децентрализованными высокотехнологичными производствами, объединяющей промышленные компьютеры, логические контроллеры, системы специализированного и числового программного управления. Предлагаемая структура дистанционного управления и контроля не содержит принципиальных ограничений для включения суперкомпьютера в совместную работу участников гетерогенной распределенной компьютерной системы. В рамках этой системы оборудование и фактическое производство может располагаться территориально на Дальнем Востоке, а элементы автоматизированного управления и проектирования, включая суперкомпьютер с установленной программой САЕ, – в Екатеринбурге.

Пример реализации автоматизированного проектирования в облаке и распределенного производства для случая беспилотных летательных аппаратов показан на рисунке 1.5, где представлена схема передачи информации, составленная из источников [71-74] и из опыта проектирования аналогичных устройств на кафедре электронного машиностроения Уральского федерального университета совместно с малым инновационным предприятием ООО «Лаборатория будущего».

На схеме представлены облачные сервисы, программные и производственные ресурсы, использованные для изготовления беспилотных летательных аппаратов с привлечением формообразующих технологий 3D-печати. В литературных источниках отсутствует информация о применении аналогичных схем и облачных методов для изготовления деталей способом механической обработки на станках с ЧПУ.

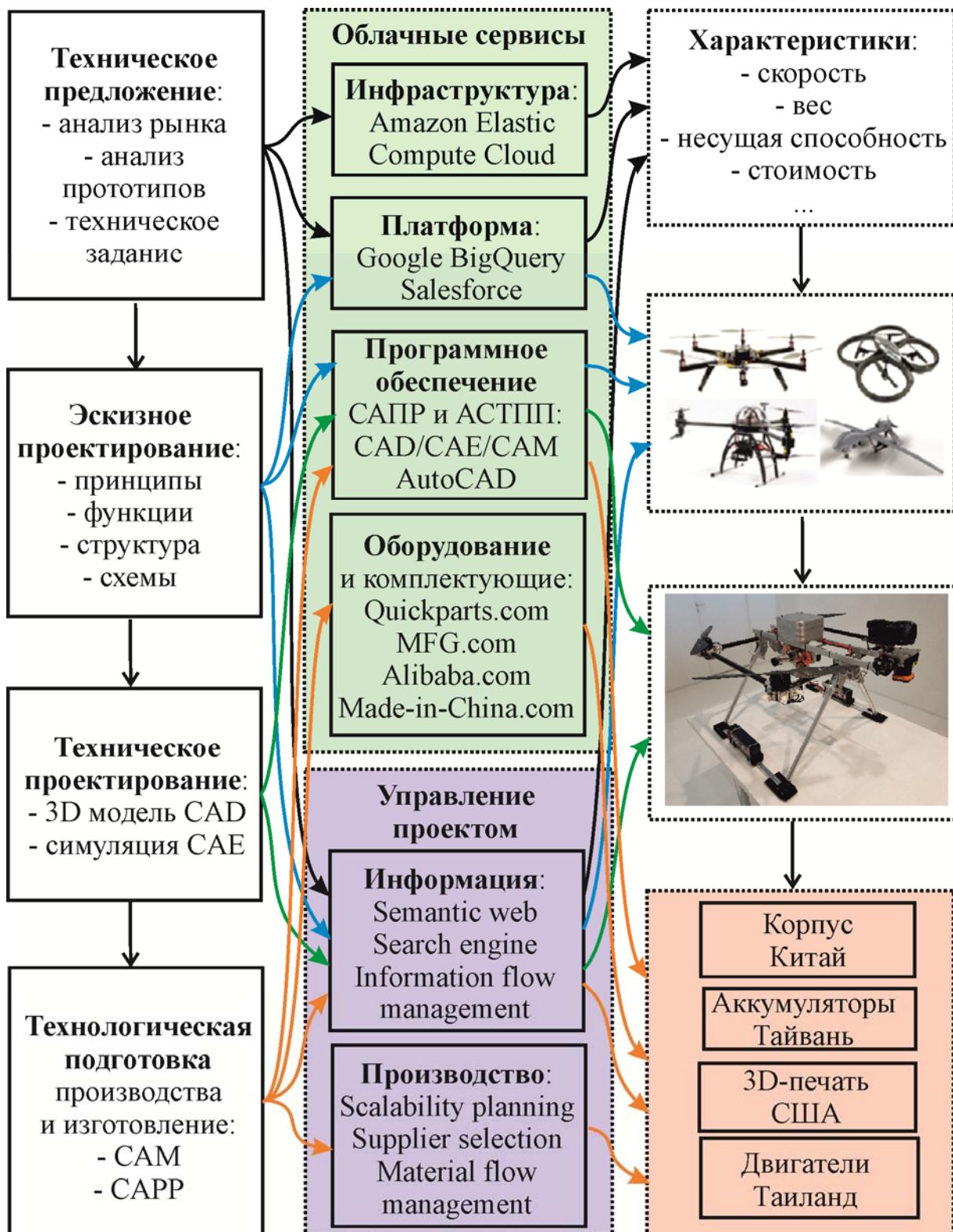


Рисунок 1.5 – Схема передачи данных в распределенной системе автоматизированного проектирования и производства

Соответственно, для интегрированной работы подсистем автоматизированного проектирования САЕ и САМ в распределенном режиме требуется выбор необходимых компонентов технического обеспечения (каналов связи, средств передачи данных, редактирования информации, построения сетевых структур, исполнения программного обеспечения) в структуре программно-технического комплекса средств автоматизации проектирования.

1.4 Выводы по главе 1

Анализ литературных и сетевых источников информации, 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 САЕ. Программы инженерного анализа САЕ интегрированы с программами CAD и ориентированы на обеспечение эксплуатационных характеристик изделия, включая прочность конструкции. Конечно-элементные программы САЕ обладают необходимым набором встроенных функций для развития компьютерного моделирования процессов механообработки. Применение программ САЕ для компьютерного моделирования технологий механической обработки актуально в связи с существенным изменением номенклатуры инженерных материалов, появлением и активным внедрением в машиностроении и приборостроении новых труднообрабатываемых материалов.

В связи с вышеизложенным возникает необходимость решить ряд задач в рамках актуальной научно-практической проблемы интеграции средств компьютерного инженерного анализа в автоматизированное проектирование технологических процессов механической обработки новых материалов с особыми свойствами. Нерешенные задачи включают создание в структуре программно-технического комплекса средств автоматизации проектирования компонентов математического обеспечения (модели объекта проектирования и алгоритма решения задачи в процессе проекти-

рования) и соответствующих компонентов программного обеспечения (программных модулей), а также выбор необходимых компонентов технического обеспечения (каналов связи, средств передачи данных, редактирования информации, построения сетевых структур).

Цель и задачи работы. Целью данной работы является совершенствование процессов технологической подготовки изготовления ответственных деталей машин и приборов из хрупких материалов методами механической обработки с учетом предварительной оценки качества обработанной поверхности за счет интеграции средств компьютерного инженерного анализа САЕ в автоматизированную систему технологической подготовки производства САМ.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач исследования:

- 1) разработать модель и выбрать критерии для расчетного обоснования технологических параметров механической обработки хрупких материалов с учетом предварительной оценки качества обработанной поверхности средствами инженерного анализа в программной среде САЕ;
- 2) разработать алгоритм параметрического компьютерного моделирования эффектов силового воздействия режущего инструмента на хрупкий материал для автоматизации проектирования в интегрированной программной среде САЕ/САМ;
- 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) разработать и апробировать метод интеграции средств компьютерного инженерного анализа хрупких материалов в автоматизированное проектирование технологических процессов механической обработки с использованием облачных сервисов.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И АЛГОРИТМА ДЛЯ ПОИСКА ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕДСТВ САЕ

Во второй главе представлены результаты разработки теоретической модели и соответствующей компьютерной модели для анализа проектных решений в автоматизированной системе технологической подготовки производства при выборе параметров режима резания хрупких материалов. Обсуждается разработанное математическое обеспечение, которое может быть использовано для автоматизации проектирования технологий механической обработки хрупких материалов, поскольку типизирует процессы по признаку квазистатического локального разрушения материала в зоне резания 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 и российских средств компьютерного инженерного анализа.

2.1 Теоретическая модель образования дефектной зоны в хрупком материале при механической обработке

Разработка компьютерной модели для обоснования параметров режима резания хрупких материалов базируется на теоретическом анализе дефектной зоны, которая образуется на обработанной поверхности разрушением за счет упругой деформации при полном контакте инструмента со срезаемым слоем. В контексте систем автоматизации проектирования переход к параметрическому представлению модели требует формализованного представления трехмерной геометрии режущей части инструмента в виде пирамиды, основные положения такого представления приведены нами в работе [79].

Для моделирования процессов образования дефектной зоны при лезвийной обработке хрупкого материала нами составлена параметрическая геометрическая модель режущей части инструмента. В предложенной параметрической модели геометрия пирамиды описана угловыми параметрами лезвийного инструмента в соответствии с общепринятой в токарной обработке терминологией. Данный подход, позволяющий применить положения и рекомендации классической теории резания к новым условиям обработки, полезен как в поиске режимов актуальных технологий, так и в выборе лучших вариантов заточки инструмента. В частности, алмазный лезвийный инструмент используется в перспективных технологиях обработки хрупких твердых материалов на станках с ЧПУ, обеспечивающих микро- и нанометровые перемещения инструмента, – Diamond Turning (алмазное точение) Machine (DTM) [80]. Несмотря на многие конструктивные усовершенствования, теоретические принципы обработки твердых полупроводниковых материалов на сверхточных станках мало отличаются от классических моделей резания токарными резцами.

В модели процессов резания прежде всего следует выбрать обозначение осей координат и направлений движения. Выбор ориентации системы координат для компьютерного моделирования процессов механической обработки играет важную роль и не является однозначным. Следует учесть специфику назначения координатных осей в программах компьютерного инженерного анализа САЕ, где по умолчанию вдоль вектора гравитации устанавливается ось Y. Такая настройка конечно-элементных моделей позволяет решать трехмерные осесимметричные задачи через двухмерные сечения без дополнительных команд переопределения системы координат.

С целью унификации управляющих программ и в соответствии с ГОСТ 23597-79 [81] на станках с ЧПУ принята правая система отсчета координат. Для станка ось Z определяется по отношению к шпинделю, обеспечивающему главное вращательное движение; при отсутствии шпинделя ось Z выбирается перпендикулярно к рабочей поверхности стола. Положи-

тельное направление оси Z должно совпадать с направлением отвода инструмента от заготовки. При обтачивании заготовки на токарном станке обработка заготовки осуществляется при перемещении инструмента в отрицательном направлении оси Z .

Ось X располагается горизонтально, параллельно поверхности крепления заготовки. Для станков, где режущий инструмент и заготовка не подвергаются вращению, положительное направление оси X совпадает с положительным направлением главного движения и параллельно ему; примерами являются технологические операции строгания на поперечно-строгальных и продольно-строгальных станках. На станках с вращающейся заготовкой, например, в случае токарных станков, ось X направлена по радиусу заготовки параллельно поперечным направляющим; положительное направление оси X совпадает с направлением отхода поперечных салазок с режущим инструментом.

Исходя из изложенных сведений, система координат в модели выбрана таким образом, что ось Z направлена по нормали к поверхности заготовки. Положительное направление оси Z совпадает с направлением отвода инструмента. Ось X совпадает с направлением движения инструмента и сонаправлена с вектором скорости резания V . Ось Y направлена в соответствии с правой системой координат и совпадает с направлением продольной подачи, если алмазный инструмент используется для снятия слоя с поверхности, например, в технологических операциях полирования.

В теоретической модели формообразование риски при прохождении алмазного инструмента по поверхности пластины можно описать по аналогии с первым проходом резца при нарезании резьбы на токарном станке. В соответствии с классической теорией, при нарезании резьбы снятие материала производится гранями инструмента, имеющего прямолинейные режущие кромки. Вместе с тем, при назначении параметров режима резания в случае обработки хрупкого материала имеется существенное отличие, связанное с конструктивными особенностями механических узлов

станочного оборудования. В операциях точения заготовок из металлических сплавов задается глубина резания, ширина срезаемого слоя, скорость резания и подача, а силы резания определяются режимом резания, геометрией инструмента и свойствами обрабатываемого металла. При механической обработке хрупкого твердого материала, например, в операциях скрайбирования, задается нормальная силовая нагрузка на резец, а глубина резания и ширина риски являются производными от нагрузки на резец.

Соответственно, в теоретической модели и далее в компьютерной модели проектируемых технологических процессов нагрузку можно задавать в виде силы, приложенной к режущему инструменту перпендикулярно плоскости ХОY, или в виде вынужденного перемещения по нормали к поверхности пластины на величину параметра глубины резания в отрицательном направлении оси Z.

Для лезвийной обработки твердых хрупких материалов используется алмазный инструмент, изготавливаемый из одного кристалла в форме трехгранной или четырехгранной пирамиды с полной или усеченной вершиной. Резание материала может осуществляться гранью или ребром пирамиды. Для четырехгранной пирамиды составлена полная модель режущей части инструмента с угловыми параметрами, задающими геометрию и положение инструмента в процессе резания. Вырождением четырехгранной пирамиды за счет исключения одной вершины можно получить модель трехгранной пирамиды. Заменив многоугольник в основании пирамиды описывающей окружностью, можно получить модель конической режущей части алмазного гравера, который также используется для нанесения риски на поверхность пластины из хрупкого материала, например, в технологических операциях разделения или гравирования.

Объемная геометрическая модель четырехгранной пирамиды как режущей части алмазного инструмента представлена на рисунке 2.1 в параметрическом виде, где определяющими параметрами геометрической модели являются угловые характеристики [82].

При условии направленности вектора скорости резания \vec{V} вдоль оси Х можно определить и назвать элементы инструмента в рамках рассматриваемой модели. Ребро пирамиды ОА является главной режущей кромкой инструмента и выполняет основную работу по формообразованию новой поверхности. Передняя поверхность состоит из двух передних граней АОВ и АОВ₁ с общей главной режущей кромкой – ОА и двумя вспомогательными режущими кромками – ОВ и ОВ₁.

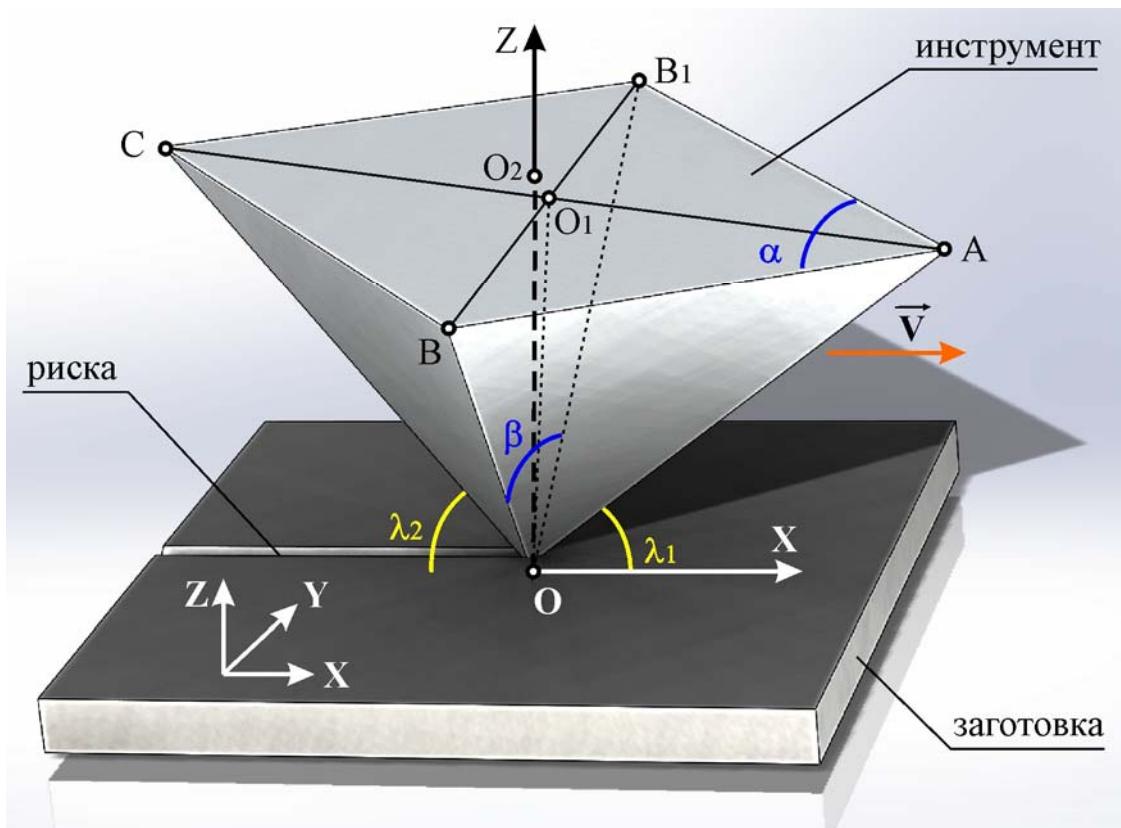


Рисунок 2.1 – Параметрическая геометрическая модель режущей части алмазного инструмента

На схеме представлен вариант резания заготовки ребром правильной четырехгранной пирамиды и показаны углы параметрической модели: α – угол между сторонами основания пирамиды, примыкающими к главной режущей кромке; β – угол между ребрами ОВ и ОВ₁ пирамиды, образующими вспомогательные режущие кромки; λ_1 – угол наклона главной режущей кромки ОА к поверхности заготовки; λ_2 – угол наклона кромки ОС, противоположной режущей, к поверхности заготовки. Углы α и β описывают собственно геометрию пирамиды и заточку режущей части инструмента.

мента, причем в случае равносторонней пирамиды угол $\alpha = 90^\circ$, в общем случае поиска оптимальных параметров геометрии $\alpha \neq 90^\circ$. Углы λ_1 и λ_2 задают наклон пирамиды относительно оси X и плоскости заготовки. В более общем случае для параметрической модели, представленной на схеме, можно задать угол наклона инструмента относительно осей X и Y, а также радиус скругления при вершине.

Параметрическое представление геометрической модели в компьютерном моделировании процессов резания разрешает ее использование в программных модулях оптимизации для поиска наилучших углов заточки инструмента. Основные угловые параметры геометрии в рабочем положении инструмента показаны на рисунке 2.2 для случая резания ребром.

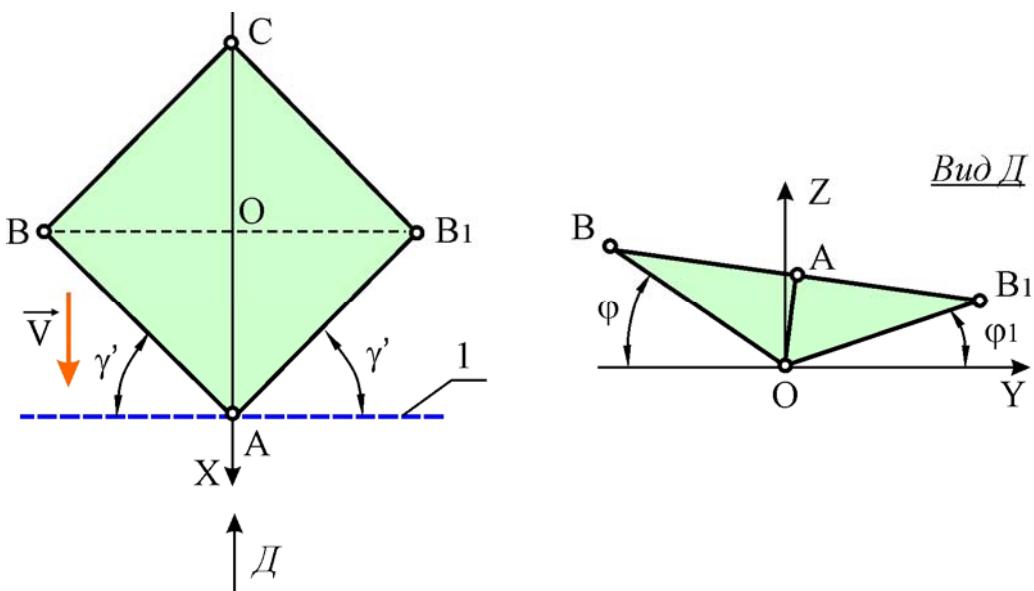


Рисунок 2.2 – Угловые параметры четырехгранной пирамиды, определяющие ее как лезвийный инструмент

На схеме в главной секущей плоскости показано основание пирамиды ABCB₁, а также след (1) основной плоскости, проходящий через точку А главной режущей кромки ОА. Точка О – вершина пирамиды и центр системы координат; γ' – угол в горизонтальной плоскости сечения между следом основной плоскости и следом передней грани; φ – главный угол в плане; φ_1 – вспомогательный угол в плане. В модели разрешен наклон инструмента, когда $\varphi \neq \varphi_1$ и/или $\lambda_1 \neq \lambda_2$.

Если производить резание пластины в соответствии с рассматриваемой схемой, то угол наклона главной режущей кромки ОА к основной плоскости (1) определяется разностью углов ($90^\circ - \lambda_1$) и принимает значения в узком интервале от 80° до 88° ; угол γ' равен 45° . Ранее было показано [83], что высокое качество риски в операциях разделения листовых заготовок из хрупких материалов достигается при таком расположении пирамиды относительно вектора скорости резания V , когда угол λ_1 между поверхностью листовой заготовки и режущим ребром пирамиды задается в интервале углов от 2° до 10° .

Объемная геометрическая модель для варианта резания пластины гранью трехгранной пирамиды показана на рисунке 2.3.

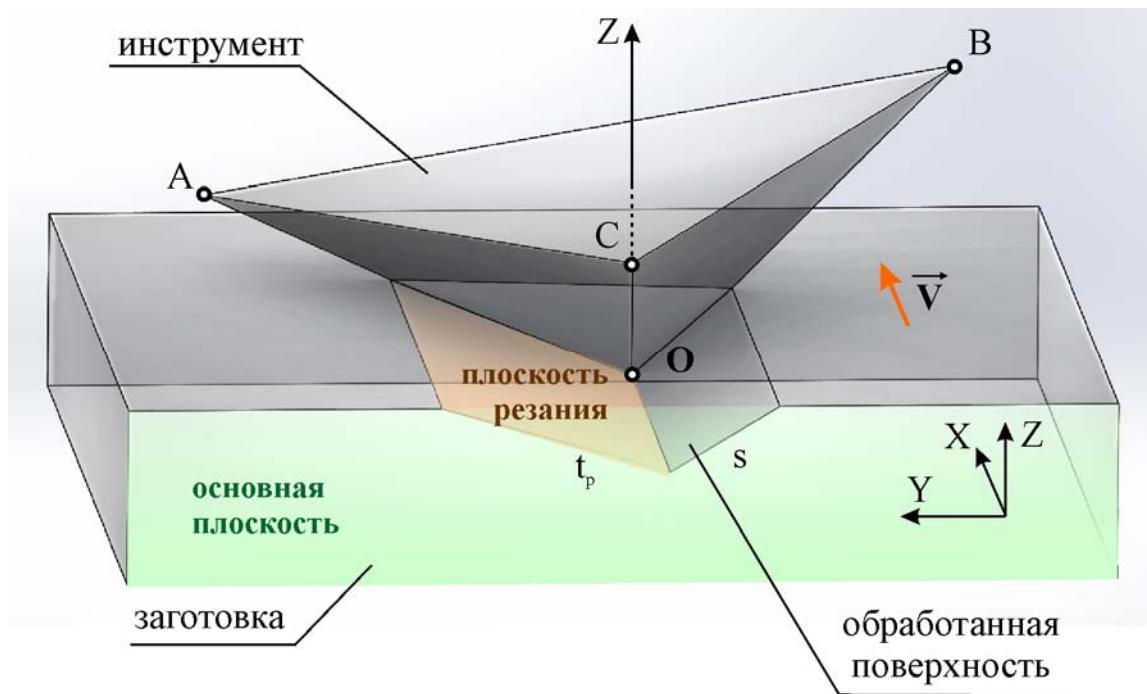


Рисунок 2.3 – Геометрическая модель резания пластины гранью трехгранной пирамиды

Представленная схема резания характерна для точения проходными резцами, когда главному резанию сопутствует побочное резание. Графически представлен текущий момент несвободного резания, когда формообразование осуществляется при одновременном участии как главной кромки инструмента, так и его вспомогательной кромки. На схеме ребро пирамиды ОА является главной режущей кромкой инструмента, главная режущая

кромка формирует поверхность резания. Ребро ОВ является вспомогательной режущей кромкой, вспомогательная режущая кромка формирует обработанную поверхность. Обозначенная режущими кромками поверхность АОВ образует переднюю грань инструмента, по которой в процессе обработки осуществляется сход стружки.

Основные угловые параметры геометрии в рабочем положении инструмента показаны на рисунке 2.4 для случая резания гранью.

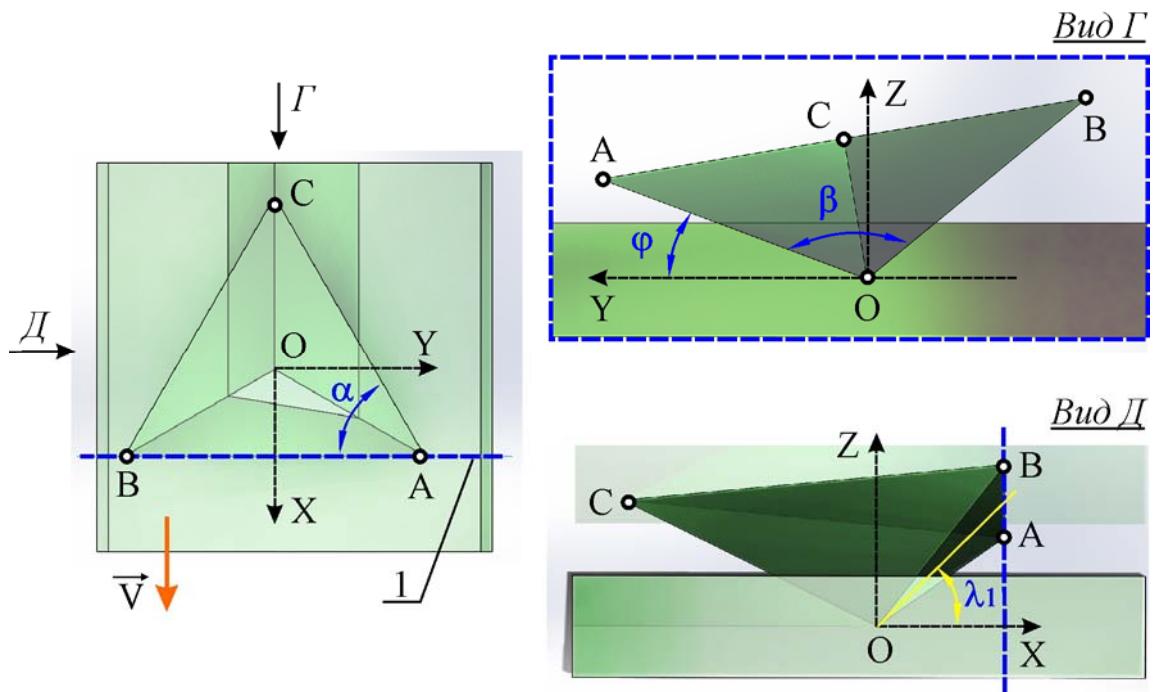


Рисунок 2.4 – Угловые параметры трехгранной пирамиды, определяющие ее как лезвийный инструмент

На схеме показано основание пирамиды ABC, а также след (1) основной плоскости, проходящий через точку A главной режущей кромки OA. Точка O – вершина пирамиды и центр системы координат. Направление движения инструмента, обозначенное вектором скорости V , совпадает с направлением оси X. Геометрическое построение самой пирамиды определяется углами α и β . В модели разрешен наклон инструмента относительно осей X и Y, который задается углами φ и λ_1 .

Схема резания хрупкого материала гранью лезвийного инструмента представлена на рисунке 2.5 [84].

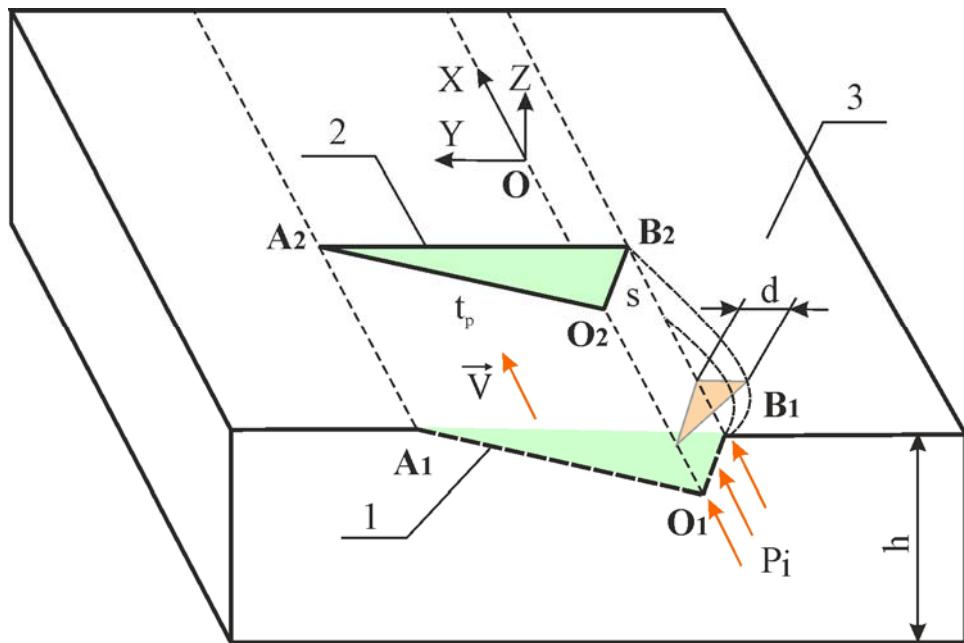


Рисунок 2.5 – Трехмерная схема резания хрупкого материала
гранью лезвийного инструмента: 1 – начальное положение инструмента,
2 – текущее положение инструмента,
3 – плоскость пластины со сколами величиной d

На схеме начало координат O перемещается вместе с инструментом из положения O_1 в положение O_2 . В модели расстояние O_2A_2 соответствует глубине резания t_p , расстояние O_2B_2 соответствует величине подачи s . Одним из условий получения повышенных параметров качества обработанной поверхности при резании хрупких материалов является малая скорость резания V , когда глубина резания t_p превышает величину подачи s .

Для теоретического анализа процессов образования стружки и дефектного слоя на поверхности обрабатываемой заготовки необходимо произвести оценку напряженно-деформированного состояния в локальной зоне резания. В случае хрупких материалов такую оценку можно произвести по аналогии с классической теорией М. Фрохта [85], которая рассматривает напряженное состояние хрупкой пластины под действием сосредоточенной силы. Теория М. Фрохта подтверждается экспериментальными данными, которые получены с использованием оптических методов наблюдения деформационных полос.

Модель образования дефектного слоя рассматривает распространение напряжений в обрабатываемом хрупком материале и учитывает не только общую информацию об условиях образования стружки, но также основные моменты упругой деформации срезаемого слоя, распространения сжимающих ($\sigma_{сж}$) и максимальных касательных ($\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$) напряжений в зоне локального разрушения. Предположение о том, что контактное время достаточно велико по сравнению с характерным временем волновых процессов, позволяет рассматривать поведение хрупких материалов в приближении квазистатического упругого деформирования.

В модели назначена прямая линия для траектории движения вершины О, которую можно совместить с линейной осью цилиндрической системы координат. Соответственно, напряженное состояние хрупкого материала вдоль формируемой алмазным инструментом риски можно также представить в цилиндрической системе координат в трехмерной постановке задачи или в полярной системе координат – в нормальном сечении, в двухмерной постановке задачи.

В компьютерной модели сила прикладывается к инструменту и через контактные поверхности передается в обрабатываемый материал. В отличие от двухмерных аналитических моделей в трехмерной компьютерной модели распределение силовых характеристик может быть нелинейным и составлять отдельную задачу вычислительных экспериментов. В общем случае вдоль режущих кромок ОА и ОВ в направлении движения инструмента V на обрабатываемый материал действуют распределенные по длине режущей кромки составляющие P_i силы резания P . При этом в любой момент времени от главной режущей кромки ОА до свободной поверхности заготовки вдоль радиальных линий распространяются сжимающие напряжения, которые в нормальном сечении в полярных координатах (r, Θ) вычисляются по формуле:

$$\sigma_{сж} = \frac{C_{нагр} \cos \Theta}{r}, \quad (2.1)$$

где $C_{\text{нагр}}$ – константа, прямо пропорционально зависящая от приложенной силовой нагрузки F , Θ – угловая координата, r – радиальная координата.

Константа $C_{\text{нагр}}$ вычисляется, исходя из возможности заменить сосредоточенную нагрузку F равной ей силой, действующей на круглой канавке малого радиуса. Такой подход позволяет при анализе напряженного состояния нивелировать эффект сингулярности, который возникает в точке приложения сосредоточенной силы (математическая сингулярность или особенность – точка, в которой рассматриваемая функция координаты $F(r)$ недифференцируема). Интегрированием по поверхности приложения силы F для пластины толщиной h получаем значение коэффициента:

$$C_{\text{нагр}} = -\frac{2F}{\pi h}, \quad (2.2)$$

где $\pi \approx 3,14159$ – математическая константа.

В двухмерной модели при воздействии сжимающей сосредоточенной силы в пластине возникает радиальная система напряжений, которую удобно представить в полярных координатах (r, Θ) . Траектории главных нормальных напряжений σ_Θ и σ_r , представляющие напряженное состояние хрупкой пластины под действием сосредоточенной силы, показаны на рисунке 2.6.

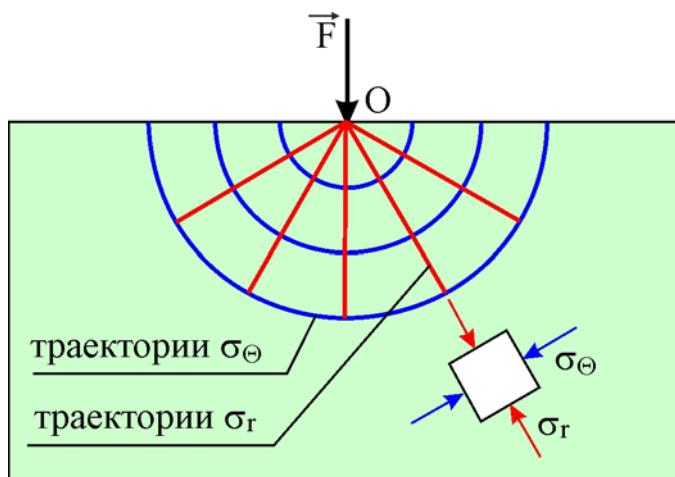


Рисунок 2.6 – Траектории нормальных напряжений σ_Θ и σ_r , возникающих в хрупкой пластине под действием сосредоточенной силы

На схеме, в соответствии с моделью контакта инструмента с поверхностью материала, в точке О приложена сосредоточенная сила F . В хрупком материале возникают и распространяются от точки приложения силы F упругие возмущения, которые характеризуются нормальными напряжениями σ_Θ и σ_r . Направление действия сжимающих напряжений σ_Θ и σ_r показано векторами, приложенными к выделенной площадке. Распространение соответствующих упругих возмущений в хрупком материале графически отображено траекториями напряжений.

Изоклины поля напряжений σ_r в полярной системе координат (r, Θ) являются прямыми линиями, сходящимися в точке приложения силовой нагрузки. Изоклины σ_r – линии, в каждой точке которых направления главных напряжений σ_r параллельны; изоклины σ_Θ – линии, в каждой точке которых направления главных напряжений σ_Θ параллельны. Соответственно, изостаты образуют систему ортогональных концентрических окружностей (σ_r) с центром в точке приложения нагрузки, пересеченных радиальными линиями (σ_Θ), проходящими через центр этих окружностей. Изостаты – траектории главных напряжений – линии, в каждой точке которых касательная совпадает с направлением одного из главных напряжений, действующих в точке касания.

В модели зарождения и распространения трещин в хрупком материале наибольший интерес представляют траектории касательных напряжений, показывающие направление наибольших касательных напряжений τ_{\max} . Поскольку напряжения τ_{\max} действуют под углом 45° к направлению главных напряжений σ_r и σ_Θ , траектории касательных напряжений однозначно вычисляются по изоклинам или изостатам.

Решая интегрированием дифференциальное уравнение, выражающее тангенс угла между изоклиной и касательной к траектории касательных напряжений: $r d\Theta / dr = \operatorname{tg} (45^\circ)$, получаем функцию логарифмической (изогональной) спирали для траектории максимальных касательных напряжений в полярных координатах (r, Θ) :

$$r = C_{\text{траект}} e^{\Theta}, \quad (2.3)$$

где r – радиальная координата, равная текущему радиусу кривизны траектории; Θ – угловая координата в радианах; $C_{\text{траект}}$ – размерная константа спирали, равная радиальной координате $r(\Theta = 0)$ и коррелирующая с радиусом скругления режущего лезвия для первого витка изогональной спирали; $e \approx 2,71818$ – математическая константа.

Физические явления зарождения и распространения трещин с последующим скальванием материала отвечают за формирование дефектного слоя при механической обработке хрупкого материала. В рамках упругой модели хрупкого разрушения примем следующие положения для обоснования величины дефектного слоя.

- *Трешины возникают* в зоне действия разрушающих нормальных напряжений сжатия и распространяются вдоль траектории 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.

Критическое напряжение, вызывающее переход в предельное состояние и хрупкое разрушение, можно назначить в соответствии с критерием Мора для изотропных материалов или критерием Ву для анизотропных материалов. Критерий прочности устанавливает соотношение между функцией пределов прочности материала, экспериментально определенных для одноосного растяжения, сжатия или сдвига с расчетными характеристиками напряженно-деформированного состояния материала в нагруженном состоянии (компонентами или инвариантами тензора напряжений или тензора деформаций). В соответствии с критерием хрупкого разрушения (критерием Мора) разрушение происходит по площадкам с экстрем-

мальными касательными напряжениями из-за действия нормальных и касательных напряжений при условии $\sigma_{\text{экв}} \geq \sigma_{\text{lim}}$, где σ_{lim} – предельное напряжение (номинальный предел прочности хрупкого материала при сдвиге), $\sigma_{\text{экв}} = \sigma_{\text{экв}}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \sigma_1 - m \times \sigma_3$ – эквивалентное напряжение; показатель $m = \sigma_{\text{в раст}} / \sigma_{\text{в сж}}$ учитывает различие пределов прочности хрупкого материала на сжатие $\sigma_{\text{в сж}}$ и растяжение $\sigma_{\text{в раст}}$.

Траектории сжимающих нормальных напряжений σ_r и касательных напряжений τ_{\max} , отвечающих за возникновение и распространение хрупких трещин, представлены графически на рисунке 2.7.

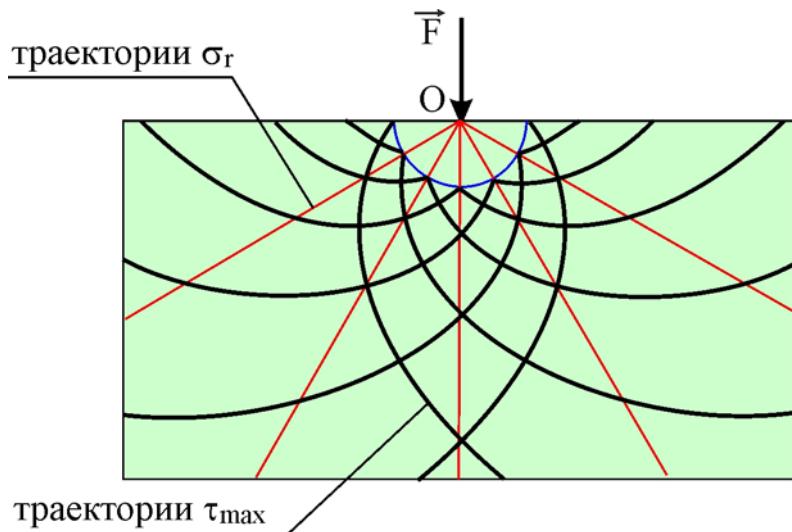


Рисунок 2.7 – Траектории максимальных касательных напряжений τ_{\max}

На схеме полуокружность с центром в точке O приложения сосредоточенной силы F показывает траекторию сжимающих нормальных напряжений и ограничивает область с наибольшими значениями σ_r для заданной величины силы F . В модели нажимного воздействия инструмента на хрупкий материал сила F возрастает от нулевого до критического значения, при достижении которого главное нормальное напряжение $\sigma_1 = \sigma_r$ становится предельным и равным величине временного сопротивления разрушению хрупкого материала $\sigma_1 = \sigma_r = \sigma_{\text{в}}$.

По достижении критического напряжения происходит частичное разрушение хрупкого материала в зоне, ограниченной полуокружностью с центром в точке O (рисунок 2.8).

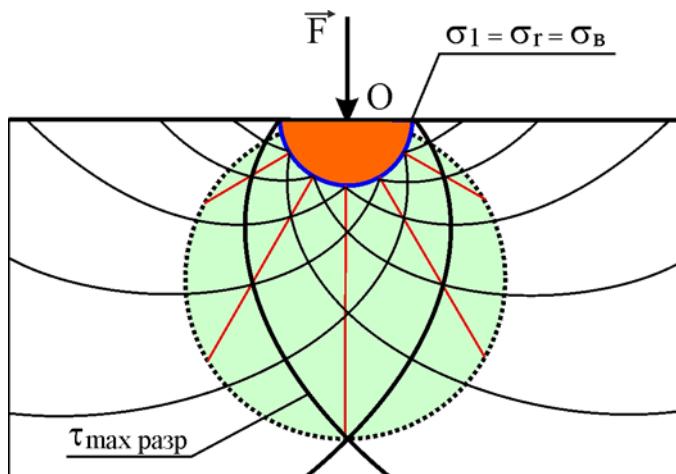


Рисунок 2.8 – Зона локального разрушения хрупкого материала в результате нажимного воздействия инструмента на поверхность

На схеме полуокружностью с центром в точке О выделена зона первичного разрушения. Разрушение хрупкого материала в виде отдельных мелких фрагментов будет сосредоточено также в зоне, очерченной пунктирной окружностью и ограниченной линиями $\tau_{\max \text{ разр}}$. Образовавшийся дефектный слой ограничен в пространстве остановившимися трещинами.

Инерционный процесс роста трещин в дефектном слое останавливается, когда разрушенный материал вытесняется инструментом из зоны первичного разрушения и, соответственно, величина действующей силы снижается. В соответствии с экспериментальными наблюдениями, пространственное положение траекторий τ_{\max} , где происходит остановка трещин дефектного слоя, подчиняется экспоненциальной зависимости и определяется соотношением $\tau_{\max \text{ разр}} \cong e^{0.5} \tau_{\max}$.

Вернувшись к трехмерной схеме резания хрупкого материала (рисунок 2.5), следует отметить, что дефектный слой обработанной поверхности располагается за поверхностью $A_1O_1O_2A_2$. Дефекты этого слоя после обработки остаются в изделии, как на поверхности, так и в глубинных слоях материала. Следует также принимать во внимание дефектный слой величиной d , который возникает вдоль направления B_1B_2 и изменяется вместе с отделяемой стружкой. Обработанная поверхность формообразуется перемещением вспомогательной режущей кромки ОВ в направлении вектора

скорости резания V , при этом центр координат O_1 вместе с вершиной режущего инструмента перемещается вдоль оси X в новое положение O_2 . Движение режущей кромки сопровождается зарождением и распространением трещин в обрабатываемом хрупком материале.

В связи с актуальной задачей повышения качества обработанной поверхности хрупких материалов алмазным инструментом и с учетом необходимости компьютерной оценки дефектного слоя и быстрого поиска параметров режима резания с использованием интегрированных систем проектирования и технологической подготовки производства в теоретической модели локального хрупкого разрушения важными элементами являются длина образующихся трещин и траектории их распространения. Конечная длина хрупкой трещины обусловлена ее торможением в момент выхода растущей трещины из зоны напряжений, превышающих τ_{\max} разр. Траектории распространения трещин в хрупком материала совпадают с траекториями максимальных касательных напряжений $\tau_{\max} = \tau_{\max}$ разр, их пространственное положение подчиняется логарифмической зависимости.

В теоретической модели рассмотрены положения о напряженном состоянии хрупкого материала при нажимном воздействии режущего инструмента. При этом локальное разрушение хрупкого материала происходит в условиях сжатия 1) от максимальных касательных напряжений τ_{\max} , когда величина этих напряжений достигает критического значения разрушающих максимальных касательных напряжений τ_{\max} разр в локальном объеме материала; 2) по траектории действия максимальных касательных напряжений τ_{\max} , которая математически определяется в координатном пространстве логарифмической спиралью. Основываясь на положениях изложенной теоретической модели, представляется интерес сформулировать параметрическую компьютерную модель для анализа технологических процессов механической обработки хрупких материалов, которая позволит установить зависимость между параметрами процесса резания и размерами формируемой дефектной зоны обработанной поверхности.

2.2 Компьютерная модель для оценки размеров дефектной зоны в хрупком материале при механической обработке

Компьютерный анализ дефектообразования в хрупком материале связан с расчетной оценкой напряженно-деформированного состояния материала в результате силового воздействия режущего инструмента. Метод конечных элементов был использован в данной работе [86] для создания компьютерной модели технологического процесса механической обработки хрупкого материала, который сопровождается локальным разрушением в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью. В результате локального хрупкого разрушения путем зарождения и распространения трещин с последующим скальванием происходит не только направленное удаление материала, но и формируется область нежелательных дефектов.

В конечно-элементном моделировании процессов механической обработки материалов с упруго-пластической моделью поведения используется два подхода к описанию движения сплошной среды: метод Лагранжа, который позволяет моделировать формирование стружки, и метод Эйлера, который полагает геометрию стружки известной заранее.

Формулировка Лагранжа. Выделяются узлы конечно-элементной сетки в неподвижной системе координат с координатами x_i и частицы сплошной среды в подвижной системе координат с координатами ξ_i . Конечно-элементная сетка привязана к рассматриваемому объему материала, и движение частиц материала с течением времени t задается соотношением $x_i = \underline{x}_i(\xi_1, \xi_2, \xi_3, t)$.

Метод Лагранжа позволяет выявить геометрию стружки от начальной до установившейся стадии, связать геометрию стружки с параметрами резания, деформационными процессами и свойствами материала. Критерий отделения стружки для хрупких материалов (для прерывистой стружки) можно задать как критерий локального разрушения материала. Врезании металлических сплавов при пластических режимах происходит пластическая деформация материала, и это вызывает искажение конечных

элементов при симуляции. В этом случае требуется регенерация расчетной сетки, использование адаптивных сеток и методов автоматического уплотнения конечно-элементной сетки в критических зонах. Перечисленные методы перестройки сеток по ходу выполнения вычислительных процедур усложняют моделирование и не актуальны в моделировании хрупких материалов, поскольку для хрупких материалов достаточной моделью поведения при силовом нагружении зачастую оказывается модель линейно-упругого тела при малых деформациях.

Формулировка Эйлера. Фиксируется расчетная сетка и рассматривается течение материала через контрольный объем, что предотвращает искажение конечных элементов при пластическом деформировании материала. Кинематическое состояние сплошной среды задается посредством изменяющегося с течением времени t поля скоростей v_i через координаты узлов сетки x_i : $v_i = v_i(x_1, x_2, x_3, t)$.

Метод Эйлера позволяет моделировать процесс резания от начальной стадии и не требует задавать критерий отделения стружки. Преимущество – требуется меньше конечных элементов в расчетной сетке, что снижает расчетное время. Недостаток – необходимо изначально задать границы и форму стружкообразования; константами компьютерной модели должны быть толщина стружки, условия контакта и площадь контактной поверхности стружка-инструмент. В методе Эйлера не заложены средства оценки подповерхностных дефектов, которые важны при механической обработке хрупких материалов.

В данной работе для конечно-элементного моделирования лезвийной обработки хрупких материалов с малой скоростью резания и для расчетной оценки силового воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность был выбран широко применяемый в машиностроении и приборостроении программный комплекс ANSYS в конфигурации ANSYS Mechanical. Поставленная задача может быть решена в квазистатической постановке без учета инерционных и демптирующих эффектов, поскольку

напряженное состояние в обрабатываемом материале устанавливается быстрее, чем изменяется силовое нагружение. В случае резания хрупких полупроводниковых и оптических материалов применяются малые силы резания и малые скорости резания.

Программные продукты ANSYS имеют международную сертификацию для конструкционных и прочностных расчетов в соответствии со стандартами и требованиями: группа ISO-9000, преимущественно ISO-9001 и ISO 9000-3; Lloyd's Register's software certification, NAFEMS QA certification, British standard BS 5750, TickIT initiative. Программные продукты ANSYS сертифицированы для прочностных расчетов в атомной промышленности РФ: регистрационный номер ПС в ЦОЭП при РНЦ КИ № 490 от 10.09.2002, регистрационный номер паспорта аттестации ПС № 145 от 31.10.2002 (Госатомнадзор РФ).

Нами сформулирована параметрическая конечно-элементная модель для компьютерного моделирования процессов механической обработки твердых хрупких материалов алмазным инструментом [87-90], которая может быть реализована в программной среде ANSYS. Параметрическая модель позволяет автоматизировать проектирование технологических процессов механической обработки хрупких материалов в части выбора оптимальных параметров режима резания. При этом в автоматизацию проектирования вовлекаются программные модули САЕ на условиях интеграции с программными модулями САМ. Параметрическое определение модели позволяет также применять быстро прогрессирующие модули топологической оптимизации для выбора наилучших параметров инструмента и режима резания по критериям образования дефектного зоны.

При моделировании рассматривается установившийся режим резания. В качестве параметров в компьютерной модели задаются размеры заготовки, углы инструмента, сила резания или глубина резания, модуль Юнга и коэффициент Пуассона материалов заготовки и инструмента.

Схема силового и контактного воздействия режущего инструмента на поверхность пластины с выделенным поверхностным слоем показана на рисунке 2.9 в привязке к геометрической модели, соответствующей общему варианту модели резания (рисунок 2.1). Геометрическая модель содержит заготовку в виде пластины, которая рассечена на две части плоскостью симметрии; подложку, к которой приклеена заготовка; режущую часть инструмента. Для иллюстрации выбран вариант конической геометрии инструмента.

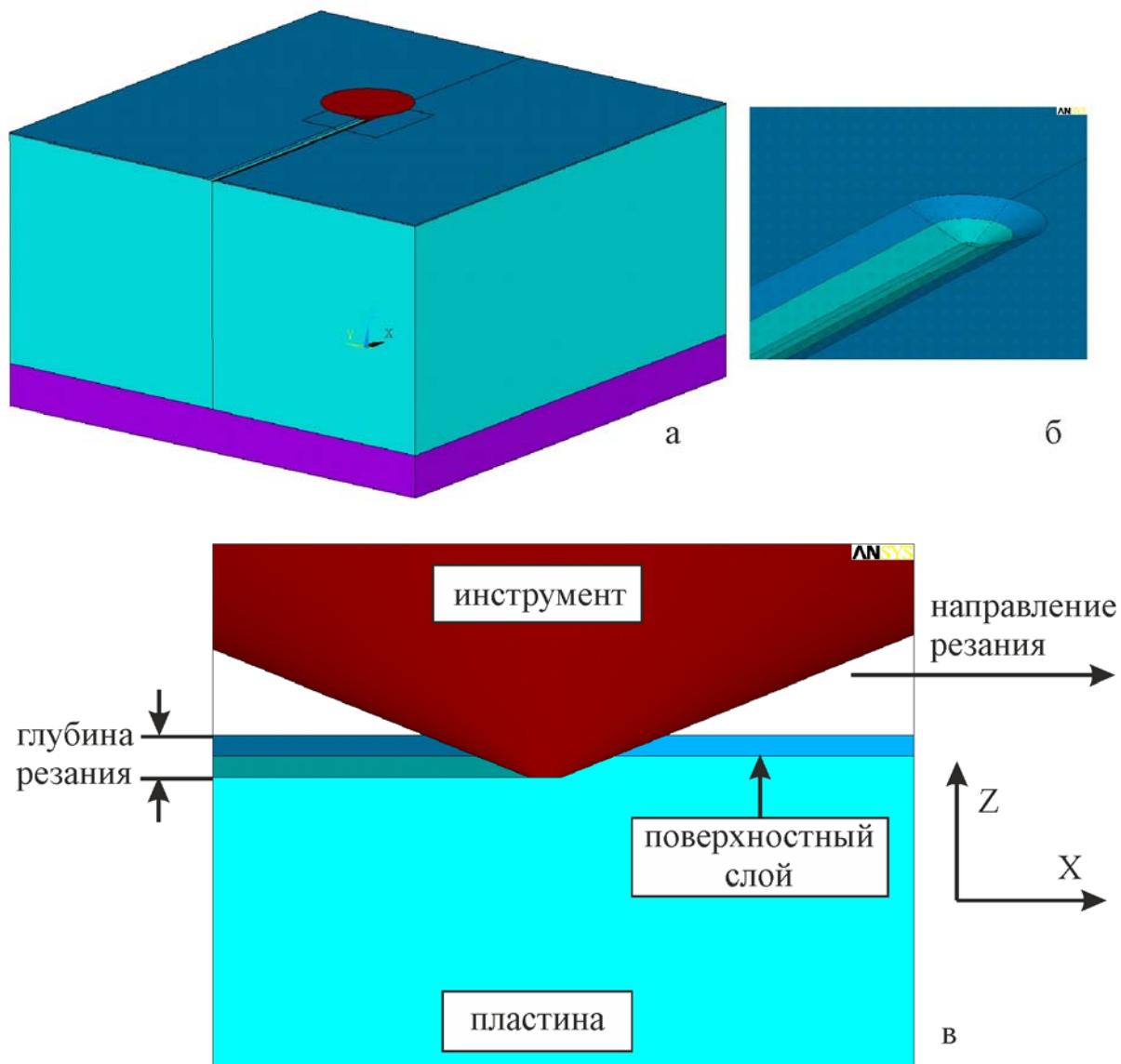


Рисунок 2.9 – Схема контактного и силового воздействия режущего инструмента на поверхность пластины в модели с выделенным поверхностным слоем: а – изометрическое изображение трехмерной геометрической модели; б – риска; в – вид в продольном сечении

На схеме инструмент находится в контакте с заготовкой; в отрицательной полуплоскости координат вдоль оси X вырезана на поверхности заготовки риска. Инструмент расположен в центральной области геометрической модели, его вершина совпадает с началом координат. В геометрии учитывается износ инструмента радиусом скругления вершины.

Компьютерная модель позволяет выбрать тип геометрии инструмента из трех возможных вариантов: четырехгранная пирамида, трехгранная пирамида, конус. Алмазный конический инструмент применяется для выполнения технологических операций гравирования и был использован в данной работе в экспериментах по технологической подготовке производства САЕ/САМ на фрезерно-гравировальном станке с ЧПУ.

Геометрическая модель может быть построена средствами препроцессора программы САЕ в параметрическом виде и далее используется для генерации конечно-элементной сетки. В определении конечно-элементной модели используются объемы геометрической модели для назначения свойств материалов и типов конечных элементов. Поверхности геометрической модели используются для совмещения с ними граней конечных элементов и для ограничения степеней свободы. По длине ребер геометрической модели задается разбиение на конечные элементы и таким образом регулируется величина конечных элементов. В вершинах геометрической модели могут задаваться нагрузки в виде составляющих силы резания или вынужденного перемещения инструмента на глубину резания.

В зависимости от величины нормальной силы и глубины резания результатом силового воздействия инструмента на пластину из хрупкого материала может быть упругая деформация всей пластины; локальная пластическая деформация в зоне контакта без удаления материала; полезное удаление материала за счет образования и направленного роста хрупких трещин с последующим скальванием; образование фасеток скола под действием пластической деформации; образование дефектного слоя за счет неконтролируемого роста трещин. Реализация перечисленных физических

явлений определяется уровнем напряжений и деформаций, возникающих в пластине из хрупкого материала.

Конечно-элементная модель составлена из твердотельных элементов SOLID с квадратичной функцией формы как для двухмерных (рисунок 2.10 а), так и для трехмерных вариантов расчета. Двухмерные модели могут быть использованы для компьютерного анализа режимов прямоугольного свободного резания, когда резание материала производится только главной режущей кромкой инструмента, которая перпендикулярна направлению подачи. Соответственно, ширина режущего лезвия превышает ширину обрабатываемой части заготовки, и стружка отделяется только в одной плоскости.

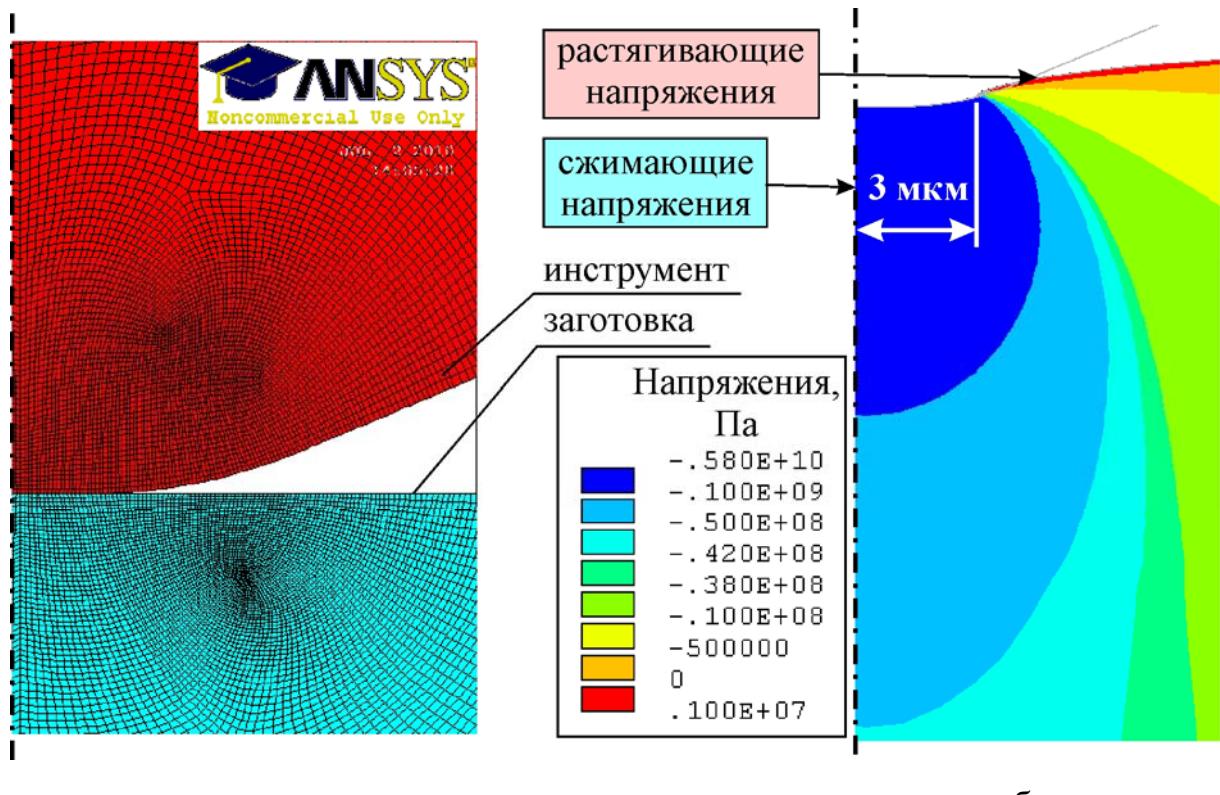


Рисунок 2.10 – Двухмерная конечно-элементная модель для анализа нажимного воздействия инструмента на заготовку (а) и распределение первого главного напряжения в модели (б)

В двухмерных конечно-элементных моделях задается реальная константа конечных элементов, которая определяет третий невидимый линейный размер пластины. При использовании конического инструмента зада-

ча может быть решена в осесимметричной постановке [91] на двухмерной модели половины сечения с указанием оси симметрии. На схеме в увеличенном масштабе показана зона контакта вершины инструмента с поверхностью пластины; износ инструмента задан радиусом скругления, силовое воздействие инструмента передается на пластину через контактные элементы. Конечно-элементная сетка не равномерна по размеру конечных элементов и имеет повышенную плотность элементов в зоне контакта инструмента с пластиной. В неоднородной сетке контактные элементы и повышенная плотность элементов вблизи вершины резца увеличивают точность расчетов и уменьшают область сингулярного эффекта. Более грубая сетка вдали от контактной зоны позволяет сократить общее количество элементов в расчетной модели и снизить требования к запрашиваемым машинным ресурсам. В контактном взаимодействии инструмент может быть представлен жестким телом; возможен также компьютерный анализ напряжений в самом инструменте.

Алмазный инструмент создает концентрацию напряжений в области пластины под вершиной резца и по нормали к главной режущей кромке. В согласии с рассмотренной теоретической моделью компьютерное моделирование внутреннего напряженного состояния в области нажимного воздействия алмазного инструмента на пластину из хрупкого материала показывает аналогичный характер распределения. Распределение главных напряжений в пластине, полученное с использованием двухмерной конечно-элементной модели [92], показано на рисунке 2.10 б.

На схеме распределения первого главного напряжения в вертикальном направлении вниз от вершины резца изопараметрическими линиями равных значений показаны возникающие в пластине напряжения сжатия. В направлении, параллельном плоскости пластины, действуют напряжения растяжения. Зона сжатия с большими отрицательными значениями первого главного напряжения находится в пластине непосредственно под вершиной алмазного резца и распространяется вглубь пластины по нормали к

поверхности. Зона растяжения с положительными значениями первого главного напряжения представляет собой тонкий горизонтальный слой шириной менее 1 мкм на поверхности пластины, что создает благоприятные условия для образования трещин в поверхностном слое и может создавать угрозу для целостности тонких покрытий.

Параметрическая компьютерная модель, предложенная в данной работе, может быть эффективно реализована в программной среде САЕ ФИДЕСИС [93]. Следует отметить вычислительную эффективность программы ФИДЕСИС, которая способна использовать все предоставленные компьютером ресурсы (рисунок 2.11).

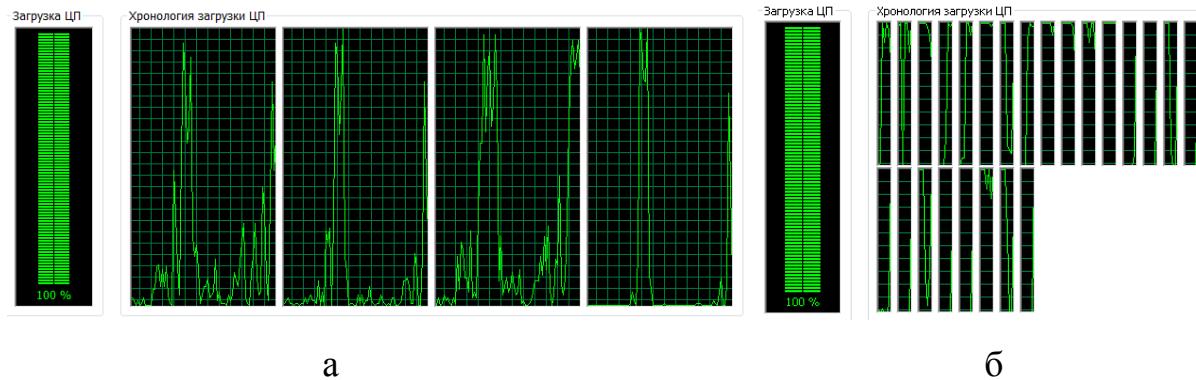


Рисунок 2.11 – Хронология загрузки процессоров решателем программы ФИДЕСИС: а – на ноутбуке, б – на расчетной станции

Вычисления с параметрической компьютерной моделью в программе ФИДЕСИС были запущены на компьютерах с разной вычислительной мощностью. Количество конечных элементов в расчетной сетке и их размеры лимитируются объемом свободной оперативной памяти. При этом, в отличие от программы ANSYS, программа ФИДЕСИС по умолчанию определяет и загружает все имеющиеся процессоры на 100%.

2.3 Алгоритм поиска параметров режима резания с применением средств САЕ

В традиционном подходе к разработке технологического процесса в программе САМ технолог формирует траекторию движения режущего инструмента, назначая параметры режима резания в соответствии с эмпири-

ческим опытом. Вместе с тем, технологические процессы механической обработки, выполняемые на современных станках с ЧПУ (Computer Numerical Control – CNC), характеризуются повышающимся уровнем автоматизации и компьютеризации. Предлагаемая нами концепция информационной интеграции программ САЕ/САМ [94] вовлекает в производственный процесс не только станки с ЧПУ, но и такие современные ресурсы цифрового производства, как суперкомпьютеры. Объединение мощных и дорогостоящих ресурсов позволяет создавать эффективные распределенные проектно-производственные системы.

На рисунке 2.12 представлена информационная схема автоматизированной технологической подготовки производства изделий на станках с ЧПУ с использованием цифровой модели и обозначены элементы, для которых целесообразно использовать компьютерное моделирование технологического процесса с применением средств САЕ. Цифровая модель является ведущим компонентом системы MES (Manufacturing Execution System), выполняющей функции управления производственной системой. Для управления производственными процессами с применением MES необходимы как инженерная, так и эксплуатационная цифровая модель.

В управлении технологическим процессом механообработки система ЧПУ обеспечивает перемещение инструмента по сложной пространственной траектории, а также регулирует внутренние процессы станка и режимы резания. Программное обеспечение CAD/CAM рассматривается в объединенной группе автоматизированного проектирования, поскольку программа, управляющая движениями инструмента, генерируется в программе САМ в соответствии с заданной в программе CAD трехмерной геометрической моделью обрабатываемой поверхности. Следует подчеркнуть, что в настоящее время надежно организована информационная интеграция CAD-CAM, которая поддерживается функциональными интерфейсами и обеспечивает безошибочную трансляцию геометрических моделей и данных об изготавливаемой детали. Интегрированные системы CAD/CAM по-

зволяют автоматизировать рутинные операции проектирования и оформления документации для выбранного варианта технологического процесса.

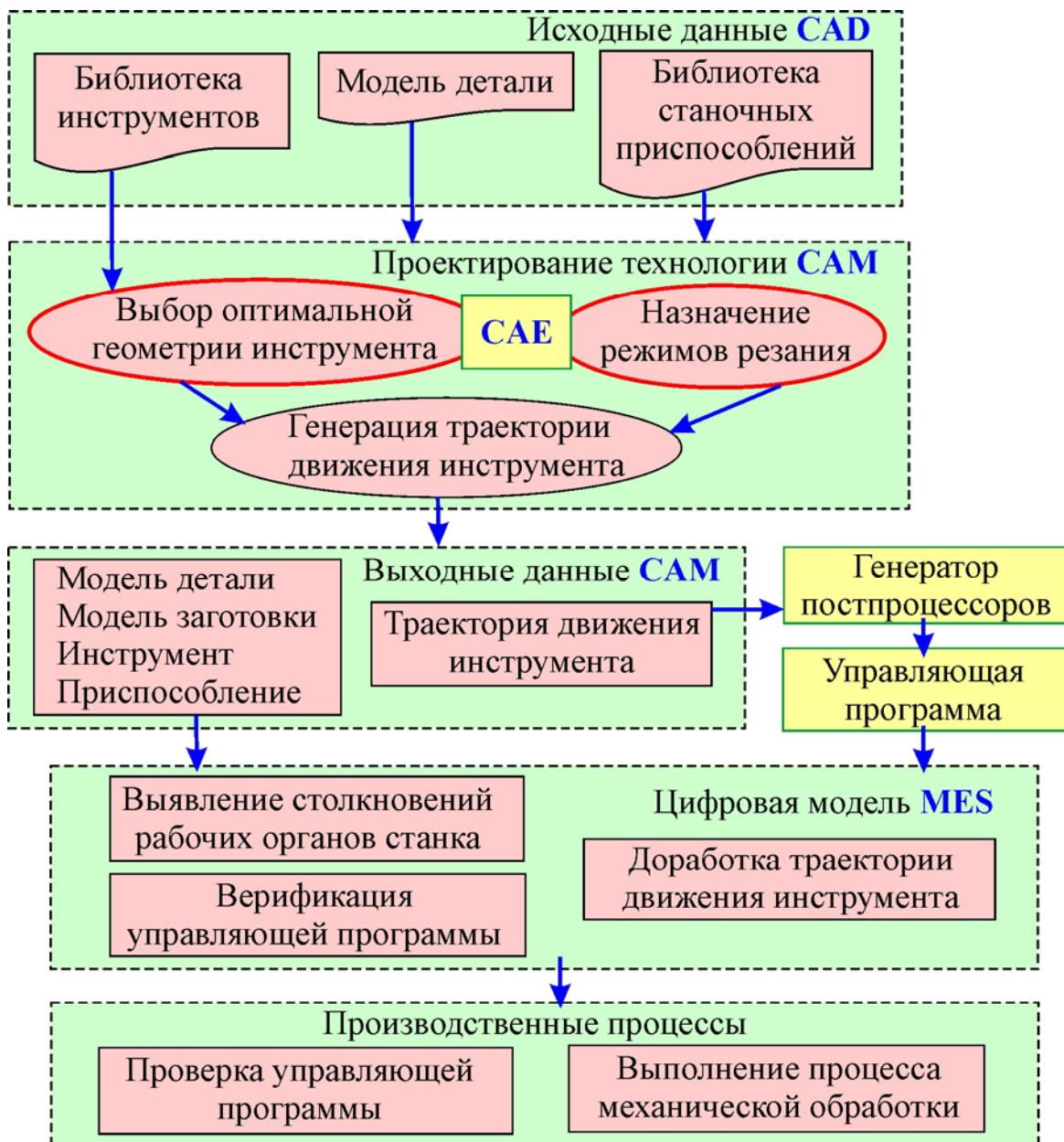


Рисунок 2.12 – Схема технологической подготовки производства изделий на станках с ЧПУ с использованием цифровой модели

Результатом работы САМ-программы является траектория перемещений инструмента, представленная в виде G-кодового файла. Через интерфейс САМ задается стратегия обработки, режущий инструмент, скорость и другие параметры.

Современные САПР изделий машиностроения и приборостроения имеют средства инженерного анализа для расчета напряжений и деформаций в виде встроенных или автономных программ САЕ. Программы инженерного анализа САЕ интегрированы с программами CAD и ориентированы на обеспечение прочности конструкции. Программы САЕ не имеют информационной интеграции с программами технологической подготовки САМ. Вместе с тем, привлечение средств САЕ позволяет выполнять предиктивную обработку и аналитику [95] ожидаемого качества обработанной поверхности, основанную на анализе напряженно-деформированного состояния. Термин предиктивной обработки относится к моделированию механической обработки в рамках интеграции средств САПР. Алгоритм поиска параметров режима резания хрупких материалов с применением средств компьютерного инженерного анализа САЕ в интегрированной программной среде САЕ/САМ показан на рисунке 2.13.

В рамках сформулированной модели разработанный алгоритм предполагает использование решателя программы САЕ для расчета напряжений в локальной зоне резания, где режущий инструмент находится в контакте с обрабатываемым хрупким материалом, в соответствии с задаваемыми параметрами модели. Соответственно, ключевым фактором интеграции САЕ/САМ является параметрическое моделирование технологических процессов. Расчет напряжений в современных САПР выполняется средствами инженерного анализа САЕ методом конечных элементов. По расчетным напряжениям проводится анализ протяженности поверхностных и подповерхностных разрушений в хрупком материале при силовом воздействии на поверхность режущего инструмента.



Рисунок 2.13 – Алгоритм компьютерного моделирования
технологического процесса механической обработки средствами САЕ

На схеме показаны операции, выполняемые последовательно в трех модулях программы САЕ: работа препроцессора завершается созданием расчетной сетки; процессор выполняет вычисление напряжений и записывает расчетные данные в файл результатов; постпроцессор читает расчетные данные, проводит с ними вычисления в соответствии с теоретической моделью, визуализирует назначенные 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 САЕ, так и автономными программами, разработанными в диссертационной работе. Запись данных в текстовый файл и пере-

дача данных в виде текстовых файлов позволяет организовать быстрый обмен информацией между удаленным компьютером с установленной программой САЕ и рабочим компьютером технолога. Следует подчеркнуть, что к настоящему моменту решены вопросы интеграции CAD-САЕ, в рамках которой геометрические данные передаются от модулей CAD в модули САЕ на компьютерный инженерный анализ и обратно после топологической оптимизации. Аналогичные стандарты и общепринятые правила передачи данных с целью объединения САЕ-САМ пока не разработаны.

2.4 Выводы по главе 2

1. Сформулирована теоретическая модель образования дефектной зоны в хрупком материале при силовом воздействии для расчетного обоснования параметров технологического процесса механической обработки средствами САЕ в интегрированной программной среде САЕ/САМ. Теоретическая модель включает параметрическое описание геометрии режущего инструмента и количественные критерии образования дефектной зоны в хрупком материале при силовом воздействии.

2. Обоснована параметрическая компьютерная модель для количественного анализа дефектной зоны, образующейся в хрупком материале при силовом воздействии на поверхность режущего инструмента. Параметрическая компьютерная модель может быть реализована в конечно-элементных программах САЕ с применением интерпретируемых алгоритмических языков программирования.

3. Разработан алгоритм поиска параметров лезвийной обработки с применением средств компьютерного инженерного анализа в интегрированной программной среде САЕ/САМ. Алгоритм выделяет работу ресурсоемкого процессорного модуля САЕ, что позволяет его реализацию в облаке и автоматизацию проектирования на этапах препроцессорной и постпроцессорной обработки данных.

ГЛАВА 3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В третьей главе представлены 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 расчетов. Показана интегрированная работа отечественных систем автоматизированного проектирования и технологической подготовки с использованием облачных сервисов.

3.1 Программный модуль для расчета напряжений в зоне резания на языке APDL

Программный комплекс ANSYS может быть использован для компьютерного моделирования в удаленном режиме процессов механической обработки [96] хрупких материалов. В конфигурации ANSYS Mechanical содержится внутренний интерпретируемый алгоритмический язык программирования APDL, который позволяет сформировать командный файл и загрузить вычислительную систему работой в пакетном режиме. Интерпретация команд APDL осуществляется через препроцессорный модуль ANSYS в интерактивном или автоматическом режиме.

Язык APDL содержит около 1500 команд. Используются команды двух типов: команды определения действия и команды выполнения действия. Синтаксис команды включает название команды и ее аргументы, разделенные запятыми без пробелов. Команды, которые содержат основные управляющие инструкции, например, вывод данных, управление файлами,

графическое отображение, начинаются со знака / (слэш). Команды, управляющие циклами и макросами, определяющие имя и численное значение параметров, начинаются со знака * (звездочка).

Команды APDL сгруппированы по основным трем этапам компьютерного анализа и задачам, выполняемым на этих этапах. Этапы компьютерного анализа выполняются в отдельных модулях: препроцессор, процессор, постпроцессор. 1) Препроцессорные команды выполняют операции построения геометрических и сеточных моделей. 2) Процессорные команды назначают опции решателей, создают вычислительную модель, запускают расчет и записывают результаты расчетов в виде числового массива данных, привязанных к узлам и элементам расчетной сетки. 3) Постпроцессорные команды осуществляют чтение данных из файла результатов, обработку и визуализацию расчетных данных. Специализированные модульные команды запускаются внутри модуля. Общие команды выбора объектов для обработки GET, организации цикла DO, перехода IF могут быть задействованы в любом модуле.

С целью реализации алгоритма автоматизации проектирования процессов механической обработки хрупких материалов нами разработан программный модуль на языке APDL «Моделирование силового воздействия режущего инструмента на хрупкие материалы с покрытием» BritmaCUT [97]; на который получено авторское свидетельство (приложение П1). Текст программы содержит 700 строк. Разработанный программный модуль 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.

Созданная программа позволяет выявить зависимость напряженно-деформированного состояния основного материала и покрытия от геометрии режущего инструмента, от толщины и свойств материала покрытия [98], от силовых параметров режима резания. Расчетные зависимости ис-

пользуются, в частности, для оптимизации технологий разделения полупроводниковых пластин с минимальным повреждением поверхностного слоя. Программный модуль может применяться в автоматизированных системах проектирования, в научных исследованиях и в учебном процессе.

Разработанный программный модуль BritmaCUT анализирует напряженно-деформированное состояние пластины с функциональным поверхностным слоем [99]. Пластина лежит на подложке и испытывает силовое воздействие от алмазного инструмента. Заданные граничные условия: ограничение степеней свободы – запрет перемещений по вертикали нижней поверхности подложки; нагрузка – распределенная сила, приложенная к верхней грани алмазного резца; контактные элементы на поверхности пластины – в контактном взаимодействии резец представлен жестким или упругим телом. Задача решена в квазистатической постановке, поскольку скорости резания полупроводниковых материалов крайне малы по сравнению с обычными режимами резания металлических сплавов, и можно считать, что напряженное состояние устанавливается быстрее, чем изменяется силовая нагрузка. Все входные данные компьютерной модели, включая параметры режима резания, задаются параметрически.

Построение геометрической модели. Конечно-элементная модель геометрии резания в соответствии с изложенной формализацией построена с использованием встроенных средств CAD препроцессора ANSYS; геометрия включает пластину, подложку и режущий инструмент в контакте с обрабатываемой поверхностью. Инструмент может быть заточен под конус или под призму с любым внутренним углом.

В геометрической модели может быть активирован один из трех вариантов формы режущей части инструмента (конус, трехгранная пирамида и четырехгранная пирамида) с учетом применяемых в полупроводниковой промышленности резцов (рисунок 3.1).

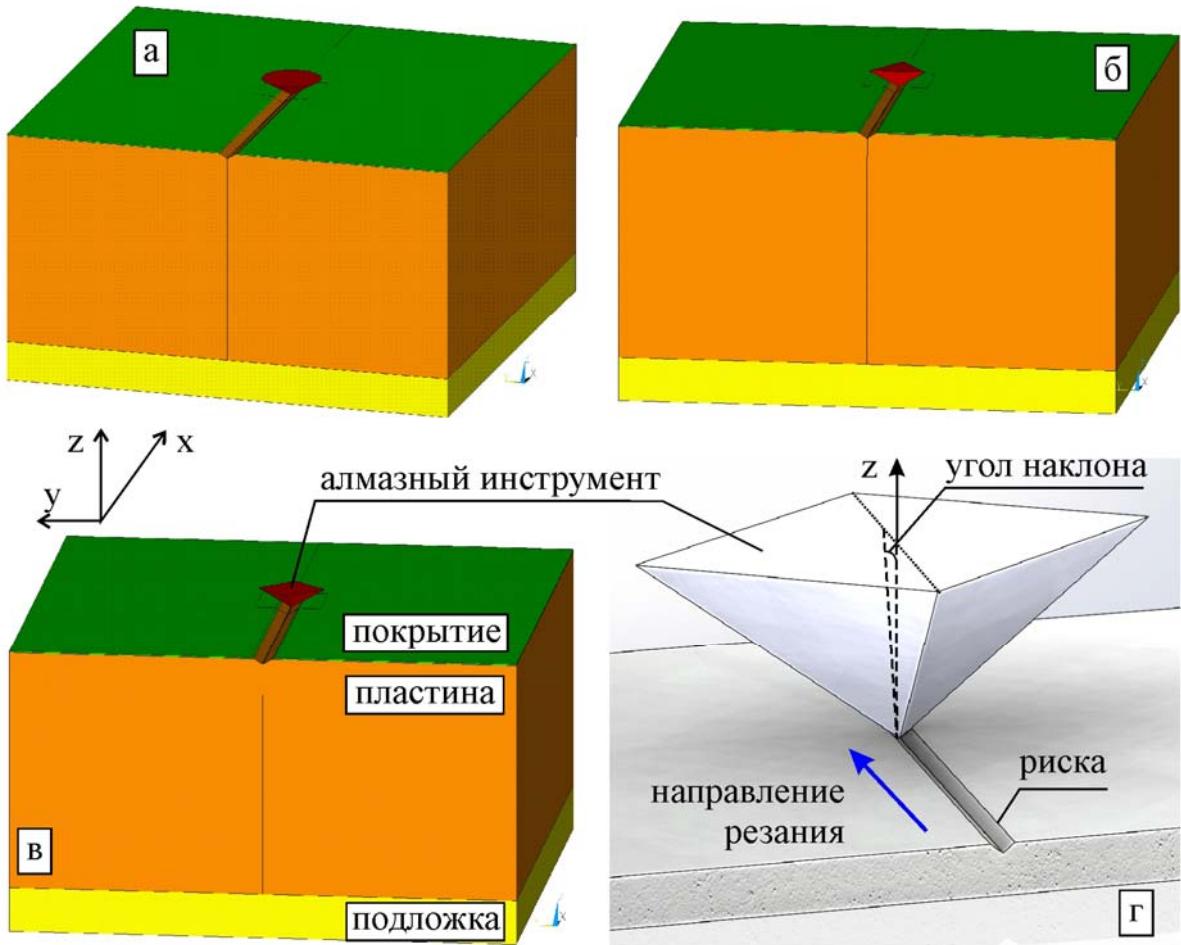


Рисунок 3.1 – Трехмерная геометрическая модель силового воздействия лезвийного инструмента на пластину с выделенным поверхностным слоем для трех вариантов геометрии вершины резца – конус (а), трехгранная пирамида (б) и четырехгранная пирамида (в); трехмерная геометрическая модель вершины резца в зоне резания (г)

Исследуемая форма режущей части инструмента не ограничивается стандартом [100], благодаря параметризации на этапе построения геометрической модели можно менять углы, определяющие форму резца и его положение относительно обрабатываемой поверхности.

В модели обособлен поверхностный слой, который может иметь одинаковые с пластиной физико-механические свойства или отличающиеся, как по величине, так и по закономерностям поведения материала при нагружении. Параметрическое задание линейных размеров геометрии позволяет варьировать размеры пластины, покрытия и инструмента.

При построении не применяются граничные условия симметрии и не производится рассечение геометрической модели плоскостями симметрии, что увеличивает объем вычислительной модели, но разрешает варьировать углы, задающие асимметричное положение инструмента относительно обрабатываемой поверхности. Выделены в геометрической модели объемы с ожидаемым эффектом сингулярности в зоне резания для уплотнения в них конечно-элементной сетки и обеспечения быстрой сходимости решения.

Выбор конечных элементов. Для создания вычислительной модели из библиотеки ANSYS выбраны трехмерные твердотельные конечные элементы, поддерживающие численное исследование механического поведения конструкции. При моделировании напряженно-деформированного состояния объемной конструкции с применением таких элементов в каждом узле используется три поступательные степени свободы и вычисляется три перемещения по направлениям глобальной системы координат. В данной работе для создания конечно-элементных моделей использован однородный трехмерный элемент SOLID186 с 20 узлами и квадратичной функцией формы; конечный элемент показан на рисунке 3.2 с нумерацией узлов и вариантами вырождения геометрии.

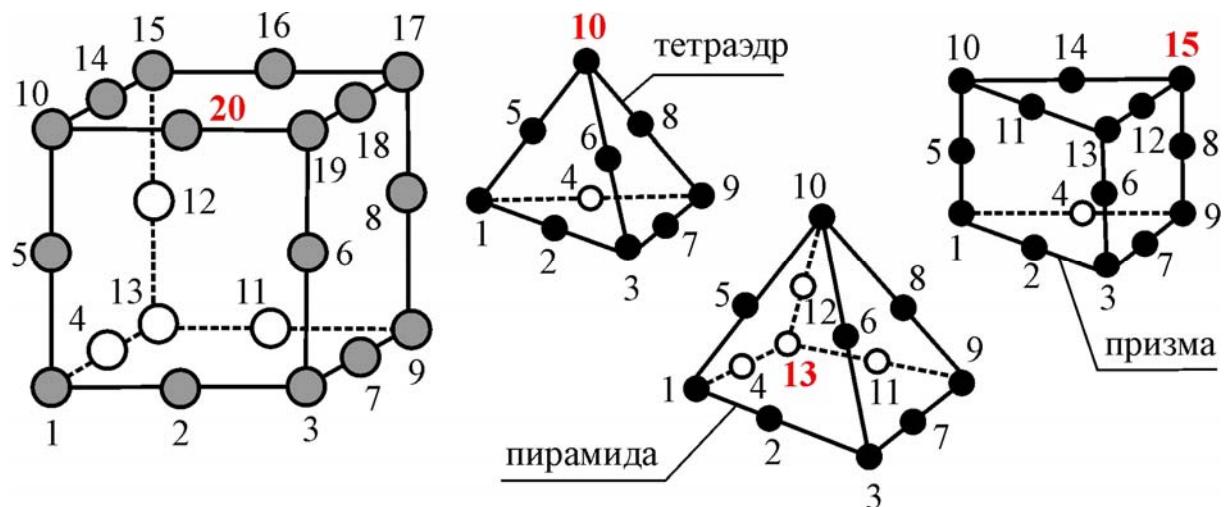


Рисунок 3.2 – Конечный элемент Solid186

и вырожденные формы элемента – тетраэдр, пирамида, призма

Элемент SOLID186 разрешает вырождение формы до пирамиды и тетраэдра, удаление материала заданием опции «рождение и смерть», а

также анизотропию механических свойств (модуль нормальной упругости, коэффициент поперечного сжатия, температурный коэффициент линейного расширения). Силовая нагрузка представляется давлением на грани конечного элемента.

Сравнительный анализ конечных элементов проведен на задаче торцевого вдавливания алмазного цилиндра диаметром $r = 0.1$ мм в упругую пластину, выполненную из кремния, с осевым усилием $F_z = 0.5$ Н. Согласно теории контакта Генриха Герца [101], вертикальное перемещение u_z цилиндрического индентора с плоским торцем вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} u_z &= \frac{F_z}{2r} \left(\frac{1 - \nu_C^2}{E_C} + \frac{1 - \nu_{Si}^2}{E_{Si}} \right) = \\ &= \frac{0.5}{2 \times 0.0001} \left(\frac{1 - 0.1^2}{800 \times 10^9} + \frac{1 - 0.26^2}{18.9 \times 10^9} \right) = \\ &= 0.126 \times 10^{-6} [\text{м}], \end{aligned} \quad (3.1)$$

где ν – коэффициент Пуассона и E – модуль Юнга алмаза (C) и кремния (Si) соответственно.

В программной среде ANSYS исследовано влияние различных параметров конечно-элементной сетки на расчетный результат при решении задачи Герца об упругом контакте цилиндрического индентора с пластиной. На расчетной сетке контакт осуществляется через поверхностные контактные элементы. Представляет интерес сравнение расчетных данных компьютерной модели с аналитически полученной величиной вертикальных перемещений. Вычисленные на сетке значения вертикального перемещения цилиндрического индентора и соответствующие параметры вычислительной модели приведены в таблице 3.1.

Как видно из расчетных параметров, близкие к аналитическому значению перемещения алмазного цилиндра в контакте с кремниевой пластиной можно получить уплотнением конечно-элементной сетки при использовании элементов второго порядка Solid186 и Solid187.

Таблица 3.1 – Параметры расчета методом конечных элементов
для тестовой контактной задачи Герца

Элемент	u_z , мкм	Кол-во узлов	Кол-во элементов	Кол-во уравнений	Память, МБ	Время, с
Solid186 20 узлов	0.0984	4024	2157	18189	3.86	5.1
	0.1120	14433	8948	76208	26.37	11.2
	0.1230	25161	16226	137504	56.62	20.3
Solid185 8 узлов	0.0557	667	2153	3482	0.30	5.0
	0.0862	8246	41743	65713	16.93	15.1
	0.1090	12570	63900	100842	26.47	21.6
Solid187 10 узлов	0.1090	4024	2157	11718	2.92	4.7
	0.1190	14433	8948	49364	21.78	9.7
	0.1260	25161	16226	88826	46.89	17.5
Solid285 4 узла	0.0629	667	2153	1996	0.43	3.2
	0.0927	8246	41743	32216	16.39	11.2
	0.1120	12570	63900	49512	26.08	17.1

Элемент Solid187 имеет форму тетраэдра, элемент Solid186 имеет форму параллелепипеда и может быть редуцирован до тетраэдра.

Обеспечение сходимости и точности расчетов на сетке. Препроцессором генерируется неоднородная по плотности конечно-элементная сетка, в которой контактные элементы и повышенная плотность элементов вблизи вершины резца увеличивают точность расчетов и уменьшают область сингулярного эффекта. Более грубая сетка вдали от контактной зоны позволяет сократить общее количество элементов в расчетной модели и снизить требования к запрашиваемым машинным ресурсам.

Сопряжение мелкой сетки вблизи контакта и грубой сетки в основном объеме осуществляется через встроенные функции контроля за геометрией элементов сеточного генератора. Чувствительность сетки к применяемым граничным условиям и отсутствие влияния плотности сетки на

результат расчета обоснованы тестовыми расчетами с увеличением плотности сетки согласно общепринятой методике, которая заключается в следующем. Существует компромисс между объемом вычислительной модели, а именно, количеством расчетных узлов и элементов, и доступными машинными ресурсами. Критическими машинными ресурсами являются объем оперативной памяти и производительность процессоров. Оперативная память лимитирует количество неизвестных переменных в вычислительной модели. Количество и производительность процессоров (ядер) определяет расчетное машинное время. Как показывают тестовые вычисления, увеличение количества расчетных узлов до некоторого предельного объема повышает точность расчетов на сетке, как правило, нелинейно, но вместе с тем увеличивается расчетное время и запрашиваемый решателем объем оперативной и дисковой памяти.

Задание модели поведения материалов. Модели поведения материалов в вычислительных экспериментах задают зависимости, определяющие отклик материала наложенную нагрузку. В данном исследовании механическую обработку материалов предполагается осуществлять с малыми значениями скорости и глубины резания. Поэтому модель поведения обрабатываемого материала учитывает только механический отклик на силовое нагружение в состоянии установившегося режима резания без эффектов нагрева и тепловых деформаций.

Материал обрабатываемой хрупкой пластины может быть анизотропным или изотропным в зависимости от внутренней структуры и может иметь монокристаллическую (Si, Ge, GaAs, SiC), поликристаллическую (керамика) или аморфную (стекло) структуру. Модель поведения материала пластины – упруго-пластическая. Материал функционального поверхностного слоя может по свойствам отличаться от материала хрупкой пластины в зависимости от химического состава – напыленный металл, химическое соединение или дипированый слой. Например, ZnS используется как функциональное покрытие толщиной 5 мкм на кремниевых пластинах

для регулирования интенсивности светового потока в солнечных батареях или для обеспечения прозрачности при пропускании инфракрасного излучения на выделенной площадке оптического окна [102]. Модель поведения материала поверхностного слоя – упруго-пластическая.

Задание модели контакта. Для моделирования контактного воздействия режущего инструмента на обрабатываемую поверхность были выбраны 8-узловые контактные элементы второго порядка TARGE170 для инструмента и CONTA174 для пластины. Выбранные контактные элементы используются для деформируемой поверхности и идентичны по узловой структуре граням конечных элементов на этой поверхности. Для алмазного инструмента коэффициент трения μ не превышает 0.2. Экспериментально определенное значение коэффициента трения на передней поверхности алмазного инструмента равно $\mu = 0.11$ при резании монокристаллического кремния [18].

Задание граничных условий. В рамках предложенной теоретической модели к граничным условиям при компьютерном моделировании силового воздействия алмазного инструмента на пластину из хрупкого материала относятся узловые силы и ограничение степеней свободы в узлах. В компьютерной модели пластина приклеена к подложке. Для нижней поверхности подложки задана жесткая заделка, определяемая как ограничение перемещений по трем осям координат для узлов элементов, принадлежащих выбранной поверхности. Силовое воздействие инструмента на поверхность пластины передается через поверхностные контактные элементы.

Выбор опций решателя для реализации в параллельных вычислениях. Эффективное решение систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), возникающих в задачах моделирования механической обработки, предполагает использование производительных вычислительных систем с применением параллельных численных методов. Возможные методы решения – прямые (sparse) и итерационные (метод сопряженных градиентов, Preconditioned Conjugate Gradient – PCG), с общей или распределенной па-

мятью. Каждый решатель имеет свои особенности взаимодействия с памятью. При использовании прямого разреженного решателя глобальная матрица собирается полностью в памяти, прямой решатель эффективен, когда в распоряжении имеется большой объем памяти. Для симметричной матрицы затем формируется нижняя треугольная матрица, факторизация которой требует на порядок большего объема памяти. Так, если на 1 млн степеней свободы (Degrees of Freedom – DOF) требуется 1 ГБ памяти, то на факторизацию – 10 ГБ памяти.

Если задача хорошо обусловлена, используются прямые методы. Использование итерационных методов может вызвать проблемы со сходимостью алгоритмов. Вместе с тем, основная общемировая тенденция развития алгоритмов решения СЛАУ состоит в использовании итерационных алгоритмов из-за их эффективности. Тестовое решение редуцированной задачи с целью оценки эффективности численных методов проведено с использованием различных решателей ANSYS. Сравнительные результаты приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Эффективность численных методов при решении задачи силового воздействия инструмента на поверхность

Метод	Память, МБ	Процессорное время, сек
прямой	2000	1200
итерационный	1800	700

В вычислительной модели выбран итерационный решатель PCG, как более эффективный в параллельных вычислениях с иерархической структурой вычислений. Итерационный решатель формирует сначала элементные матрицы, собирает их в глобальную матрицу, присваивает узловым переменным начальные значения, затем вычисляет узловые переменные в итерационном процессе. Выбранный решатель требует меньше памяти и быстрее считает. Решатель PCG применим в квазистатической задаче, совместим с контактной моделью на базе метода пенальти, если отсутствует

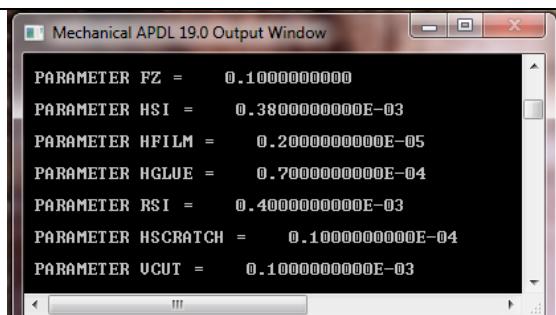
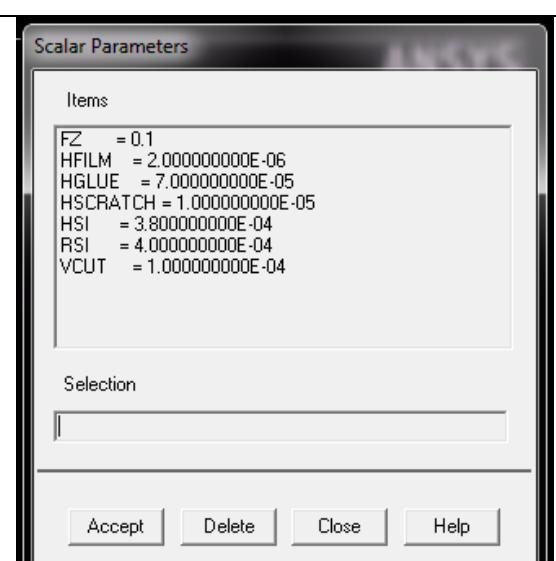
жесткое движение инструмента вследствие потери контакта, но продолжает итерационное вычисление при жестком движении инструмента. В данной компьютерной модели контакт инструмента с обрабатываемой поверхностью обеспечивается условиями силового нагружения.

Выбранный решатель критичен в отношении конечных элементов со значительно различающимися ребрами. Поэтому осуществляется контроль за формой конечных элементов при генерации сетки. Отсутствие искаженных элементов позволяет на два порядка поднять критерий сходимости с $1.0e^{-8}$ до $1.0e^{-6}$ и снизить счетное время.

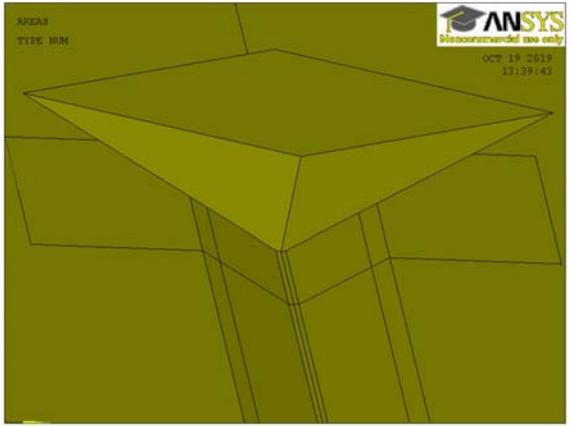
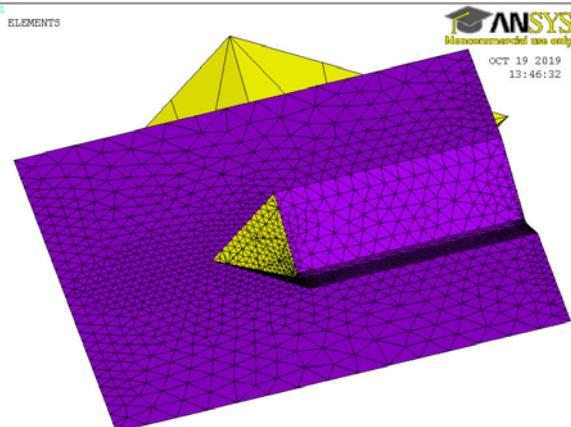
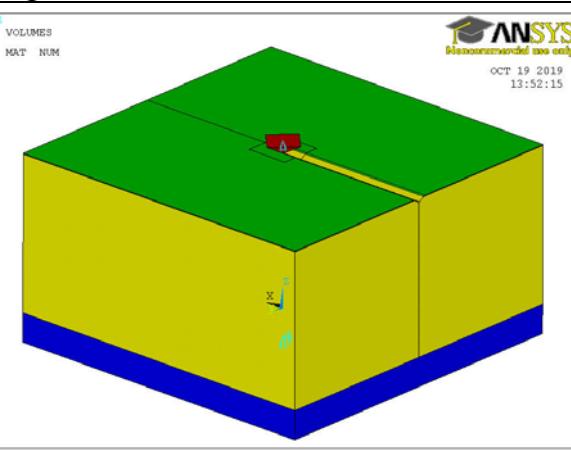
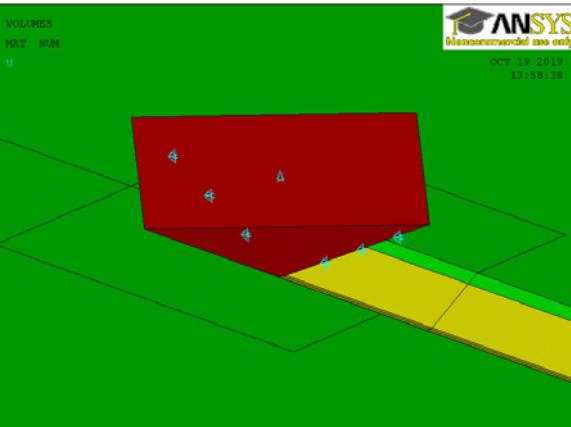
Использование программного модуля BritmaCUT позволяет автоматизировать проектирование с использованием средств инженерного анализа САЕ. Программный модуль BritmaCUT осуществляет интеграцию средств инженерного анализа САЕ в автоматизированную технологическую подготовку производства САМ, позволяет запустить расчетную программу САЕ на удаленном компьютере по запросу с рабочего компьютера технолога [103] и вернуть данные расчета напряжений технологу. Следует отметить, что в случае традиционных подходов к компьютерному моделированию и вычислительному эксперименту требуется непосредственное участие расчетчика в выполнении всех действий по компьютерному моделированию и текущему контролю эксперимента в ручном режиме.

В таблице 3.3. представлена последовательность шагов компьютерного моделирования с использованием программы Britmacut. Программа формирует параметрическую модель в препроцессоре программного комплекса ANSYS Mechanical, производит вычисление напряжений в зоне силового воздействия инструмента в процессорном модуле и выводит распределение вычисленных напряжений в постпроцессорном модуле. Программа Britmacut запускается на решение расчетной задачи и выполняется последовательно в автоматическом режиме.

Таблица 3.3 – Последовательность и содержание шагов компьютерного моделирования процессов резания с использованием программы Britmacut

Последовательность и содержание шагов	Иллюстрация содержания шага
1	2
Препроцессорный блок	
<u>Шаг 1.</u> Ввод списка параметров модели	
<u>Шаг 2.</u> Назначение числовых значений независимым параметрам модели: сила резания, глубина резания, скорость резания, толщина пластины, толщина покрытия, толщина подложки, размер расчетной области пластины, износ инструмента	
<u>Шаг 3.</u> Назначение физико-механических свойств материалов: модуль Юнга и коэффициент Пуассона пластины, покрытия, подложки, инструмента	<pre>*SET,Pu4cover,0.22 !* Коэффициент Пуассона покрытия *SET,E4cover,70e9 !* Модуль Юнга покрытия, ГПа *SET,Pu2down,0.22 !* Коэффициент Пуассона подложки *SET,E2down,70e9 !* Модуль Юнга подложки, ГПа *SET,Pu1plat,0.22 !* Коэффициент Пуассона пластины *SET,E1plat,70e9 !* Модуль Юнга обрабатываемой пластины, ГПа</pre>
<u>Шаг 4.</u> Выбор типа режущего инструмента: конус, трехгранная призма, четырехгранная призма	<pre>*SET,tooltype,3 !* Четырехгранной пирамиде присваивается идентификатор 3 !* Внутренний угол трехгранной пирамиды Берковича 130.6 !* Трехгранной пирамиде присваивается идентификатор 2 !* Внутренний угол алмазного конуса 120 !* Конусу присваивается идентификатор 1 !* Идентификаторы геометрии инструмента tooltype:</pre>

1	2
<u>Шаг 5.</u> Вычисление зависимых параметров модели: геометрические характеристики режущего инструмента	<pre> *SET,rscratch,hscratch*tan(alf/2) !* Боковая поверхность риски, м *SET,hreal,htool-hdelta-hscratch !* Геометрия инструмента, м *SET,hdelta,rtip/tan(alf/2) !* Геометрия инструмента, м *SET,rtool,htool*tan(alf/2) !* Геометрия инструмента, м !* Вычисляемые параметры *SET,rtip,1e-6 !* Износ инструмента, м *SET,htool,30e-6 !* Геометрия инструмента, м *SET,alf,120 !* Внутренний угол в градусах !* Геометрические параметры инструмента *SET,rscratch,hscratch*tan(alf/2) !* Боковая поверхность риски, м *SET,hreal,htool-hdelta-hscratch !* Геометрия инструмента, м *SET,hdelta,rtip/tan(alf/2) !* Геометрия инструмента, м *SET,rtool,htool*tan(alf/2) !* Геометрия инструмента, м !* Вычисляемые параметры </pre>
<u>Шаг 6.</u> Геометрическое построение вершины режущего инструмента и в контакте с ним - фрагмента пластины с выделенным поверхностным слоем	
<u>Шаг 7.</u> Назначение типа конечных элементов	
<u>Шаг 8.</u> Генерация конечно-элементной сетки	

1	2
<u>Шаг 9.</u> Коррекция сингулярной зоны	
<u>Шаг 10.</u> Введение контактных элементов в конечно-элементную сетку	
Процессорный блок	
<u>Шаг 11.</u> Ограничение степени свободы	
<u>Шаг 12.</u> Ориентация инструмента	

1	
<u>Шаг 13.</u> Силовая нагрузка	
<u>Шаг 14.</u> Расчет напряжений	
<u>Шаг 15.</u> Запись расчетных результатов в файл данных	

1	2
Постпроцессорный блок	
<u>Шаг 16.</u> Чтение расчетных данных из файла результатов	<pre>/POST1 !* Чтение расчетных данных SET, LAST</pre>
<u>Шаг 17.</u> Организация графического окна	<pre>/PLOPTS,INFO,0 /PLOPTS,LEG1,0 /PLOPTS,LEG2,0 /PLOPTS,LEG3,0 /PLOPTS,FRAME,0</pre>
<u>Шаг 18.</u> Визуализация расчетных результатов: объемное распределение первого главного напряжения, интенсивности напряжений	<p>AMSY 13.0 MAY 10 2012 12:02:32 MODAL SOLUTION STEP=1 SUB =1 TIME=1 SIMP = (AVG) ELEM=2DGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =.330E-05 SMN =553, 304 SNX =.200E+11 XV =.813709 IV =.488852 ZV =.314486 DIST=.581E-04 XF =-.481E-03 YF =.272E-03 ZF =.169E-03 A-ZS=-79, 2782 Z-BUFFER -500E+07 0 .500E+07 .100E+08 .150E+08 .200E+08 .500E+08 .100E+09 .500E+09</p>
<u>Шаг 19.</u> Графическое представление вычисленных напряжений: создание графиков изменения вычисленных напряжений по вертикали и на поверхности; вывод графиков в графическом окне	
<u>Шаг 20.</u> Сохранение графиков в текстовый файл для передачи в другие программы	<pre>2012dec28zfilm.txt — Блокнот Файл Правка Формат Вид Справка PRINT ALONG PATH DEFINED BY LPATH COMMAND. DSYS= 0 ***** PATH VARIABLE SUMMARY ***** S SZ 0.0000 -0.54185E+09 0.50000E-07-0.54691E+09 0.10000E-06-0.55196E+09 0.15000E-06-0.55702E+09 0.20000E-06-0.56208E+09 0.25000E-06-0.56713E+09 0.30000E-06-0.57219E+09</pre>

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.

Для выполнения серии расчетов создается файл в формате исполняемого скрипта, в случае x86 платформы Windows и версии программы ANSYS 19.5 файл скриптовой оболочки shell.bat содержит строки:

```
set ANSYS195_PRODUCT = ANSYS
set ANS_CONSEC = YES
"C:\Program Files\ANSYS Inc\v195\ansys\bin\winx64\ansys195.exe" -b -i
BritmaCUT1.dat -o 1.out
"C:\Program Files\ANSYS Inc\v195\ansys\bin\winx64\ansys195.exe" -b -i
BritmaCUT2.dat -o 2.out
```

В командных строках перечисляются файлы BritmaCUT1.dat, BritmaCUT2.dat и далее, которые представляют собой программный модуль BritmaCUT с разными значениями параметров модели. Соответственно, результаты расчетов будут записаны в файлы 1.out, 2.out и далее. Вместе с тем, сам программный модуль BritmaCUT создает небольшой по объему текстовый файл, в который записывает необходимые расчетные данные.

Созданный компьютерный инструментарий может быть использован для исследования и компьютерного моделирования широкого спектра материалов и условий механической обработки. В качестве примере на рисунке 3.3 в графическом виде представлены результаты вычислительного исследования силового воздействия алмазного инструмента на пластину с поверхностным функциональным слоем, которые получены с использованием программы Britmacut на удаленной расчетной станции [104].

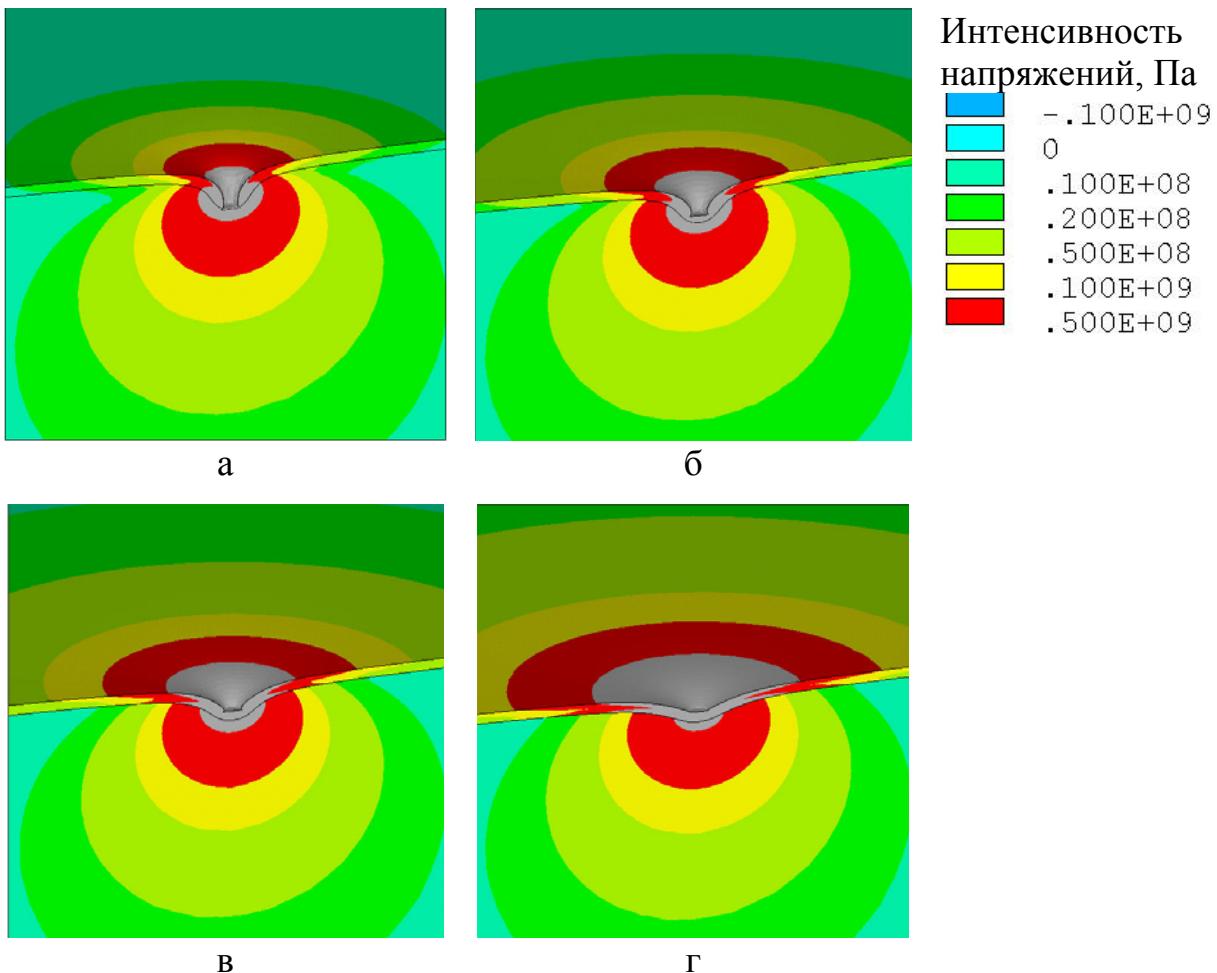


Рисунок 3.3 – Распределение интенсивности напряжений
при силовом воздействии алмазного инструмента

в сечении кремниевой пластины с покрытием толщиной 2 мкм и модулем нормальной упругости 25 (а), 70 (б), 200 (в) и 800 (д) ГПа

На схеме представлено распределение расчетного параметра интенсивности напряжений $\sigma_{int} = \max\{|\sigma_1 - \sigma_2|; |\sigma_2 - \sigma_3|; |\sigma_3 - \sigma_1|\}$ при силовом воздействии алмазного инструмента с внутренним углом 140 градусов в сечении пластины с покрытием толщиной 2 мкм и модулем нормальной упругости материала покрытия в интервале от 25 до 800 ГПа. Показанные вертикальные перемещения визуально преувеличены 50-кратно для наглядной демонстрации основных тенденций.

Механической обработке могут подвергаться кремниевые пластины без покрытия, с окисным или металлизированным покрытием. Так, для термически напыленных покрытий модуль Юнга может составлять 100

или 200 ГПа, коэффициент Пуассона равен 0,2. Прочность и твердость покрытия влияет на напряженное состояние как покрытия, так и пластины. С увеличением модуля Юнга напряженная зона в покрытии увеличивается, деформация уменьшается. Уровень напряжений в пластине при этом падает. Фактически покрытие с большими значениями модуля Юнга становится упрочняющим и препятствует выполнению технологической операции разделения кремниевой пластины. Можно предположить, что тонкие поверхностные покрытия с упругой моделью поведения и малым модулем Юнга способствуют бездефектному разделению пластин.

Для удаленной работы технолога с программой САЕ важной является постпроцессорная функция вывода расчетных данных вдоль выделенного направления и представления этих данных в текстовом формате, что упрощает передачу необходимой для анализа информации. В частности, на рисунке 3.4 показано распределение интенсивности напряжений в кремниевой пластине с покрытием из сульфида цинка (ZnS) в вертикальном направлении от вершины режущего инструмента. ZnS является сравнительно мягким материалом и в качестве покрытия снижает уровень внутренних напряжений в кремнии в процессе резания.

Сравнительный анализ главных напряжений для покрытия из сульфида цинка (ZnS) толщиной 5 мкм позволяет прогнозировать процессы разрушения. Концентрация первого главного напряжения наблюдается на свободной поверхности покрытия и на поверхности раздела. Повышенные положительные значения второго главного напряжения сосредоточены на границе раздела. Таким образом, разрыв покрытия инициируется и развивается от поверхности раздела. Сжимающие напряжения сосредоточены в слое толщиной 5 мкм под действием силовой нагрузки 0,1 Н, при этом максимум растягивающих напряжений наблюдается непосредственно в кремнии [105].

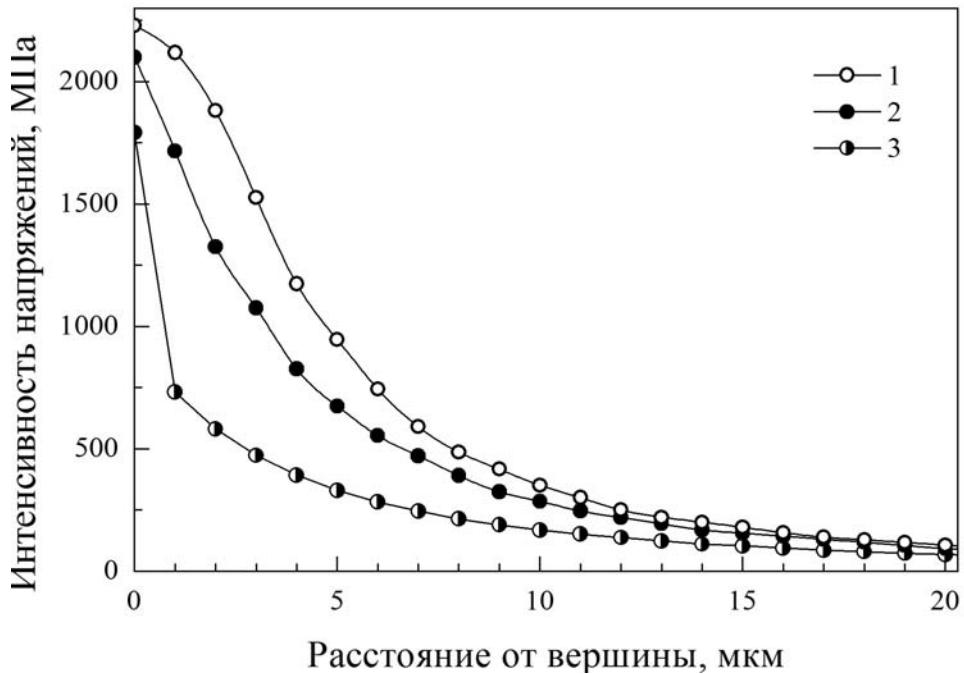


Рисунок 3.4 – Падение интенсивности напряжений в кремниевой пластине для толщины покрытия ZnS 1 мкм (1), 2 мкм (2), 5 мкм (3)

В процессе резания действуют нормальная и тангенциальная силы. Для относительно тонкого покрытия, когда толщина покрытия соизмерима с зоной контакта инструмента, с увеличением жесткости покрытия интенсивность напряжений под инструментом в пластине снижается, на границе раздела увеличивается. Жесткое и твердое покрытие снижает эффективность разделения и создает угрозу отрыва покрытия от пластины.

3.2 Программный модуль для расчета напряжений в зоне резания на языке APREPRO

Разработанный алгоритм для компьютерного моделирования внутренних напряжений в хрупком материале при контактном воздействии режущего инструмента реализован в диссертационной работе с применением отечественного программного обеспечения, вычислительные возможности которого не уступают зарубежным аналогам. Российский программный комплекс САЕ ФИДЕСИС имеет ряд преимуществ [93], в частности, обладает средствами эффективного распараллеливания вычислений с использованием технологий OpenMP, MPI, CUDA.

САЕ ФИДЕСИС поддерживает параметрическое моделирование в препроцессоре с использованием встроенного интерпретируемого алгоритмического языка программирования APREPRO (An Algebraic Preprocessor for Parameterizing Finite Element Analyses – алгебраический препроцессор для задания параметров анализа методом конечных элементов). APREPRO позволяет автоматизировать передачу и обработку данных в процессе проектирования с использованием облачных сервисов. Интерпретатором программ, написанных на языке APREPRO, является препроцессорный модуль САЕ ФИДЕСИС, который содержит в интерфейсе командную строку для обработки команд APREPRO. Дополнительный функционал программы САЕ ФИДЕСИС, обусловленный использованием языка программирования APREPRO, включает чтение информации из файла, выполнение повторяющихся операций в цикле, обработку данных и вычисления с использованием математических функций.

Препроцессор САЕ ФИДЕСИС позволяет импортировать данные геометрической модели в основных форматах современных CAD. Поддерживаются форматы *.STEP и *.IGES, производится их трансляция в формат *.SAT, соответствующий встроенному в САЕ ФИДЕСИС геометрическому ядру ACIS. Конструкторская программа CAD КОМПАС способна записывать геометрические данные в формате *.SAT, соответственно, передача геометрических моделей из CAD КОМПАС в САЕ ФИДЕСИС осуществляется напрямую.

Для решения задач напряженного-деформированного состояния в программе САЕ ФИДЕСИС реализован метод спектральных элементов. Метод спектральных элементов (МСЭ) является модификацией МКЭ и использует кусочные функции, состоящие из многочленов высокой степени в качестве базисных функций, в отличие от МКЭ, где расчетные сетки, как правило, составляются из линейных или квадратичных элементов. В случае моделирования процессов лезвийной обработки хрупких материалов в данной работе не рассматриваются сложные геометрические построения,

что позволяет использовать в полной мере все преимущества МСЭ, имеющего на данный момент ограничения только в представлении мелких геометрических подробностей расчетной сеткой. МСЭ обеспечивает высокую точность аппроксимации искомого решения при относительно небольшом количестве элементов в сетке и наиболее эффективен при динамическом анализе с использованием явной схемы по времени.

На тестовой задаче по нагружению кремниевой пластины силой 1 Н выполнено сравнение параметров решения на сетке. Результаты сравнения приведены в приложении П2. Разброс величины расчетного напряжения в контрольной точке не превышает 9%. По соотношению расчетного времени, используемой оперативной памяти и точности вычислений МСЭ имеет преимущество: лучшее соотношение параметров получено в случае третьего порядка элемента.

Для решения в параметрическом виде задачи о напряженном состоянии пластины из хрупкого материала под силовым воздействием режущего инструмента нами составлен программный код на языке APREPRO. Последовательность и содержание шагов компьютерного анализа процессов резания с использованием составленной программы соответствует пошаговой реализации алгоритма, представленной в таблице 3.3.

Апробировано выполнение программного кода с использованием облачной платформы Microsoft Azure. Вычисления выполнены в формате тонкого клиента на удаленном компьютере data-центра; соответственно, на рабочем компьютере, с которого осуществляется запуск программы ФИДЕСИС на расчет, не требуется установка лицензионной программы. Удаленная расчетная станция выбрана из списка доступных data-центров по комплексу параметров: географическое расположение (Германия), стоимость одного часа работы (от 40 рублей), количество ядер ($1 \div 416$), оперативная память ($1 \div 11400$ Гб). Для выполнения расчетов несущественными становятся параметры процессоров и памяти устройства пользователя, расчет может быть запущен с мобильного устройства.

Для обмена данными с расчетной станцией использован веб-браузер Яндекс. На облачной платформе Microsoft Azure создана виртуальная машина с соответствующими сложности решаемой задачи параметрами быстродействия и производительности (рисунок 3.5).

Помощник (1 из 7): Доступ ко всем сетевым по	
Имя компьютера	Somename
Операционная система	Windows
Издатель	fidesys
Предложение	fidesys
План	fidesys-7g
Поколение виртуальной машины	V1

Рисунок 3.5 – Страница виртуальной машины на платформе Microsoft Azure для запуска программного модуля на языке APREPRO

Для подключения к виртуальной машине использован протокол удаленного доступа к рабочему столу Windows – Remote Desktop Protocol (RDP). Работа с виртуальной машиной выстраивается в рабочем окне RDP и для пользователя не отличается визуально от рядового расчета в программной среде (рисунок 3.6). Обмен данными между рабочим компьютером и виртуальной машиной в облаке включает передачу текстового файла с программным кодом на языке APREPRO на виртуальную машину и возврат текстового файла с расчетными результатами в узлах конечно-элементной сетки на рабочий компьютер.

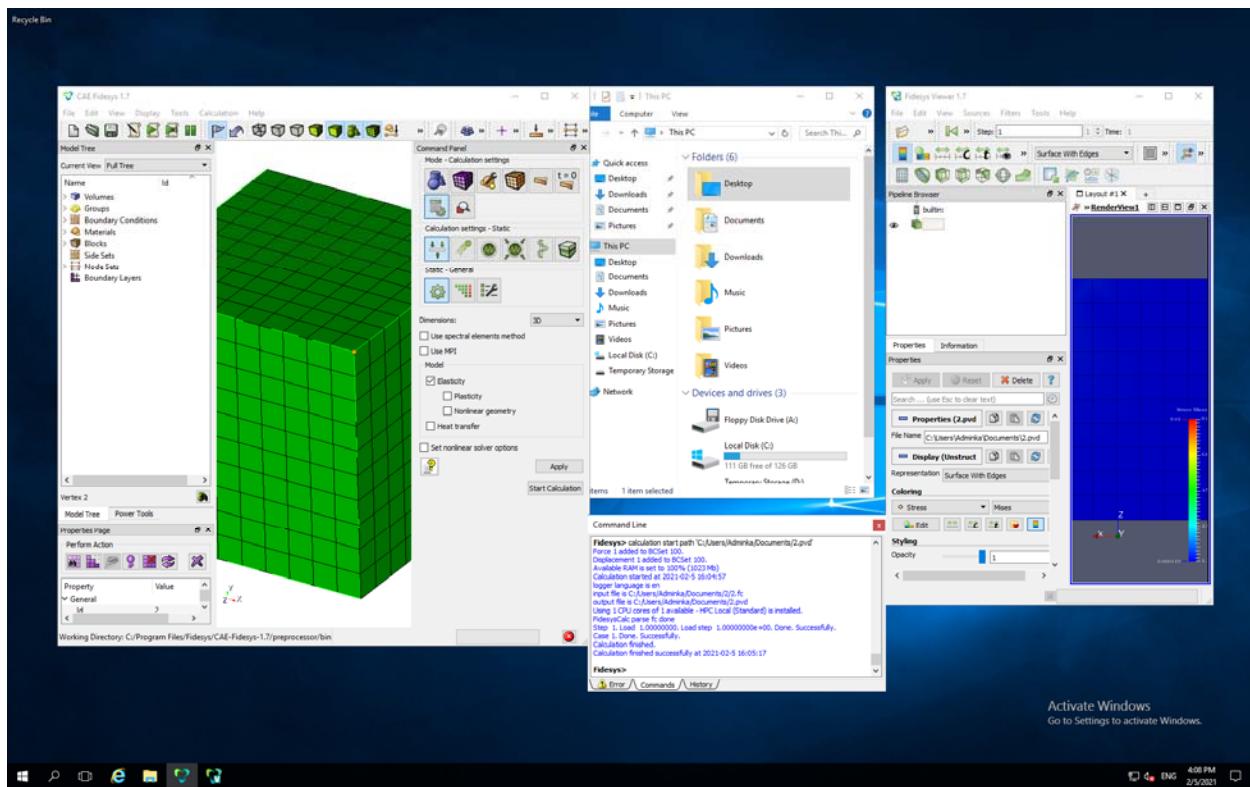


Рисунок 3.6 – Работа с программой ФИДЕСИС на виртуальной машине в облаке

Постпроцессор программы ФИДЕСИС позволяет вывести в текстовый файл информацию о компонентах тензора напряжений вместе с пространственными координатами расчетных узлов. Сформированный текстовый файл с расчетными результатами может быть прочитан разработанным нами постпроцессорным модулем; содержащаяся в нем информация позволяет после обработки количественно оценить размер дефектной зоны в хрупком материале.

3.3 Автономный программный модуль для постпроцессорной обработки расчетных напряжений

В рамках решаемых в данной работе задач принципиальным недостатком конечно-элементного анализа напряжений и разрушений в хрупком материале средствами постпроцессора ANSYS является невозможность построить и визуализировать изостаты (траектории) напряжений, поскольку отсутствует соответствующий инструментарий обработки расчетных данных. Поэтому нами на языке программирования C++ написан постпро-

цессорный модуль для чтения и обработки расчетных результатов, который организован в виде автономной программы и помогает анализировать расчетные данные в текстовом формате от различных программ САЕ, включая ANSYS и ФИДЕСИС. В качестве примера выполнения постпроцессорной обработки данных на рисунке 3.7 представлены графически результаты расчета нормальных и тангенциальных напряжений в сечении пластины при силовом воздействии. Расчет выполнен решателем программы САЕ ФИДЕСИС, установленной в облаке. Визуализация распределения внутренних напряжений в сечении пластины выполнена посредством автономной постпроцессорной обработки текстового файла, содержащего расчетные данные в 6535 узлах конечно-элементной сетки.

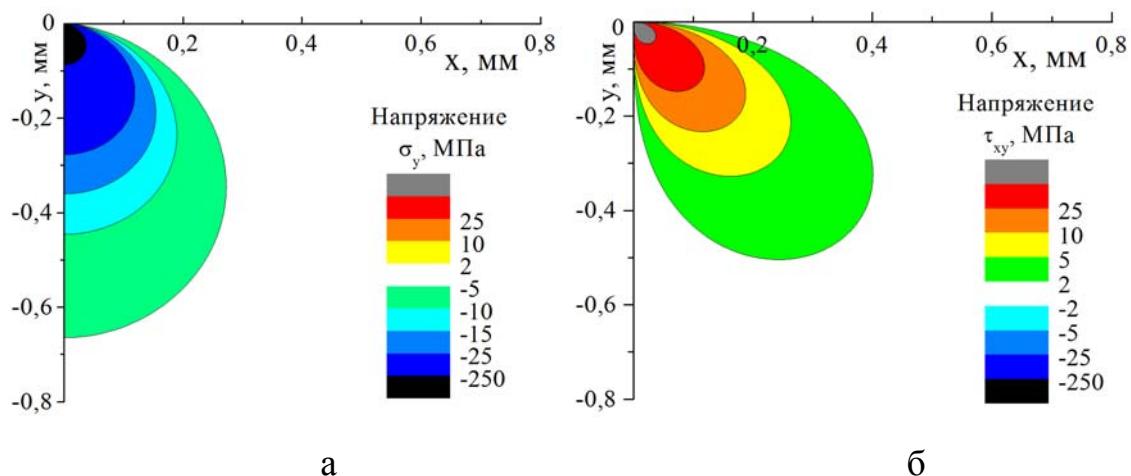


Рисунок 3.7 – Расчетные напряжения в сечении пластины из хрупкого материала под действием приложенной силы:

а – нормальные, б – тангенциальные

На рисунке 3.8 показан результат автономной постпроцессорной обработки расчетных результатов программы ANSYS написанным нами постпроцессорным модулем; векторами представлены касательные напряжения в расчетных узлах сетки для пластины толщиной 0.4 мм при воздействии силой 1 Н. Постпроцессорный модуль читает координаты расчетных узлов и вычисленные напряжения в декартовой системе координат, далее преобразует напряжения из декартовой в полярную систему координат и представляет указанные пользователем напряжения векторами.

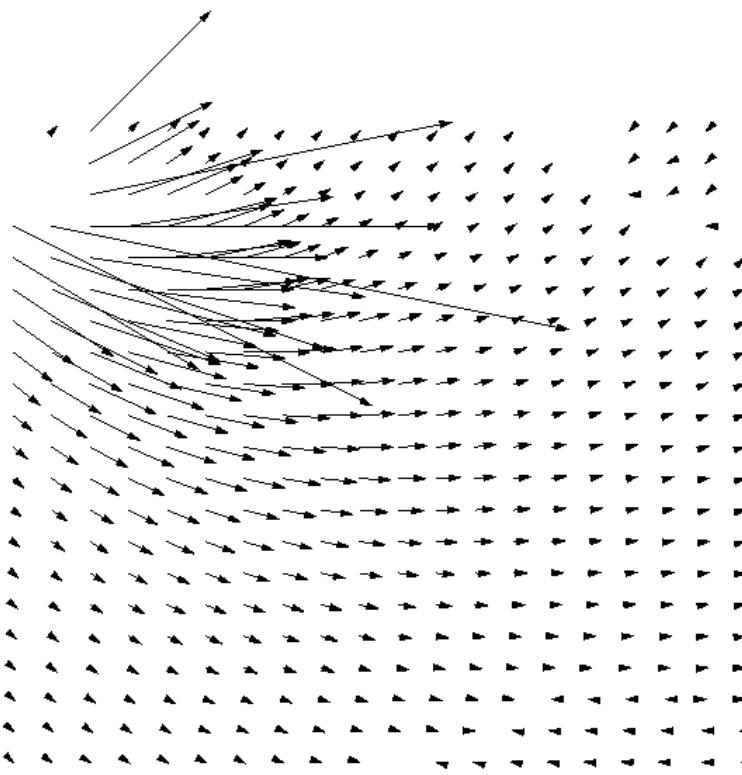


Рисунок 3.8 – Результат постпроцессорной обработки расчетных результатов, представляющей векторами касательные напряжения

Как средство автоматизации проектирования программа может работать с текстовым файлом без выполнения графических построений: читает текст, в котором построчно представлены напряжения в расчетных узлах; вычисляет максимальное касательное напряжение в каждом узле; выбирает строки, в которых величина первого главного напряжения и максимального касательного напряжения превышает критические значения; в выделенном массиве находит и выводит максимальные по модулю значения координаты Y, которые характеризуют ширину дефектной зоны.

Таким образом, разработанный нами постпроцессорный модуль совместно с параметрической компьютерной моделью и скриптовыми программами, выполняющими препроцессорную подготовку модели в автоматическом режиме, позволяет автоматизировать анализ дефектной зоны в хрупком материале на конечно-элементной сетке. Конечно-элементное моделирование эффектов дефектообразования в хрупком материале выполняется для выявления, количественной оценки и визуализации поверх-

ностных и подповерхностных дефектов обработанного материала на стадии технологической подготовки процессов механической обработки.

3.4 Выбор средств интеграции ресурсов САЕ/САМ в распределенной системе автоматизированного проектирования

Интеграцию программ САЕ/САМ для решения задач автоматизации проектирования технологических процессов механической обработки хрупких материалов можно выполнить на базе отечественных программных комплексов. В данной работе для выполнения расчетов на удаленном суперкомпьютере и технологической подготовки процессов механической обработки на персональном компьютере использованы программы от разных разработчиков – САЕ ФИДЕСИС и САМ АДЕМ.

Горизонтальной и вертикальной интеграции информационных систем между участниками распределенной проектно-производственной системы интеграции способствуют доступные облачные сервисы. Облако проектно-производственной системы состоит из серверов, клиентских и промышленных компьютеров, которые связаны между собой и обмениваются информацией через глобальные и локальные сети, используя протоколы обмена данными. Применение облачных технологий в парадигме распределенного цифрового производства можно разделить на две области – облачные вычисления в промышленности и облачные производственные системы. Использование облачных технологий экономически наиболее выгодно для малых и средних предприятий, поскольку дает доступ к дорогостоящим услугам по мере возникновения проектных задач с более низкими барьерами входа и начальными инвестициями. При этом исследовательские, программные или веб-производственные приложения развертываются в вычислительном облаке. В данной работе акцент сделан на ключевом ресурсе распределенной проектно-производственной системы – на программном обеспечении для проектирования и подготовки производства.

Территориально-распределенная проектно-производственная система интегрирует информационные, организационные и кибер-физические ресурсы, в том числе, единицы автоматизированного и роботизированного технологического оборудования, территориально удаленные от рабочих мест проектировщиков [106, 107]. Схема передачи информации в такой системе показана на рисунке 3.9.

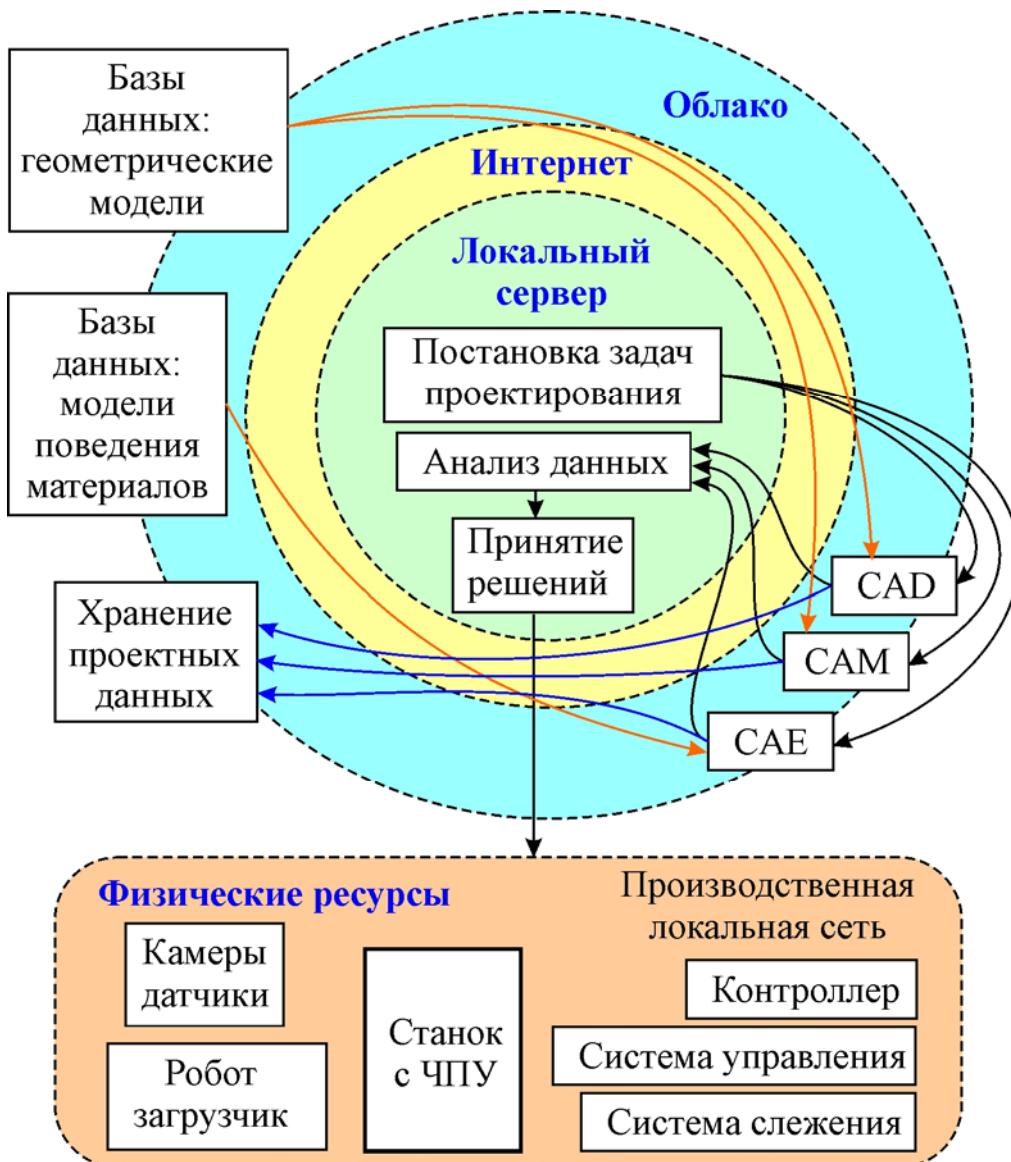


Рисунок 3.9 – Информационная схема облачной
проектно-производственной системы

На схеме представлен пользователь облачных сервисов и удаленного оборудования, который использует персональный компьютер (локальный сервер) для организации процессов в облаке и может выполнять технологическую подготовку производства, а также контролировать и конфигури-

ровать удаленную производственную подсистему. Вовлеченные объекты расположены на трех организационных уровнях: физические ресурсы объединены в производственную сеть, системы автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства организованы в облаке, ядро управления расположено на локальном сервере.

Важной составной частью облачной проектно-производственной системы является автоматизированное проектирование и технологическая подготовка производства. Облачное проектирование поддерживается специальной архитектурой программного обеспечения CAD/CAE/CAM, при использовании которой основной массив данных о проекте и действия по развитию разрабатываемых компьютерных моделей расположены на удаленных серверах (в облаке), а клиентские устройства, с которыми непосредственно работают пользователи, запрашивают ту или иную часть данных, лицензионных сервисов или результатов моделирования по сети через интернет. Архитектура подобных систем оказывается разделённой на серверную и клиентскую части.

Отличие облачных систем проектирования от общепринятой корпоративной практики работы в локальной сети конструкторского или технологического бюро на предприятии заключается в том, что в случае использования облачных сервисов большинство ресурсоемких вычислительных операций производится на удаленных серверах, а не на клиентских устройствах; соответственно, проектировщику передается небольшая часть данных для визуализации модели и ее параметров. Облачные технологии формируют проектную среду, в которой объединяются лицензионное программное обеспечение, вычислительные ресурсы в расчетном обосновании проектов, базы знаний и инженерные ресурсы. С точки зрения коммуникации одной из важных решаемых задач облачных технологий в области инженерного проектирования является создание эффективных сред управления проектом, правил и потоков передачи данных. В процессе реализации облачного проектирования и управления удаленным оборудованием важ-

ными становятся вопросы подключения в глобальную сеть (Wide Area Network – WAN) и безопасности передаваемых данных. При этом локальная сеть (Local Area Network – LAN) имеет такие преимущества, как стабильность и высокая скорость обмена данными [108].

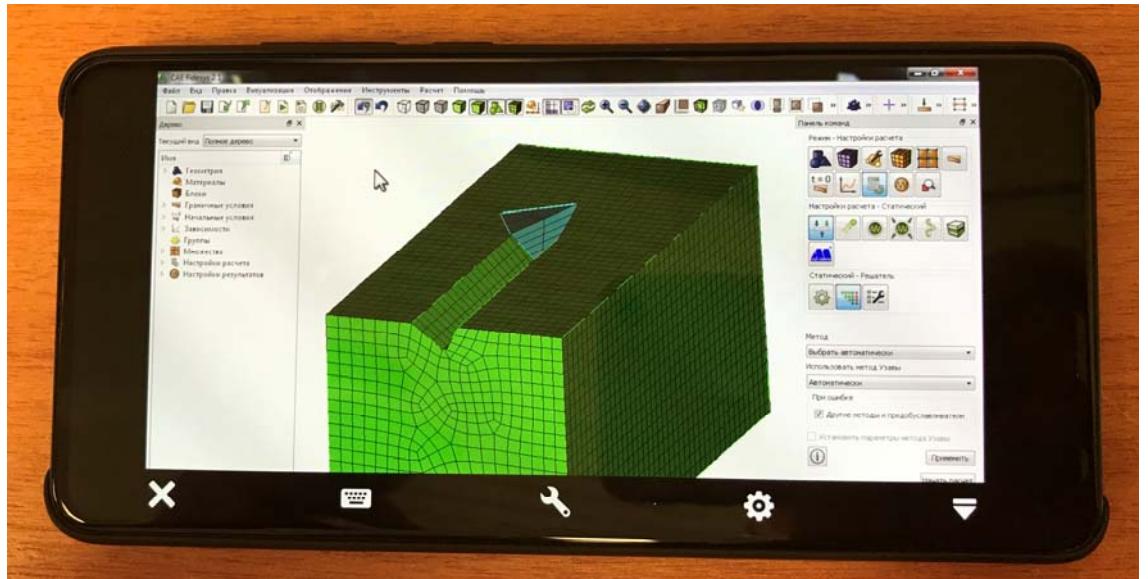
Алгоритм автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства с использованием облачных сервисов представлен на рисунке 3.10. В соответствии с представленным алгоритмом работу по технологической подготовке производства можно вести удаленно, в частности, с мобильного телефона, обращаясь через Интернет к серверам с установленными лицензионными программами.

Реализация алгоритма автоматизированного проектирования и технологической подготовки с использованием облачных сервисов проиллюстрирована на рисунке 3.11 для случая работы с мобильного телефона. 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, выполняет построения CAD геометрии заготовки в виде пластины и инструмента в параметрическом виде, производит расчет напряжений.

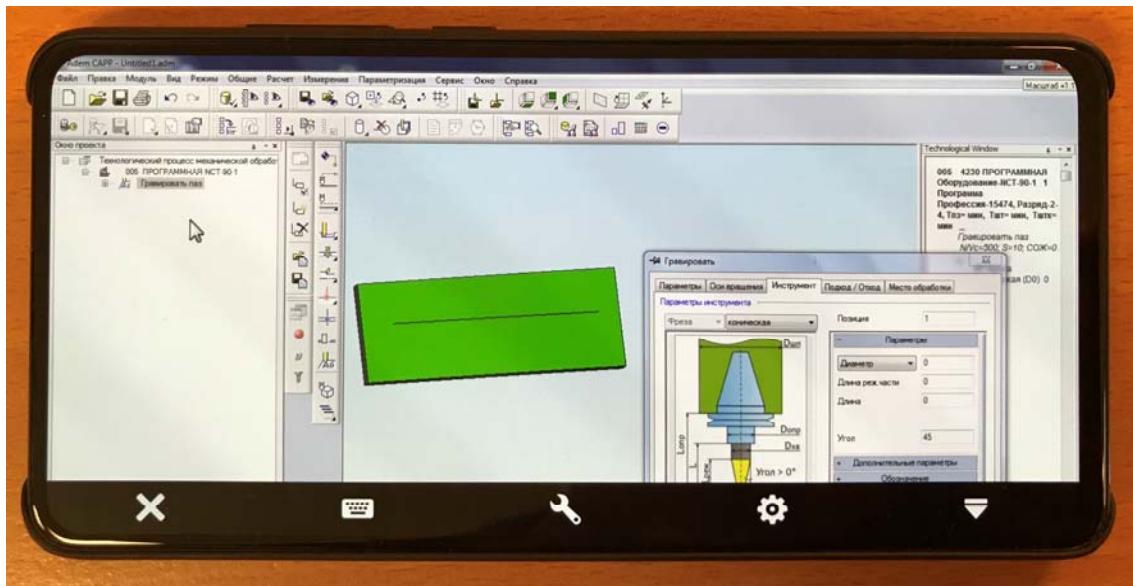
Анализ расчетных напряжений позволяет выбрать технологические параметры процесса. Используя полученные данные, технолог запускает на другом удаленном компьютере программу АДЕМ и создаёт управляющую программу. Далее созданная программа передается на производственный участок для управления станком и выполнения технологического процесса. Предлагаемая структура распределенной облачной проектно-производственной системы не содержит принципиальных ограничений по типу технологий механической обработки и станочного оборудования.



Рисунок 3.10 – Алгоритм автоматизированного проектирования и технологической подготовки с использованием облачных сервисов



а



б

Рисунок 3.11 – Иллюстрация удаленной работы с мобильного телефона по компьютерному моделированию процесса резания (а) и подготовке программы для станка с ЧПУ (б)

Выбор программных средств для удаленного доступа к лицензионному серверу. Проектная работа в лицензионной программе САПР/АСТПП на удаленном компьютере (лицензионный сервер) с мобильного устройства или персонального компьютера (клиент, клиентский компьютер) осуществляется через программу TeamViewer, установленную на обоих устройствах. Оба устройства должны быть подключены к глобальной сети. TeamViewer является программным средством удаленного доступа и сетевого управления информационными системами. Совместимость програм-

мы TeamViewer с различными операционными системами в сравнении с аналогами показана в приложении П3, где программы упорядочены сверху вниз в соответствии с количеством поддерживаемых систем. Анализ данных показывает, что программа TeamViewer совместима с наибольшим количеством клиентских и серверных вариантов работы, способна поддерживать и объединить в проектной работе разные по структуре устройства, поэтому выбрана для решения поставленных в данной работе задач по автоматизации проектирования в облаке.

После создания администратором дополнительной учетной записи, передачи пользователю идентификатора и пароля устанавливается виртуальный мост, и на дисплее смартфона отображается интерфейс рабочего стола. Далее пользователь может перемещать курсор по рабочему столу удаленного компьютера, открывать программы и файлы. Таким образом, смартфон выполняет функции терминала удаленного доступа, и работа с инженерной программой САПР/АСТПП производится в бесшовном режиме, без переподключения.

К моменту начала работы с программой САПР/АСТПП программа TeamViewer на удаленном компьютере должна иметь установленное idle-соединение (без текущей передачи данных, в режиме ожидания) с управляющими прокси-серверами разработчика TeamViewer (основной сервер) и ждать запросов на соединение. После получения ответа от прокси-серверов устанавливается прямое UDP-соединение. UDP (User Datagram Protocol) – протокол без сохранения состояния; это означает, что пакеты данных отправляются по месту назначения без проверки на уровне протокола; отправляющая программа не проверяет, что отправленные данные были получены или достигли пункта назначения.

Осложняющим элементом обмена данными являются межсетевые экраны. Межсетевые экраны (файервол, брандмауэр) предназначены для поиска пакетов UDP, записи источника и получателя, а также отметки времени. Если межсетевые экраны видят входящий пакет, который соответст-

вует исходящему пакету, они, как правило, пропускают пакет, даже если в список доступа брандмауэра не помещено определенное правило. Функция автоматического пропускания может быть заблокирована на устройствах корпоративного уровня, но, как правило, 90% брандмауэров разрешают возврат трафика.

Чтобы пройти препятствие в виде файервола, клиентский компьютер имеет TCP-соединение с основным сервером TeamViewer. TCP (Transmission Control Protocol) – это протокол, который в отличие от UDP, обеспечивает целостность передаваемых данных и уведомление отправителя о факте получения данных. Лицензионный сервер также имеет TCP-соединение с основным сервером TeamViewer. При нажатии пользователем кнопки «Подключиться» в интерфейсе программы TeamViewer клиентский компьютер сообщает основному серверу о своем намерении установить соединение с лицензионным сервером. Основной сервер выдает программе TeamViewer на лицензионном сервере IP-адрес клиентского компьютера. Клиентский компьютер начинает запускать UDP-пакеты через основной сервер на лицензионный сервер.

Схема передачи информации для реализованного алгоритма интеграции автоматизированного проектирования и технологической подготовки с использованием облачных сервисов в распределенной проектно-производственной среде представлена на рисунке 3.12. В данной работе решена задача о стыковке программы САМ на производственном участке с программой САЕ на удаленной расчетной станции (суперкомпьютере). На схеме ведущим оператором автоматизированной проектно-производственной работы в рассматриваемой распределенной системе цифрового производства является технолог. На рабочем компьютере технолога установлена программа CAD/CAM АДЕМ. Технолог имеет возможность в программном модуле САД АДЕМ создать трехмерную модель заготовки и рабочей части режущего инструменте таким образом, что они находятся в контакте. Геометрический файл создается во внутреннем фор-

мате АДЕМ и может быть сохранен для трансляции в универсальных редактируемых форматах *.STEP, *.IGS, *.X_T, *.SAT.

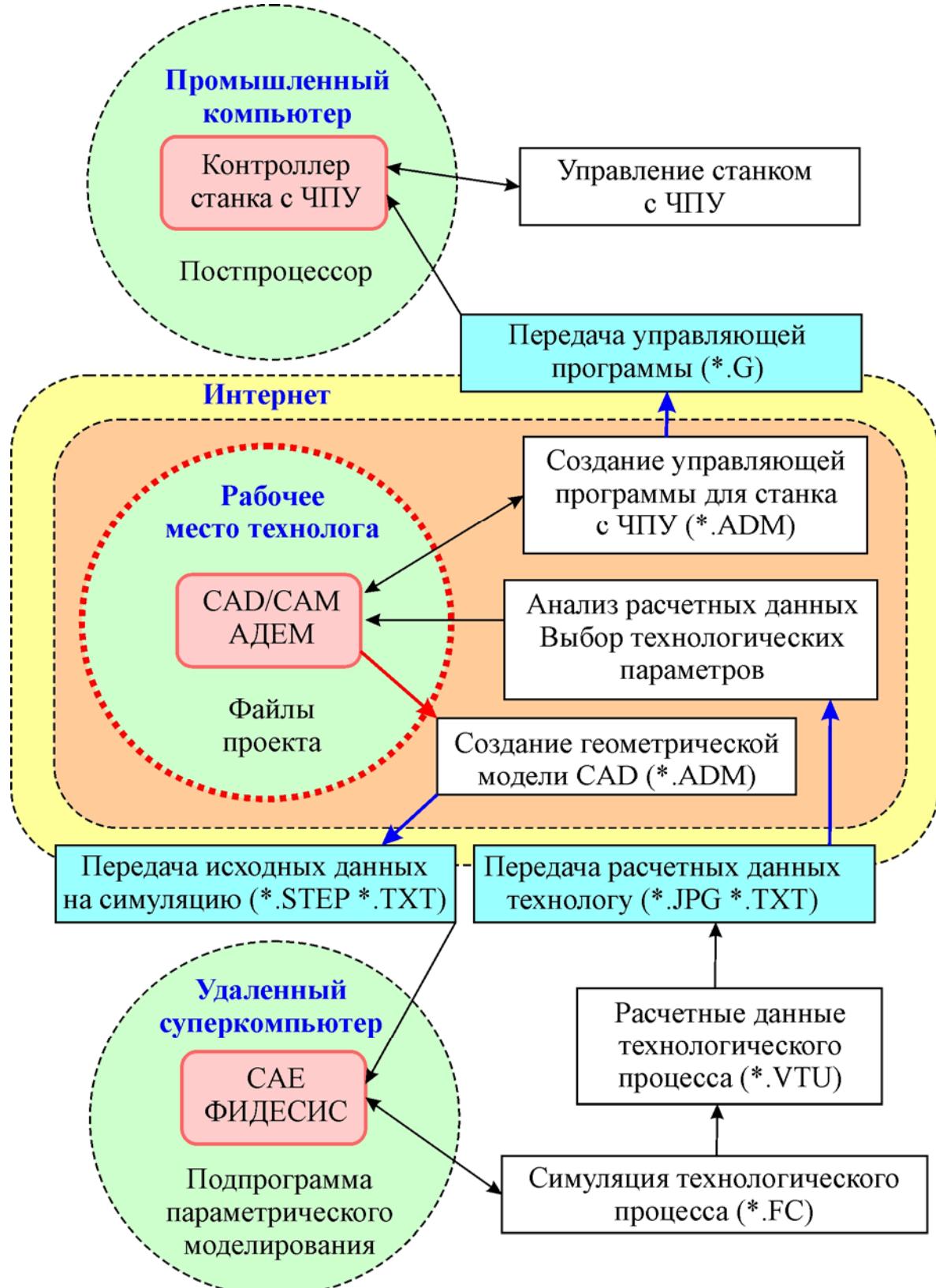


Рисунок 3.12 – Схема передачи информации в распределенной проектно-производственной системе

Далее технолог связывается через Интернет с удаленным компьютером (суперкомпьютером), на котором установлена программа САЕ. Программа САЕ ФИДЕСИС принимает внешние геометрические данные в форматах *.STEP, *.TXT. Наше тестирование показало, что наиболее устойчивым форматом передачи исходных геометрических данных из CAD/CAM АДЕМ в САЕ ФИДЕСИС является формат файлов *.STEP. В случае простых линейных построений геометрия может быть создана средствами препроцессора программы САЕ.

Для интеграции проектных процессов компьютерного моделирования САЕ и технологической подготовки САМ, которые локализованы на разных по мощности и структуре компьютерах и ориентированы на разную специализацию программного обеспечения, в облаке построен сервис, который включает WEB-сервера. Сервер HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) состоит из страницы HTML (Hyper Text Markup Language) и модулей CGI (Common Gateway Interface). HTML страница позволяет отобразить результаты симуляции технологического процесса. CGI модуль представляет собой набор скриптов CGI, предназначенных для обмена данными с HTTP сервером.

3.5 Выводы по главе 3

1. Разработан метод интеграции российских ресурсов САЕ/САМ (САЕ ФИДЕСИС и САМ АДЕМ) от разных разработчиков в облаке в парадигме распределенной проектно-производственной среды. 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.

2. 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.

3. Разработаны программные модули на алгоритмических языках программирования APDL и APREPRO для параметрического моделирования технологических процессов механической обработки хрупких материалов и расчета напряженно-деформированных состояний в среде САЕ ANSYS и САЕ ФИДЕСИС. Разработанные программы оформлены в виде пакетных текстовых файлов и, как средства автоматизации проектирования, исключают из оплаченного времени пользования облачными сервисами этап ручной подготовки модели в интерфейсе программы САЕ в интерактивном режиме.

4. Разработан постпроцессорный программный модуль на языке C++ для обработки текстовых файлов с результатами расчета напряжений и для оценки размеров дефектной зоны в хрупком материале при силовом воздействии режущего инструмента.

ГЛАВА 4. ВЕРИФИКАЦИЯ И АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ АЛМАЗНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

В четвертой главе показаны результаты применения разработанных средств компьютерного инженерного анализа для проверки компьютерной модели резания хрупких материалов с использованием экспериментальных данных. В натурных и вычислительных экспериментах исследованы технологические процессы скрайбирования приборных пластин из монокристаллического кремния и гравирования стекла, которые выполняются алмазным инструментом. Разработанные программные модули при этом решают задачу об оценке дефектного слоя в локальной зоне силового воздействия режущего инструмента на пластину из хрупкого материала с использованием сформированной инфраструктуры автоматизированного проектирования САЕ/САМ в распределенной системе.

4.1 Верификация разработанной компьютерной модели для технологии скрайбирования кремниевой пластины

Механическая обработка хрупких материалов в данной работе представлена технологией алмазного скрайбирования, применяемой в электронной индустрии для разделения пластин на готовые приборы. В целом технологический процесс разделения приборной пластины на кристаллы выполняется в два этапа. На первом этапе на поверхность пластины алмазным резцом наносится система рисок с шагом, соответствующим габаритным размерам кристаллов. Риски на поверхности пластины являются областями ее локального разупрочнения. На втором этапе производится разделение пластины на кристаллы под действием приложенных перпендикулярно рискам растягивающих усилий. Способ алмазного скрайбирования применяется также в строительной индустрии для резки пластин из стекла, где также предъявляются высокие требования к качеству обработанной

поверхности кромок. Результат скрайбирования оценивается по двум критериям: создание вдоль риски минимального дефектного слоя и обеспечение надежного разделения пластины. Скрайбирование пластины можно выполнять одной или двумя гранями инструмента с прямолинейными режущими кромками в зависимости от пространственной ориентации.

Для скрайбирования и разделения пластин используют резцы от зарубежных производителей из природных и синтетических алмазов, режущая часть которых затачивается различным образом в зависимости от толщины пластин и твердости обрабатываемого материала (рисунок 4.1).

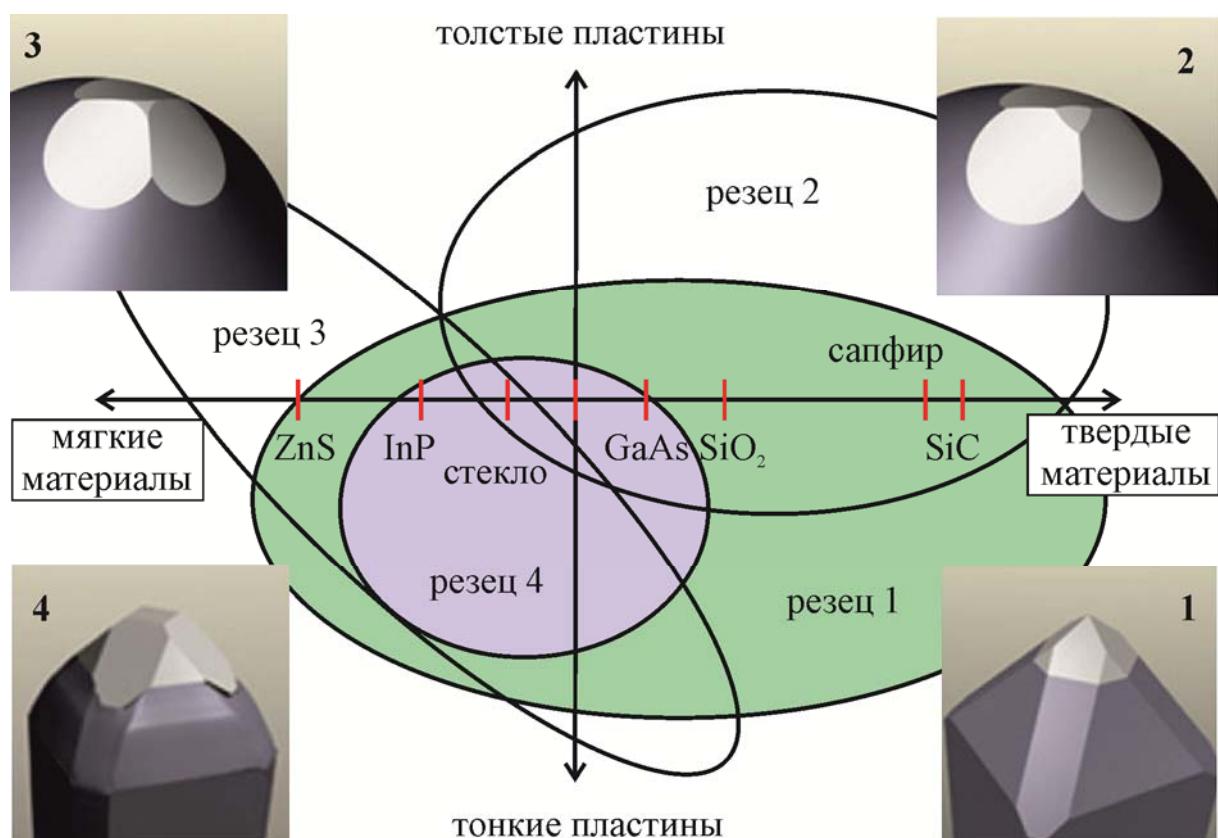


Рисунок 4.1 – Применение вариантов заточки алмазного инструмента для скрайбирования пластин из хрупких материалов (зарубежные инструменты)

Особенностью технических алмазов является относительно низкая температуростойкость (около 650°C) при высокой теплопроводности (900 Вт/(м·К)). Теплота, выделяющаяся в процессе резания на контактирующих с трением поверхностях алмазного резца, отводится вглубь алмаза, и температура на рабочих поверхностях остается невысокой. Крайне

низкое значение температурного коэффициента линейного расширения ($1.1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$) дает дополнительные преимущества алмазному инструменту в высокоточной лезвийной обработке.

Для резки полупроводниковых, диэлектрических и других неметаллических материалов используют резцы алмазные для скрайбирования по ОСТ 2-И77-1-85 (рисунок 4.2) с рабочей частью в виде трехгранной или четырехгранной пирамиды.

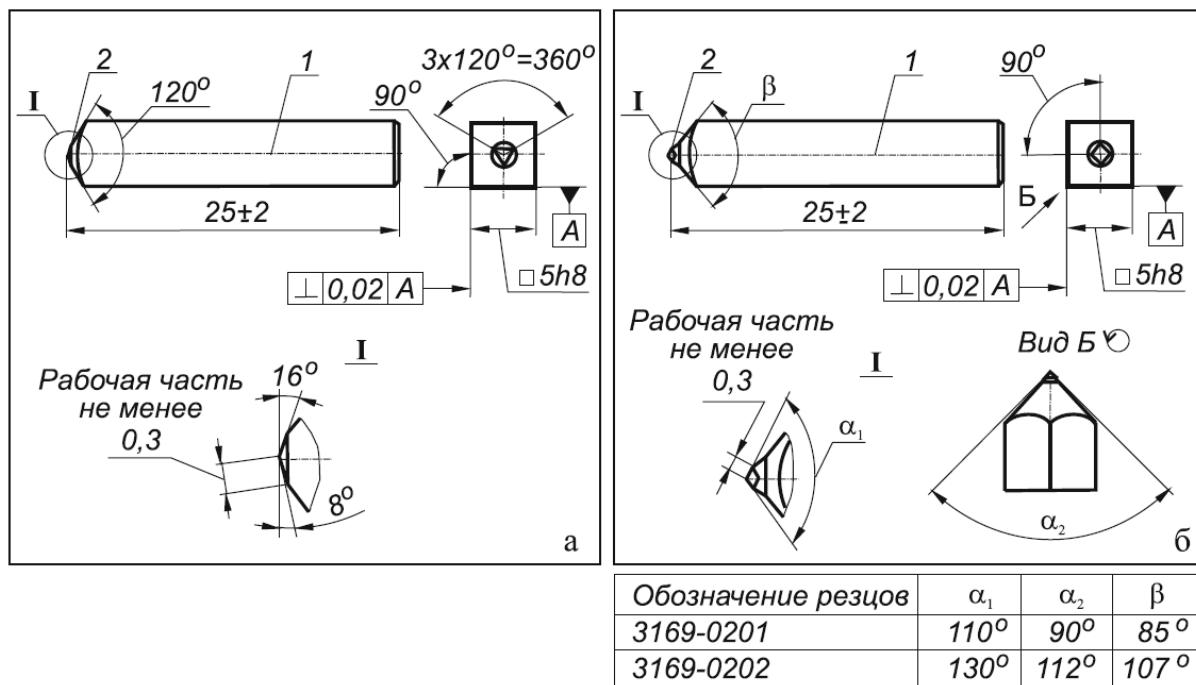


Рисунок 4.2 – Резцы алмазные с рабочей частью в виде трехгранной (а)

и четырехгранной (б) пирамиды;

1 – державка, 2 – алмаз (отечественные инструменты)

Разработанные в данной работе программные модули для параметрического моделирования разрешают построение геометрии всего спектра алмазных инструментов, применяемых в технологических операциях скрайбирования. С использованием разработанных средств выполнено компьютерное моделирование силового воздействия алмазного инструмента на пластину из кремниевой керамики, которое позволяет выявить основные закономерности влияния различных факторов на распределение напряжений в пластине.

В вычислительном эксперименте исследовано влияние геометрии режущей части инструмента при нажимном воздействии на уровень напряжений в пластине. По оси Z к инструменту приложена нормальная сила величиной 1 Н. Сравнению подвергнуты конус, трехгранная пирамида и четырехгранная пирамида с одинаковой величиной внутреннего угла 120° [109]. Изменение нормированной интенсивности напряжений вычислено по направлению вглубь кремниевой пластины от вершины резца и на поверхности по нормали к траектории движения инструмента, соответствующие кривые зависимости параметров внутренних напряжений в пластине представлены графиками на рисунке 4.3.

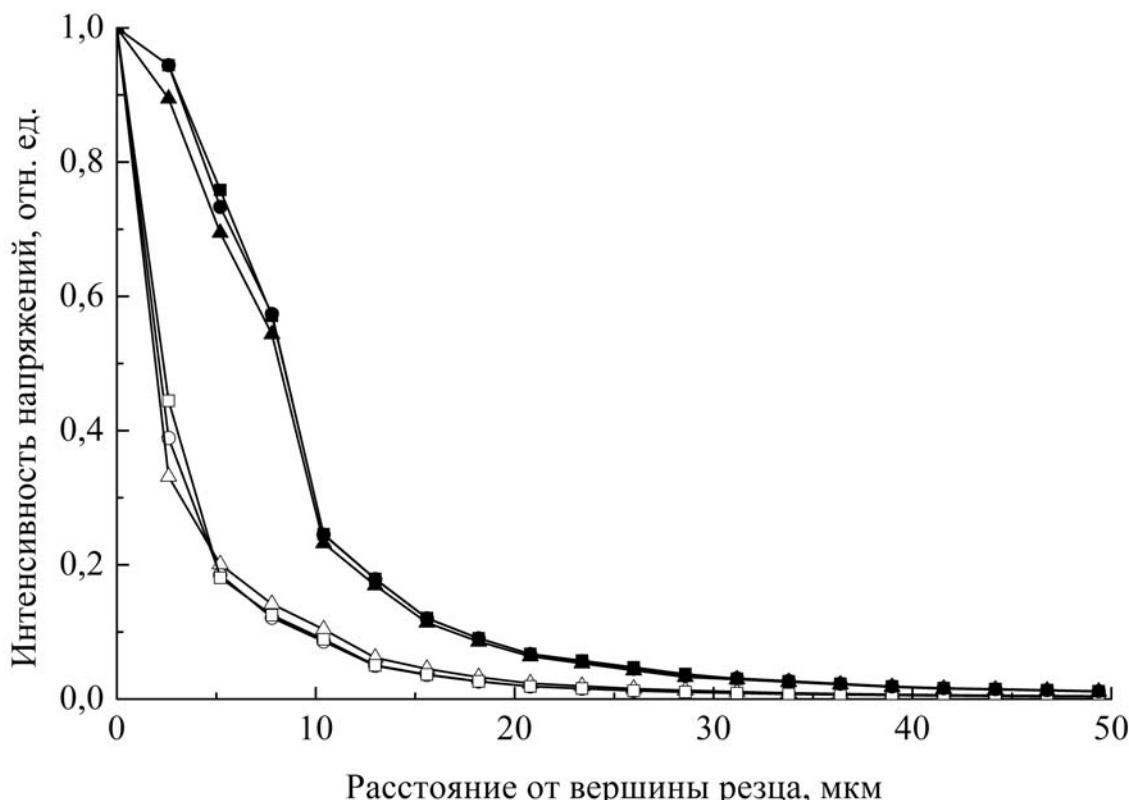


Рисунок 4.3 – Падение нормированной интенсивности напряжений в кремниевой пластине от точки контакта с вершиной резца: вглубь пластины по вертикали (ось Z) (• ■ ▲) и в тангенциальном направлении (ось Y) (○ □ Δ); для формы резца – конус (○ •), трехгранная пирамида (Δ ▲), четырехгранная пирамида (□ ■)

Согласно расчетным графикам, интенсивность напряжений в пластине остается высокой на расстоянии до 15 мкм от вершины резца и падает по оси Z менее резко, чем по оси Y. Следует отметить более интенсивное падение напряжений в направлении, определяющем ширину дефектной зоны, в случае силового воздействия на поверхность инструментом с геометрией трехгранной пирамиды.

Широко применяемый в измерительных приборах индентор – пирамидка Берковича – представляет собой трехгранную алмазную пирамиду. Пирамидка Берковича имеет большой внутренний угол – 142.3 градуса, что минимизирует влияние трения. Огранка алмаза производится таким образом, чтобы режущие ребра резца выходили на плоскости плотной упаковки {111}, это повышает стойкость инструмента.

Изображение риски, нанесенной на поверхность монокристаллического кремния индентором Берковича, и негладкие профилограммы, представленные на рисунке 4.4, показывают дефекты на поверхности и ширину дефектной зоны вдоль риски. Существенными поверхностными дефектами являются радиальные трещины и сколы.

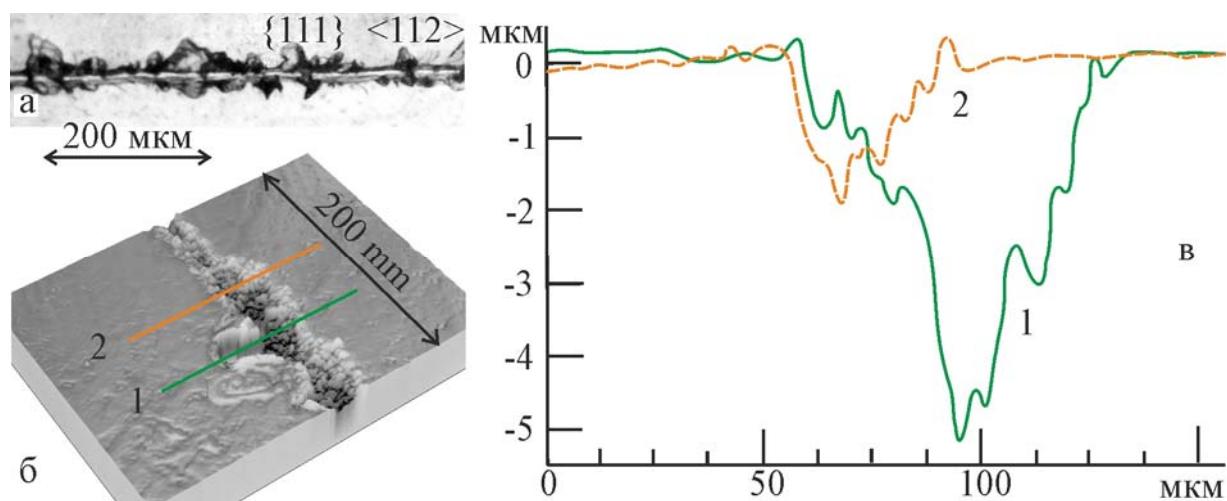


Рисунок 4.4 – Плоское (а) и объемное (б) изображение риски, нанесенной на поверхность {111} монокристаллической пластины кремния в направлении <112>, и профили риски в нормальном сечении (в)

Результаты компьютерного моделирования процессов скрайбирования монокристаллического кремния алмазным индентором с геометрией

пирамидки Берковича, согласуются с экспериментальными данными [110, 111]. Глубина риски составляет 5 мкм, ширина риски – 20 мкм, ширина дефектной зоны – до 80 мкм.

В компьютерном моделировании процессов скрайбирования поле напряжений можно представить осесимметричной моделью, как предложено Е. Иоффе [112, 113], рассматривая эквивалентное воздействие алмазного конуса с заданным внутренним углом на пластину из твердого, хрупкого материала. С использованием разработанных программных модулей выполнено компьютерное моделирование локальной зоны силового воздействия алмазного конического гравера на кремниевую пластину, исследовано влияние внутреннего угла режущего инструмента на уровень напряжений в заготовке. Напряжения в кремниевой пластине существенно зависят от внутреннего угла конического алмазного резца (рисунок 4.5): чем меньше угол, тем выше интенсивность напряжений.

В соответствии с проведенным вычислительным экспериментом (рисунок 2.9) по воздействию конического гравера на заготовку в устоявшемся процессе движения режущего инструмента с малой скоростью выполнен натурный эксперимент. На фрезерном станке ROLAND MODEL A MDX-40A коническим гравером ZDC-A2000 (рисунок 4.6) с различной глубиной и скоростью резания нанесены риски на поверхность поликристаллических кремниевых пластин и монокристаллических пластин {100} в кристаллографическом направлении <110> (рисунок 4.7).

Использованные в компьютерном моделировании свойства монокристаллического кремния приведены в приложении 4, где кратко описана методика подготовки свойств монокристаллического кремния для компьютерного моделирования приборных пластин.

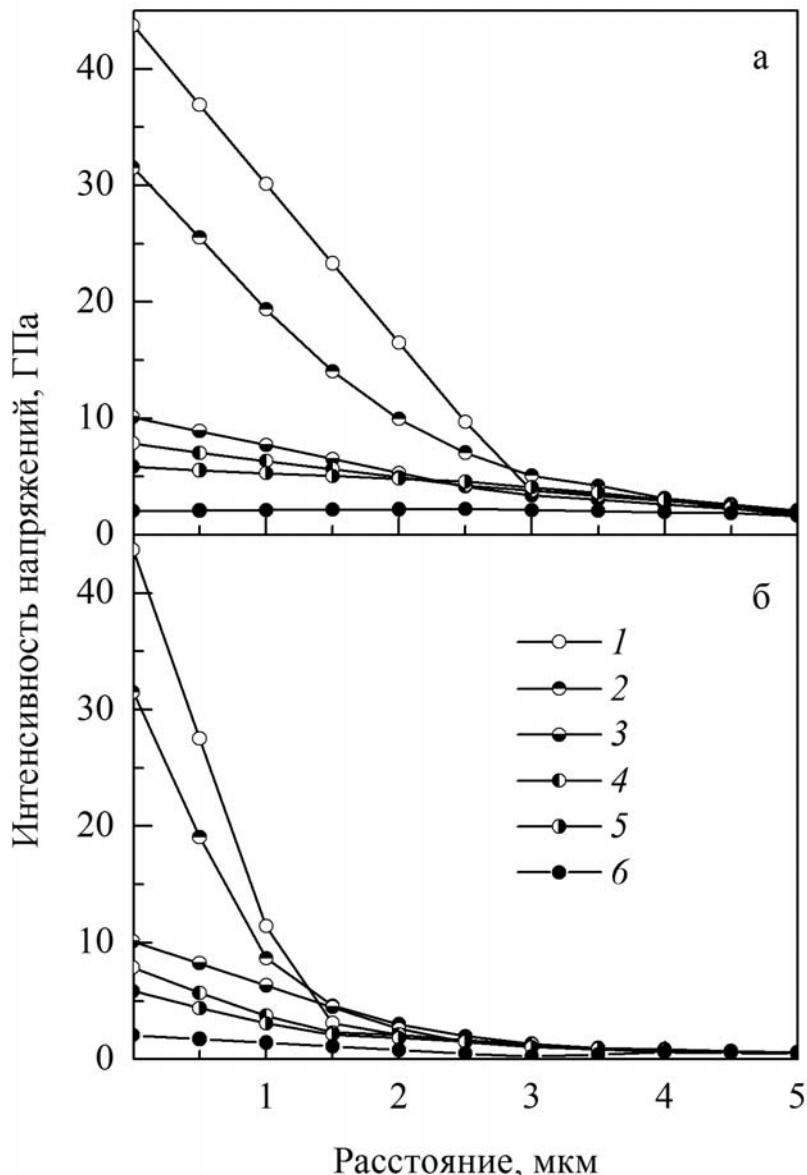


Рисунок 4.5 – Падение интенсивности напряжений в пластине от точки контакта с вершиной конического резца: вглубь кристалла по вертикали (ось Z) (а) и в тангенциальном направлении (ось Y) (б); для внутреннего угла конуса в градусах – 40 (1), 60 (2), 80 (3), 100 (4), 120 (5), 140 (6)

Для экспериментального наблюдения рисок в данной работе использованы методы конфокальной микроскопии, позволяющие изучать поверхность пластины с высоким разрешением (± 0.2 мкм), а также структуры, находящиеся на глубине до нескольких миллиметров ниже поверхности пластины.

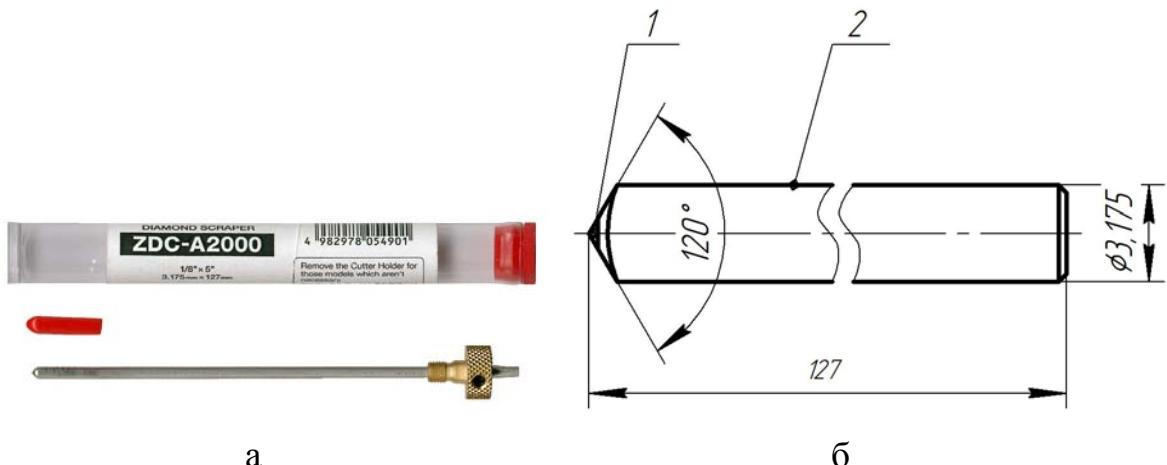


Рисунок 4.6 – Алмазный гравер (а) и его геометрия (б):

1 – алмаз, 2 – державка

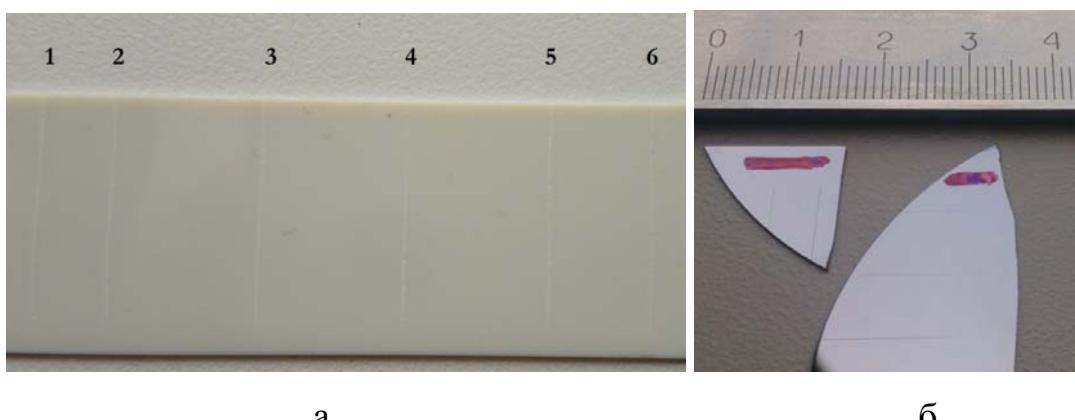


Рисунок 4.7 – Пластины поликристаллического (а) и монокристаллического (б) кремния с нанесёнными рисками; красным цветом отмечено кристаллографическое направление $<110>$

Использованный микроскоп AXIO LSM 710 имеет уникальную оптическую схему и систему детектирования для измерения и автоматической статистической обработки геометрических параметров наблюдаемых объектов. Специализированная программа Carl Zeiss Axio создает из пакета оптических сечений объемное изображение объекта.

Оптическое изображение риски, нанесенной на поверхность монокристаллического кремния алмазным коническим инструментом с внутренним углом при вершине 120° , и сопутствующие дефекты показаны на рисунке 4.8. Плоское и объемное изображение риски, нанесенной алмазным коническим гравером с углом при вершине 120° на поверхность

пластины из монокристаллического кремния показано на рисунке 4.9. Ширина дефектной зоны на поверхности соответствует длине радиальных трещин, которые инициируют образование сколов.

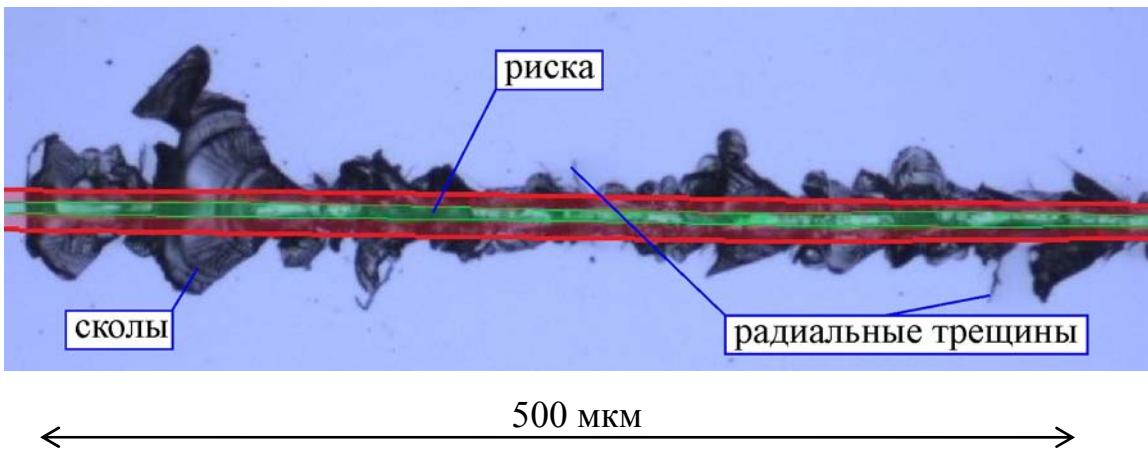


Рисунок 4.8 – Оптическое изображение пластины кремния
после обработки коническим алмазным инструментом

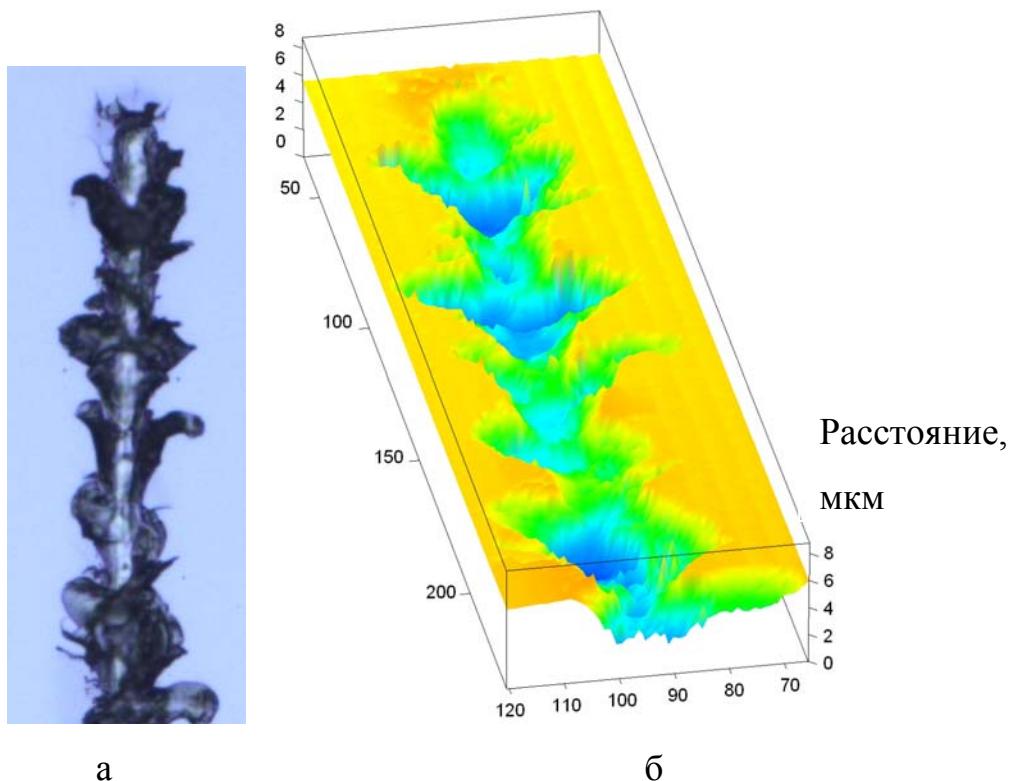


Рисунок 4.9 – Плоское (а) и объемное (б) изображение риски
на поверхности монокристаллической кремниевой пластины

В отличие от представленных в литературных источниках данных по наноиндентированию и склерометрии хрупких материалов, когда при дви-

жении индентора с малой скоростью вдоль риски нанометровых размеров формируется и исследуется зона пластической деформации [113], которая ограничена полуцилиндрической поверхностью диаметром, равным ширине риски, в случае технологических процессов скрайбирования глубина риски больше и более существенными оказываются эффекты образования дефектов под действием упругих напряжений и сдвиговых деформаций.

Темнопольное изображение риски, нанесенной ребром четырехгранного инструмента в кристаллографическом направлении $<112>$ на поверхности монокристаллической кремниевой пластины $\{111\}$, показано на рисунке 4.10. Темнопольное изображение выявляет подповерхностные дефекты вдоль линии скрайбирования [115].



Рисунок 4.10 – Темнопольное изображение риски на поверхности
кремниевой пластины

Анализ наблюдаемых дефектов вдоль линии скрайбирования подтверждает теоретические подходы к моделированию технологического процесса по аналогии с технологией обработки токарным резцом. Положение передних поверхностей и режущих кромок при скрайбировании полупроводниковых пластин соответствует теоретической модели косоугольного несвободного резания, причем наиболее неблагоприятному варианту – резанию с большими и отрицательными значениями передних углов для кромок, формирующих стороны риски, и большими положительными значениями углов наклона главных режущих кромок инструмента. Похожими также оказываются вид стружки и механизм ее образования при контакте срезаемого материала с передней поверхностью инструмента.

В случае обработки хрупких материалов при больших толщинах среза и больших передних углах в срезаемом слое появляются напряжения отрыва, происходит вырывание или откалывание крупных частиц материала неправильной формы; образуется стружка надлома. Если увеличить скорость резания образуется элементная стружка. В рамках теоретической модели можно объяснить образование сколов вдоль риски при скрайбировании. Известно, что такое микроразрушение происходит как результат появления больших напряжений сжатия и сдвига в области образования скола и связано с зарождением микротрещин [116]. Большие напряжения сжатия могут образоваться в фасетке скола из-за малой толщины недеформированной фасетки, меньшей, чем радиус вершины резца.

По результатам наблюдений кремниевой пластины после скрайбирования алмазным гравером со скоростью $V = 60$ мм/с на глубину $h = 10$ мкм можно визуально и количественно оценить характеристики повреждения поверхности: глубина и ширина риски, зона пластической деформации, радиальные трещины, сколы (рисунок 4.11).

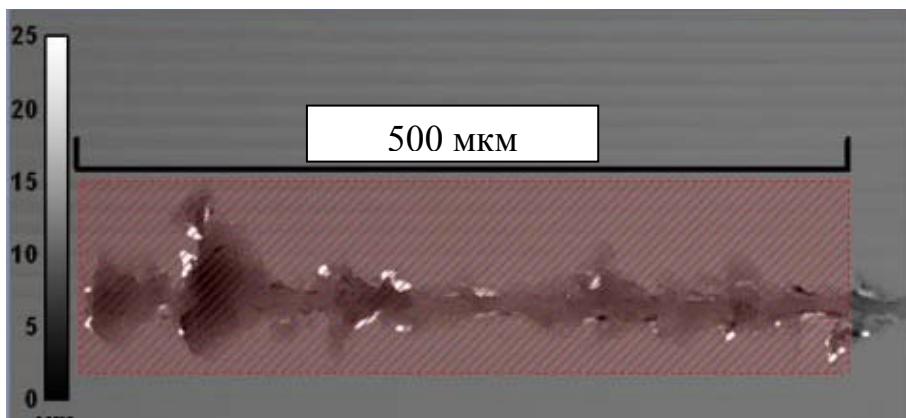


Рисунок 4.11 – Зона анализируемых разрушений на поверхности кремниевой пластины

Площадь анализируемого дефектного слоя $S = 61\ 965$ мкм², ширина дефектного слоя $D = S/500 = 61\ 965/500 \cong 124$ мкм.

Коэффициент асимметричности профиля, отрицательное значение которого указывает на сколы вычислен по формуле:

$$Rsk = \frac{1}{\sqrt{l}} \frac{\int_0^l Z^3(x) dx}{\left(\sqrt{\int_0^l Z^2(x) dx} \right)^3} = -1.006, \quad (4.1)$$

где l – длина профиля $Z(x)$.

Коэффициент остроты выступов профиля, величина которого значительно превышает 3, что подтверждает наличие сколов:

$$Rku = \frac{1}{l^3} \frac{\int_0^l Z^4(x) dx}{\left(\sqrt{\int_0^l Z^2(x) dx} \right)^4} = 177.278, \quad (4.2)$$

где l – длина профиля $Z(x)$.

По результатам обработки профиля вычислены параметры отклонения $Z(x)$ по нормали к поверхности пластины: максимальная высота выступа профиля (от средней линии) $Rp = 8.6$ мкм, максимальная глубина впадин профиля (от средней линии) $Rv = 3.9$ мкм, средняя длина элементов профиля (впадины и выступа) $Rsm = 16.6$ мкм.

Расчетное построение дефектной зоны на поверхности приборной пластины выполнено для единичного акта резания пластины из монокристаллического кремния алмазным инструментом, имеющим у вершины три грани. Реализована схема резания гранью трехгранной пирамиды в соответствии со схемой резания, представленной на рисунках 2.3 – 2.5.

На рисунке 4.12 показаны действующие силы и регулируемые параметры режима резания гранью трехгранной пирамиды: скорость резания V , глубина риски a , угол λ_1 .

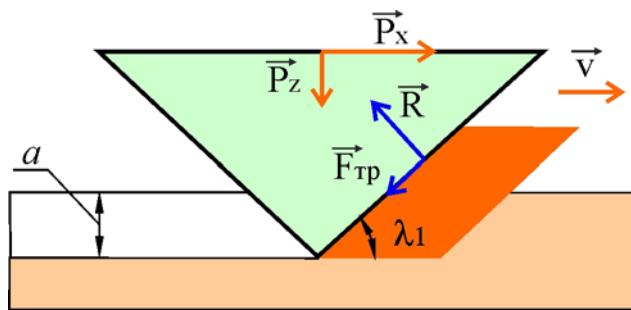


Рисунок 4.12 – Силы, действующие на инструмент при резании пластины гранью трехгранной пирамиды

На схеме показаны силы, действующие на инструмент в квазистатической модели резания: нормальная составляющая силы резания P_z , тангенциальная составляющая силы резания P_x , сила реакции материала пластины на перемещение R , сила трения на контактной поверхности $F_{\text{тр}}$. Оранжевым цветом показана зона локальных разрушений и схода стружки по передней поверхности инструмента. Нормальная составляющая силы резания P_z задается как параметр режима резания при скрайбировании и обеспечивает пространственное положение инструмента в соответствии с заданной глубиной резания a . Тангенциальная составляющая силы резания P_x обеспечивает направленное разрушение материала пластины и может быть выражена через свойства обрабатываемого материала и геометрию контакта с инструментом:

$$P_x \approx H_x \times S_x, \quad (4.3)$$

где H_x – твердость материала, измеренная методом склерометрии, S_x – площадь контакта материала с инструментом.

Локальное разрушение монокристаллического кремния происходит вдоль кристаллографических плоскостей и усиливается при наличии поверхностных нарушений структуры, концентрирующих напряжения. На рисунке 4.13 показано фотографическое изображение риски, нанесенной на поверхность кремниевой пластины гранью алмазного инструмента с нормальной составляющей силы резания $P_z = 0.5$ Н.

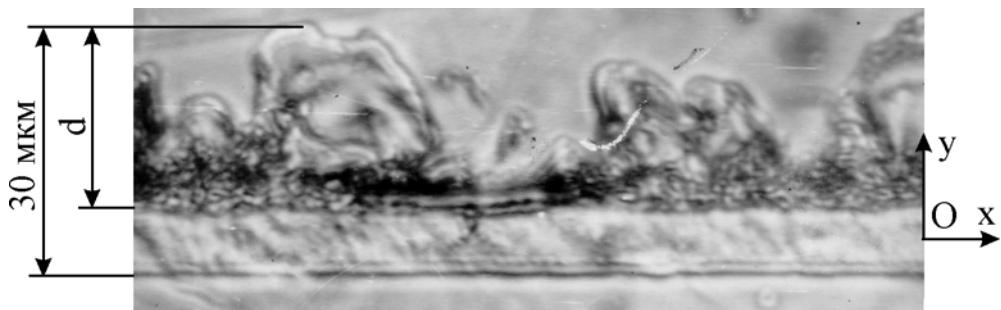


Рисунок 4.13 – Фотографическое изображение дефектного слоя

на поверхности кремниевой пластины

после одноократного прохода алмазного инструмента

Экспериментальное исследование риски методами оптической микроскопии выявляет одностороннюю дефектную зону, ширина которой в несколько раз превышает ширину самой риски. Дефектный слой обработанной поверхности образован трещинами, зародившимися в точках контакта обрабатываемого материала с режущей кромкой. Зародившиеся трещины распространяются в области повышенных напряжений и останавливаются, достигнув пространства, где выполняется условие $\tau_{\max} \leq \tau_{\max}$ разр. Некоторые трещины выходят на видимую поверхность и при условии $\tau_{\max} \geq \tau_{\max}$ разр образуют сколы шириной d , нарушая таким образом плоскостность обработанной поверхности. При скрайбировании гранью наклоненного инструмента одна поверхность риски свободна от дефектов.

Таким образом, при апробации разработанных средств выполнено компьютерное моделирование технологического процесса скрайбирования кремниевых пластин алмазным инструментом. Результаты компьютерного моделирования соотнесены с результатами экспериментального наблюдения дефектной зоны вдоль линии скрайбирования.

Анализ результатов компьютерного анализа с использованием разработанных программных модулей позволяет выделить трехгранную пирамиду как наиболее эффективный инструмент для механической обработки кремния. Проведенные вычислительные и аналогичные натурные эксперименты свидетельствуют, что в процессе несвободного косоугольного резания ребром создаются неблагоприятные условия резания, и получение

качественной поверхности при скрайбировании затрудняется. Трещины распространяются вглубь обрабатываемого материала, образуя значительный дефектный слой. При резании гранью условия резания более благоприятны, напряженное состояние реализуется в сколы, обширный дефектный слой не образуется. Алмазным резцом на поверхности пластины формируется риска глубиной до 10-15 мкм и шириной до 20-25 мкм. При этом возможно получение риски со сторонами, не содержащими сколов.

Существенное уменьшение дефектного слоя в операциях разделения полупроводниковых пластин на кристаллы можно достичь при скрайбировании гранью лезвийного инструмента. При резании гранью условия минимального сколообразования соответствуют боковому наклону инструмента вокруг оси, совпадающей со скоростью резания и направлением движения инструмента, при этом условия образования микротрещин и дефектного слоя минимальны при минимальном наклоне инструмента вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной направлению движения.

Результаты проведенных нами вычислительных и натурных экспериментов по нанесению рисок на поверхность кремниевой пластины алмазным инструментом с различными углами резца подтверждают, что быстрым и эффективным способом управления дефектным слоем обработанной поверхности является ее формообразование главной режущей кромкой, когда длина режущей кромки АО больше длины ОВ в семь и более раз (глубина резания t больше подачи s в 7-10 раз). В этом случае дефектный слой оказывается наименьшим из рассмотренных вариантов лезвийной обработки. На рисунке 4.14 показано распределение интенсивности напряжений в поверхностном слое кремниевой пластины в случае резания ребром и гранью трехгранной пирамиды. Концентрация сверхвысоких разрушающих напряжений в узкой зоне под режущей кромкой, обозначенная серым цветом, позволяет снизить тангенциальную составляющую силы резания в случае резания гранью.

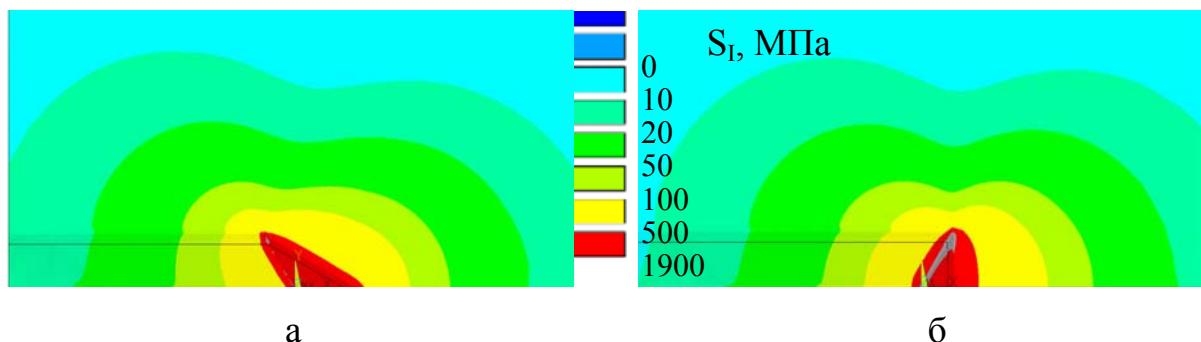


Рисунок 4.14 – Распределение интенсивности напряжений S_1
в поверхностном слое кремниевой пластины
при резании ребром (а) и гранью (б) алмазной пирамиды

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.

4.2 Апробация разработанных средств компьютерного моделирования для технологии гравирования стекла

Разработанные средства и программные модули параметрического компьютерного моделирования применимы для различных хрупких материалов и технологий механической обработки. В данной работе апробация осуществлена для технологии гравирования стекла коническим алмазным инструментом. При проектировании технологии гравирования стекла в программной среде САЕ/САМ программа САМ АДЕМ была установлена на локальном компьютере технолога, а программа САЕ ФИДЕСИС запущена на удаленной расчетной станции.

С использованием разработанных средств и процессора программы САЕ ФИДЕСИС выполнено компьютерное моделирование технологического процесса гравирования (рисунок 4.15).

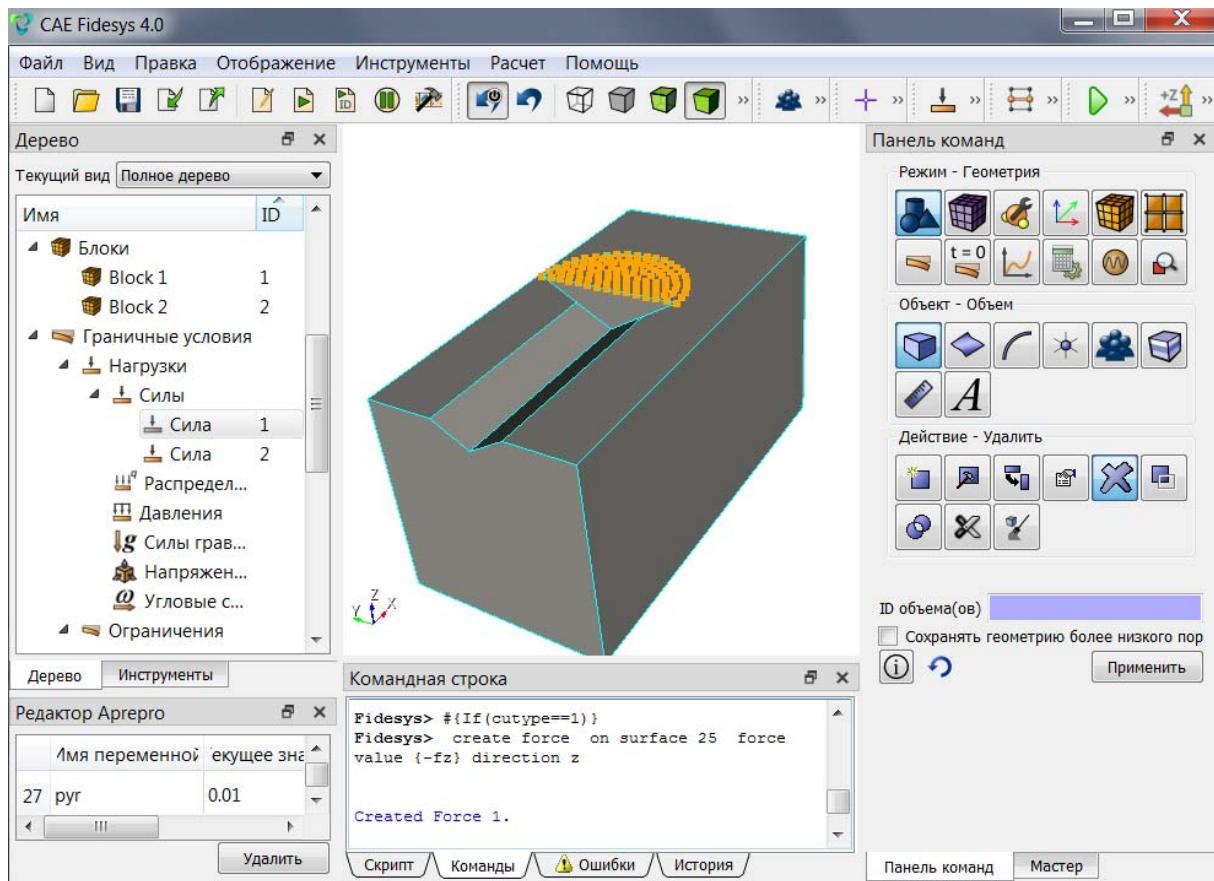
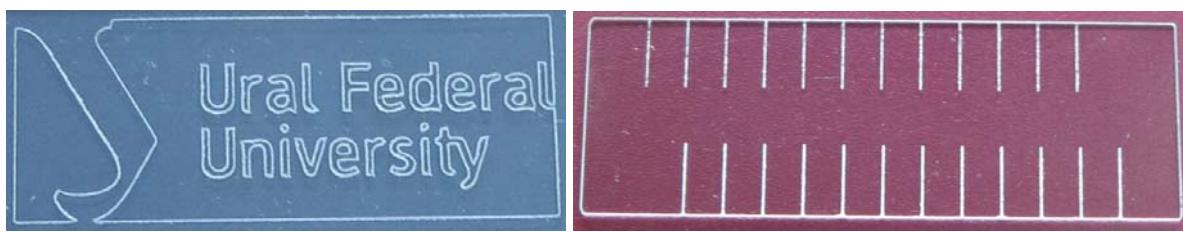


Рисунок 4.15 – Геометрическая модель процесса гравирования
в САЕ ФИДЕСИС

По расчетным данным построена зависимость ширины дефектной зоны от глубины резания, в соответствии с которой выбран параметр режима резания – глубина резания: 0.4 мм. Выбранная глубина резания задана при разработке управляющей программы для станка с ЧПУ в САМ АДЕМ. Гравирование пластины выполнено на фрезерном станке ROLAND MODEL A MDX-40A коническим гравером ZDC-A2000 (рисунок 4.16 а).



а

б

Рисунок 4.16 – 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 (рисунок 4.16 б). Риски выполнены с нарастающей глубиной резания (рисунок 4.17).

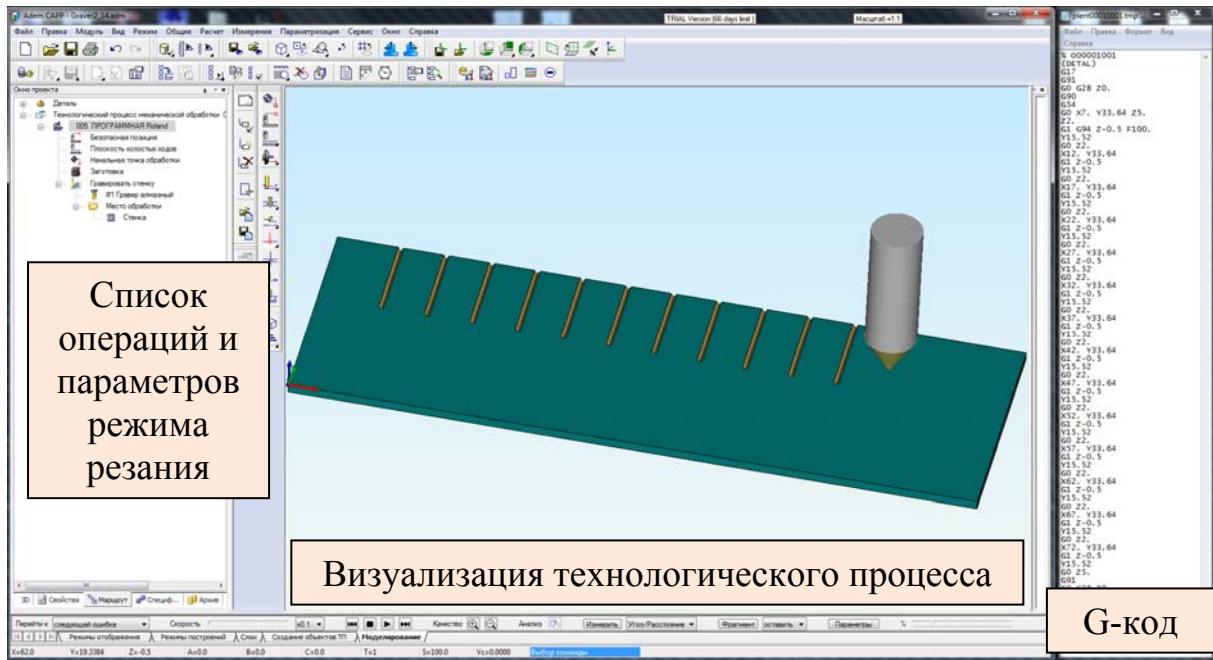


Рисунок 4.17 – Технологическая подготовка процесса гравирования в САМ АДЕМ

В компьютерном моделировании и при выборе технологического параметра для процесса гравирования (глубины резания) следует учитывать физическую модель деформирования и разрушения стекла в зависимости от глубины резания. Результаты исследования рисок показывают, что можно выделить 3 интервала, которые отличаются глубиной риски и формированием дефектного слоя вдоль риски. При задании малой глубины резания происходит пластическое деформирование материала. Экспериментальные результаты исследования рисок, нанесенных на стекло алмазным гравером с глубиной резания до 0.01 мм представлены на рисунке 4.18. Вдоль рисок не наблюдаются сколы и трещины.

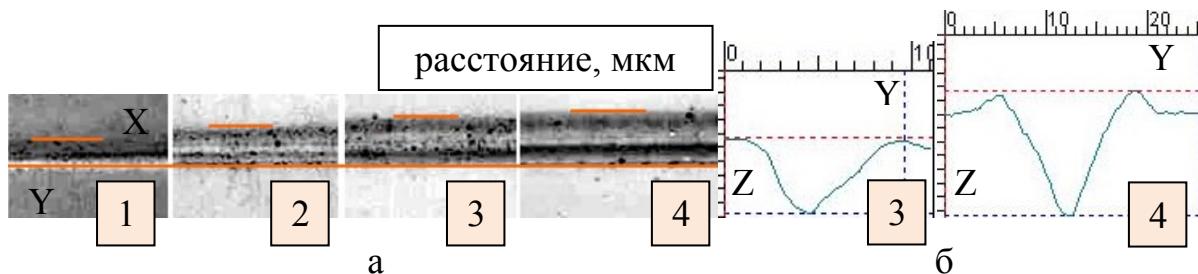


Рисунок 4.18 – Микроскопическое изображение рисок (а),
нанесенных на стекло алмазным гравером,
глубиной 2 (1), 4 (2), 6 (3), 9 (4) мкм и профили рисок (б)

С увеличением глубины резания вдоль рисок появляются трещины и сколы (рисунок 4.19), которые определяют ширину дефектной зоны. В интервале значений глубины резания от 0.01 до 0.04 мм происходит переход к обширному скальванию на поверхности, при этом оптически наблюдаемая ширина дефектной зоны в 5 раз и более превышает ширину риски. Такой режим резания из-за неровных границ и неэстетичного оптического эффекта является нежелательным.

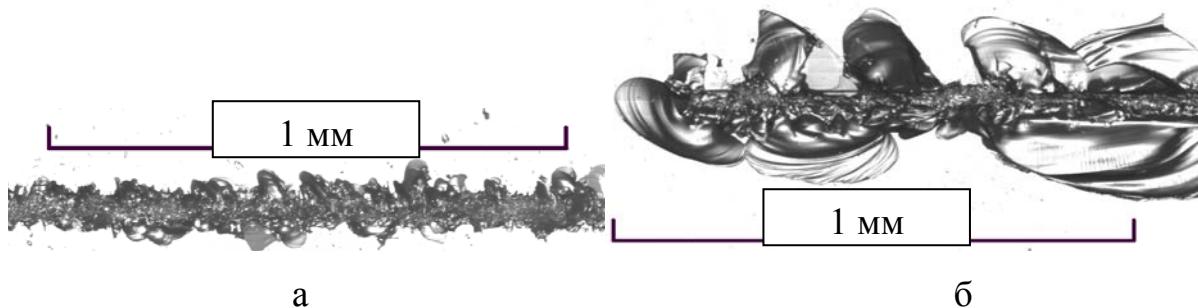


Рисунок 4.19 – Риски, нанесенные на стекло алмазным гравером,
с допустимой (а) и недопустимой (б) шириной дефектной зоны

При заданной глубине резания выше 0.04 мм происходит переход к стабильному локальному разрушению материала в зоне резания с образованием стружки путем вырывания или откалывания крупных частиц материала неправильной формы, соответствующий режим резания является оптимальным для процесса гравирования.

4.3 Выводы по главе 4

1. Выполнена экспериментальная проверка разработанных моделей и программных модулей путем сравнения расчетных напряженно-деформированных состояний в локальной зоне резания алмазным инструментом пластины из монокристаллического и поликристаллического кремния с наблюдаемым разрушением хрупкого материала. Экспериментально наблюдавшаяся ширина дефектной зоны вдоль риски, нанесенной на поверхность пластины коническим и трехгранным алмазным инструментом, соответствует расчетным данным.

2. С использованием разработанных программных модулей и сервисов облачных вычислений выполнено расчетное построение дефектной зоны в приборной пластине. Для автоматизации проектирования в облаке применен способ передачи текстового файла с кодом программы на удаленную расчетную станцию и обратно получен текстовый файл с распределением напряжений в зоне силового воздействия режущего инструмента на обрабатываемую поверхность.

3. На основании полученных результатов компьютерного инженерного анализа даны рекомендации по условиям скрайбирования приборной пластины, обеспечивающим минимальный дефектный слой вдоль риски. Рекомендовано резание гранью трехгранного инструмента способами с раздельным съемом материала с разных сторон риски.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 автоматизированное 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 модель адаптирует параметрическое описание токарного резца к процессам формообразования риски на поверхности пластины из хрупкого материала в рамках квазистатического приближения 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 теоретической 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 отличает-

ется 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 физико-механическими свойствами. На разработанный программный модуль BritmaCUT получено свидетельство о государственной регистрации.

4. Для расчетного обоснования параметров технологического процесса лезвийной обработки по результатам предиктивного компьютерного анализа напряженного состояния обрабатываемого хрупкого материала методом спектральных элементов с использованием решателя программы САЕ ФИДЕСИС **разработан препроцессорный программный модуль на алгоритмическом языке APREPRO** как средство информационной интеграции российских программ САМ АДЕМ и САЕ ФИДЕСИС в парадигме распределенного цифрового производства.

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 САЕ по компонентам тензора напряжений для поиска и визуализации зоны подповерхностных 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 препроцессор-

ной 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 физического обоснования специальной методики.

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- АСТПП – автоматизированная система технологической подготовки производства
- АСУТП – автоматизированная система управления технологическими процессами
- МКЭ – метод конечных элементов
- МОЭМС – микро-опто-электро-механическая система
- МСЭ – метод спектральных элементов
- САПР – система автоматизированного проектирования
- СЛАУ – система линейных алгебраических уравнений
- ЧПУ – числовое программное управление
- APDL – ANSYS Product Design Language (встроенный язык программирования проектов программного комплекса ANSYS)
- APREPRO – An Algebraic Pruprocessor for Parameterizing Finite Element Analyses (алгебраический препроцессор для задания параметров анализа методом конечных элементов)
- CAD – Computer Aided Design (система автоматизированного проектирования, САПР)
- CAE – Computer Aided Engineering (система автоматизированного инженерного анализа)
- CAM – Computer Aided Manufacturing (автоматизированная система технологической подготовки производства, АСТПП)
- CGI – Common Gateway Interface (общий интерфейс шлюза, стандарт интерфейса для связи внешней программы с web-сервером)
- CNC – Computer Numerical Control (числовое программное управление, ЧПУ)
- DOF – Degrees of Freedom (степени свободы системы)
- DTM – Diamond Turning Machine (токарный станок с алмазным резцом)

- HTML – Hyper Text Markup Language (язык разметки гипертекста, программные коды для разметки web-страниц)
- HTTP – Hyper Text Transfer Protocol (протокол передачи гипертекста)
- LAN – Local Area Network (локальная сеть)
- MES – Manufacturing Execution System (система управления производственными процессами)
- MPI – Message Passing Interface (стандарт передачи данных)
- PCG – Preconditioned Conjugate Gradient (метод сопряженных градиентов)
- PLM – Product Life Cycle Management (система автоматизированного управления жизненным циклом изделия)
- RDP – Remote Desktop Protocol (протокол удаленного доступа к рабочему столу Windows)
- SPDT – Single Point Diamond Turning (одноточечное алмазное точение)
- TCP – Transmission Control Protocol (протокол передачи данных)
- UDP – User Datagram Protocol (протокол передачи данных)
- WAN – Wide Area Network (глобальная сеть)

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- a – толщина срезаемой стружки, мм
 b – ширина срезаемой стружки, мм
 C_{Σ} – эмпирический коэффициент в модели резания
 $C_{\text{nагр}}$ – константа в модели резания, зависящая от приложенной силовой нагрузки, Н/м
 $C_{\text{траект}}$ – размерная константа траектории максимальных касательных напряжений, м
 d – размер сколов на поверхности, м
 E – модуль нормальной упругости (модуль Юнга), ГПа
 e – математическая константа, $e \equiv 2,71818$
 F – силовая нагрузка, Н
 F_p – критическая сила, необходимая для распространения хрупкой трещины, Н
 g – вектор гравитации, м/с²
 h – толщина пластины, м
 i, j, k – индексы пространственных компонентов вектора
 K_{Σ} – обобщенный поправочный силовой коэффициент в модели резания, Н
 l – длина хрупкой трещины, м
 N – общее количество индексированных элементов (i, j, k)
 P – сила резания, Н
 $P_{\text{гл}}$ – главная составляющая силы резания, Н
 p_1, p_2, p_3 – вариативные степенные показатели модели резания
 r – радиальная координата, м
 s – подача, мм/мин
 t – переменная времени, сек
 t_p – глубина резания, мм
 u – перемещение, м
 V – скорость резания, м/мин
 x, y, z – пространственные координаты, м
 α – угол между сторонами основания пирамиды, примыкающими к главной режущей кромке в параметрической модели режущего инструмента, градус

- β – угол между ребрами пирамиды, образующими вспомогательные режущие кромки в параметрической модели режущего инструмента, градус
- γ' – угол в горизонтальной плоскости сечения между следом основной плоскости и следом передней грани в параметрической модели режущего инструмента, градус
- δ – характерная длина в градиентной модели, м
- Θ – угловая координата, радиан
- λ_1 – угол наклона главной режущей кромки к поверхности заготовки в параметрической модели режущего инструмента, градус
- λ_2 – угол наклона кромки, противоположной главной режущей кромке, к поверхности заготовки в параметрической модели режущего инструмента, градус
- ν – коэффициент поперечного сжатия (коэффициент Пуассона)
- π – математическая константа, $\pi \approx 3,14159$
- ρ – плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$
- σ – механическое напряжение, МПа
- $\sigma_1, \sigma_3, \sigma_3$ – главные напряжения, МПа
- $\sigma(r)$ – характерное напряжение в градиентной модели, МПа
- σ_{lim} – критическое напряжение, МПа
- σ_Θ, σ_r – главные нормальные напряжения в полярной системе координат, МПа
- σ_b – предел прочности хрупкого материала, МПа
- $\sigma_{b\text{ раст}}$ – предел прочности хрупкого материала на растяжение, МПа
- $\sigma_{b\text{ сж}}$ – предел прочности хрупкого материала на сжатие, МПа
- $\sigma_{\text{сж}}$ – напряжение сжатия, МПа
- $\sigma_{\text{экв}}$ – эквивалентное напряжение, МПа
- τ_{\max} – максимальное касательное напряжение, МПа
- $\Phi_{ik},$ – функции формы конечного элемента
- φ – главный угол в плане в параметрической модели режущего инструмента, градус
- φ_1 – вспомогательный угол в плане в параметрической модели режущего инструмента, градус
- ψ – удельная поверхностная энергия разрушения хрупкого материала, $\text{Дж}/\text{м}^2$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ashby M. F. Materials selection in mechanical design / M. F. Ashby. – Oxford : Elsevier, 2005. – 602 p.
2. Gupta K. Advanced manufacturing technologies / K. Gupta. – Berlin : Springer-Verlag, 2017. – 295 p.
3. Эванс А. Г. Конструкционная керамика / А. Г. Эванс, Т. Г. Лэнгдон. – Москва : Металлургия, 1980. – 256 с.
4. Бекренев Н. В. Керамика и ситаллы в приборостроении. Свойства. Технологические процессы обработки. Инструменты / Н. В. Бекренев, Р. С. Великанов, О. А. Дударева. – Саратов : Саратовский государственный технический университет, 2006. – 128 с.
5. Никоноров Н. В. Оптическое материаловедение: основы прочности оптического стекла / Н. В. Никоноров, С. К. Евстратьев. – СПб : СПбГУ ИТМО, 2009. – 102 с.
6. Макаров В. Ф. Исследование проблем механической обработки современных высокопрочных композиционных материалов, используемых для производства деталей авиационной и ракетно-космической техники / В. Ф. Макаров, А. Е. Мешкас, В. В. Ширинкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2015. – Т.17. – № 2. – С. 30–41.
7. Paulo Davim J. Machining of hard materials / J. Paulo Davim. – Berlin : Springer-Verlag, 2011. – 175 p.
8. Жуков Ю.Н. Исследование дефектного слоя вдоль риски в кремнии методом темного поля / Ю.Н. Жуков, И. Н. Тихонов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 1984. – Вып. 7. – С.93-94
9. Балыков А. В. Эффективная обработка хрупких неметаллических материалов / А. В. Балыков, А. Б. Липатова // Вестник МГТУ «Станкин». – 2008. – № 2. – С.14–19.
10. Агафонов С. В. Прогнозирование и управление качеством поверхностного слоя неспеченных керамических заготовок при обработке резанием / С. В. Агафонов, С. В. Михайлов, Н. Ю. Ковеленов // Вестник Самарского научного центра РАН. – 2017. – Т. 19. – № 1(2). – С. 207–210.
11. Никанорова Л. В. Керамические материалы в автомобилестроении / Л. В. Никанорова, М. В. Лосева // Вестник АиГТУ. – 2016. – № 10. – С. 192–193.

12. Старков В. К. Физика и оптимизация резания материалов / В. К. Старков. – Москва : Машиностроение, 2009. – 640 с.
13. Подураев В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В. Н. Подураев. – Москва : Высшая школа, 1974. – 590 с.
14. Грубый С. В. Расчет сил резания при обработке пластичных материалов в широком диапазоне толщин срезаемого слоя / С. В. Грубый // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – № 2. – С. 3–10.
15. Самойлов С. И. Технология тяжелого машиностроения / С. И. Самойлов. – Москва : Машиностроение, 1967. – 596 с.
16. Шарин Ю. С. Обработка деталей на станках с ЧПУ / Ю. С. Шарин. – Москва : Машиностроение, 1983. – 117 с.
17. Жуков Ю. Н. Механизм и схема процесса стружкообразования при несвободном резании материала / Ю. Н. Жуков // Известия вузов. Машиностроение. – 1985. – Т. 9. – С. 138–141.
18. Тихонов И. Н., Жуков Ю. Н. Экспериментальное определение коэффициента трения на передней поверхности при лезвийной обработке полупроводникового кремния / И. Н. Тихонов, Ю. Н. Жуков // Проблемы и опыт комплексной автоматизации в машиностроении : Тезисы докладов VII научно-технической конференции. – Свердловск, 1988. – С. 45–46.
19. Способ скрайбирования шлифованных полупроводниковых пластин и резец для его осуществления : а.с. 1358687-Т СССР : МКИ НОИ Л 21/78 / Тихонов И. Н.; заявитель и патентообладатель УПИ. – 1978.
20. Lamon J. Brittle fracture and damage for brittle materials and composites / J. Lamon. – Paris : Elsevier, 2016. – 296 p.
21. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения / Г. П. Черепанов. – Москва : Наука, 1974. – 640 с.
22. Басин А. С. Получение кремниевых пластин для солнечной энергетики / А. С. Басин, А. В. Шишкин. – Новосибирск : ИТ СО РАН, 2000. – 196 с.
23. Yan J. Fundamental investigation of subsurface damage in single crystalline silicon caused by diamond machining / J. Yan, T. Asami, H. Harada, T. Kuriyagawa // Precision Engineering. – 2009. – V. 33. – P. 378–386.

24. Wieghold S. Crack detection in crystalline silicon solar cells using dark-field imaging / S. Wieghold, A. E. Morishige, L. Meyer, T. Buonassisi, E. M. Sachs // Energy Procedia. – 2017. – V. 124. – P. 526–531.
25. Лапшин, В. В. Экспериментальные исследования по сверхточной лазерной обработке кремния / В. В. Лапшин, С. В. Грубый // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2017. – Т. 685. – С. 76–85.
26. Курносов А. И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А. И. Курносов. – Москва : Высшая школа, 1986. – 368 с.
27. Dorey R. Ceramic Thick Films for MEMS and Microdevices. Micro and Nano Technologies Series / R. Dorey. – Amsterdam : Elsevier, 2012. – 190 p.
28. Doi T. Advances in CMP/Polishing Technologies for the Manufacture of Electronic Devices / T. Doi, I. D. Marinescu, S. Kurokawa. – Amsterdam : Elsevier, 2012. – 320 p.
29. Lindroos V. Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies / V. Lindroos, M. Tilli, A. Lehto, T. Motooka. – Oxford : Elsevier, 2010. – 640 p.
30. Goel S. Brittle-ductile transition during diamond turning of single crystal silicon carbide / S. Goel, X. Luo, P. Comley // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2013. – V. 65. – P. 15–21.
31. Lawn B. Fracture of brittle solids / B. Lawn. – Cambridge : Academic Press, 1993. – 400 p.
32. Broberg K. B. Cracks and fracture / K. B. Broberg. – Cambridge : Academic Press, 1999. – 752 p.
33. Griffiths A. A. The phenomenon of rupture and flow of solids / A. A. Griffiths // Philosophical Transactions of the Royal Society. – 1920. – V. A221. – P. 163–198.
34. Либовиц Г. Математические основы теории разрушения / Г. Либовиц. – Москва : Мир, 1977. – 765 с.
35. Ландау Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Москва : Наука, 1987. – 246 с.
36. Боровков А. И. Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения

- / А. И. Боровков, Ю. А. Рябов, В. М. Марусева // Цифровое производство: методы, экосистемы, технологии. – 2018. – С. 24–35.
37. Курганова Н. В. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства / Н. В. Курганова, М. А. Филин, Д. С. Черняев, А. Г. Шакlein, Д. Е. Намиот // International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – V. 7, N 5. – P. 105–115.
38. Markopoulos A. P. Finite Element Method in Machining Process / A. P. Markopoulos. – Berlin : Springer-Verlag, 2013. – 95 p.
39. Описание программы ProCast / Официальный сайт разработчика ESI Group. – Париж, Франция. – URL: www.esi-group.com/products/casting/ (дата обращения: 01.09.2020).
40. Описание программы ПолигонСофт / Официальный сайт разработчика CSoft. – Москва. – URL: www.csoft.ru/catalog/soft/poligonsoft/ (дата обращения: 01.09.2020).
41. Описание программы MoldFlow / Официальный сайт представителя разработчика Autodesk в России. – Москва. – URL: www.autodesk.ru/products/moldflow/ (дата обращения: 01.09.2020).
42. Описание программы Deform / Официальный сайт разработчика Scientific Forming Technologies Corporation. – Колумбус, Огайо, США. – URL: www.deform.com/ (дата обращения: 01.09.2020).
43. Описание программы QForm / Официальный сайт разработчика КвантоФорм. – Москва. – URL: www.qform3d.ru/ (дата обращения: 01.09.2020).
44. Описание программы ThermoSim / Официальный сайт разработчика Симмэйкерс. – Москва. – URL: simmakers.ru/thermosim/ (дата обращения: 01.09.2020).
45. Описание программного модуля QForm Heat Treatment / Официальный сайт разработчика КвантоЦентр. – Москва. – URL: www.qform3d.ru/products/qformht/ (дата обращения: 01.09.2020).
46. Описание программы SysWeld / Официальный сайт разработчика ESI Group. – Париж, Франция. – URL: www.esi-group.com/products/welding-assembly/ (дата обращения: 01.09.2020).
47. Описание программного модуля Deform Machining / Официальный сайт разработчика Scientific Forming Technologies Corporation. – Колумбус, Огайо, США. – URL: www.deform.com/products/deformd-machinin/ (дата обращения: 01.09.2020).

48. Lindgren L. Towards predictive simulations of machining / L. Lindgren, A. Svoboda, D. Wedberg, M. Lundblad // Comptes Rendus Mécanique. – 2016. – V. 344. – P. 284–295.
49. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. – Москва : Машиностроение, 1976. – 278 с.
50. Грановский Г. И. Резание металлов / Г. И. Грановский. – Москва : Высшая школа, 1985. – 304 с.
51. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва : Машиностроение, 1975. – 344 с.
52. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т.2 / Под ред. А. Г. Конисовой и Р. К. Мещерякова. – Москва : Машиностроение, 1986. – 496 с.
53. Горбунов И. В. Особенности моделирования процессов механической обработки в САЕ-системах / И. В. Горбунов, И. В. Ефременков, В. Л. Леонтьев, А. Р. Гисметулин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15, № 4. – С. 846–853.
54. Dorey R. Ceramic Thick Films for MEMS and Microdevices. Micro and Nano Technologies Series / R. Dorey. – Amsterdam : Elsevier, 2012. – 190 p.
55. Schicker J. Simulating the warping of thin coated Si wafers using ANSYS layered shell elements / J. Schicker, W. A. Khan, T. Arnold, C. Hirschl // Composite Structures. – 2016. – V. 140. – P. 668–674.
56. Харлаб В. Д. О проверке прочности в сингулярных точках / В. Д. Харлаб // Вестник гражданских инженеров. – 2009. – Т. 3. – С. 146–148.
57. Hossain M. M. Scratch behavior of multilayer polymeric coating systems / M. M. Hossain, S. Xiao, H. Sue, M. Kotaki // Materials and Design. – 2017. – V. 128. – P. 143–149.
58. Галлагер Р. Метод конечных элементов / Р. Галлагер. – Москва : Мир, 1984. – 428 с.
59. Бате К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон. – Москва : Стройиздат, 1982. – 448 с.
60. Описание программы ABAQUS / Официальный сайт разработчика Dassault Systems. – Париж, Франция. – URL: www.3ds.com/ru/produkty-i-uslugi/simulia/produkty/abaqus/ (дата обращения: 01.09.2020).

61. Brun X. F. Analysis of stresses and breakage of crystalline silicon wafers during handling and transport / X. F. Brun, S. N. Melkote // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2009. – V. 93. – P. 1238–1247.
62. Tobi A. L. M. Finite element modeling of brittle fracture of thick coatings under normal and tangential loading / A. L. M. Tobi, P. H. Shipway, S. B. Leen // Tribology International. – 2013. – V. 58. – P. 29–39.
63. Kouadri S. Quantification of the chip segmentation in metal machining: Application to machining the aeronautical aluminium alloy AA2024-T351 with cemented carbide tools WC–Co / S. Kouadri, K. Necib, S. Atlati // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2013. – V. 64. – P. 102–113.
64. Описание программы LSDYNA / Официальный сайт разработчика ANSYS. – Канонсбург, Пенсильвания, США. – URL: www.ansys.com/products/structures/ansys-ls-dyna/ (дата обращения: 01.09.2020).
65. Описание программы MSC.Marc / Официальный сайт разработчика MSC Software. – Ньюпорт Бич, Калифорния, США. – URL: www.mscsoftware.com/product/marc/ (дата обращения: 01.09.2020).
66. Описание программы AdvantEdge / Официальный сайт разработчика Third Wave Systems. – Миннеаполис, Миннесота, США. – URL: www.thirdwavesys.com/advantedge/ (дата обращения: 01.09.2020).
67. Bil H. A comparison of orthogonal cutting data from experiments with three different finite element methods / H. Bil, S. E. Kilic, A. E. Tekkaya // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2004. – V. 44. – P. 933–944.
68. Описание программного комплекса ANSYS Multiphysics / Официальный сайт разработчика ANSYS. – Канонсбург, Пенсильвания, США. – URL: www.ansys.com/products/platform/multiphysics-simulation/ (дата обращения: 01.09.2020).
69. Ostasevicius V. Numerical – experimental identification of the most effective dynamic operation mode of a vibration drilling tool for improved cutting performance / V. Ostasevicius, M. Ubartas, R. Gaidys // Journal of Sound and Vibration. – 2012. – V. 331. – P. 5175–5190.
70. Kahn H. Dynamic fatigue of silicon / H. Kahn, R. Ballarini, A. H. Heuer // Current Opinion in Solid State and Materials Science. – 2004. – V. 8. – P. 71–76.

71. Wu D. Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation / D. Wu, D. W. Rosen, L. Wang, D. Schaefer // Computer-Aided Design. – 2015. – V. 59. – P. 1–14.
72. Wang X.V. Ubiquitous manufacturing system based on Cloud: A robotics application / X. V. Wang, L. Wang, A. Mohammed, M. Givehchi // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2017. – V. 45. – P. 116–125.
73. Hohenberger P. Design, modelling, simulation and integration of cyber physical systems: Methods and applications / P. Hohenberger, B. Vogel-Heuser, D. Bradley, B. Eynard, T. Tomiyama, S. Achiche // Computers in Industry. – 2016. – V. 82. – P. 273–289.
74. Sirovi P. A comparative study of cloud computing service selection / P. Sirovi, A. Agarwal, P. Maheshwari // International Journal of Engineering and Advanced Technologies. – 2019. – V. 8, № 5. – P. 259–266.
75. Nguyen H. A hybrid approach for fuzzy multi-attribute decision making in machine tool selection with consideration of the interactions of attributes / H. Nguyen, S. Z. Dawal, Y. Nukman, H. Aoyama // Expert Systems with Applications. – 2014. – V.41. – P. 3078–3090.
76. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27002-2012. Информационная технология (ИТ). Методы и средства обеспечения безопасности. Свод норм и правил менеджмента информационной безопасности : дата введения 2014-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 2014. – 97 с.
77. Афанасьев А. А. Применение суперЭВМ для трехмерного моделирования работы турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей / А. А. Афанасьев, Ю. В. Демьяненко, В. К. Першин // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 9. – С. 10-15.
78. Xu X. From cloud computing to cloud manufacturing / X. Xu // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2012. – V. 28. – P. 75–86.
79. 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.
- Zhukov Yu. N. Cutter for Splitting Brittle Sheet Blanks / Yu. N. Zhukov, E. E. Tikhonov, K. M. Savinykh, **А. И. Огородников** // Russian Engineering Research. – 2015. – V. 35, No. 6. – P. 413–416.
80. Yue X. Effect of cutting edge radius on surface roughness in diamond tool turning of transparent MgAl₂O₄ spinel ceramic / X. Yue, M. Xu, W. Du, C. Chu // Optical Materials. – 2017. – V. 71. – P. 129–135.

81. ГОСТ 23597-79. Станки металлорежущие с числовым программным управлением. Обозначение осей координат и направлений движений / Москва : Издательство стандартов, 1979. – 15 с.
82. **Ogorodnikov A. I.** Predictive Modeling of Scribing Brittle Material Using Diamond Tool with Improved Geometry / A. I. Ogorodnikov, Yu. N. Zhukov // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering ICIE, 16-19 мая 2017 г. – Челябинск, 2018. – Р. 1867–1874.
83. Запорожский В. П. Обработка полупроводниковых материалов / В. П. Запорожский, Б. А. Лапшинов. – Москва : Высшая школа, 1998. – 184 с.
84. 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.
85. Фрохт М. М. Фотоупругость / М. М. Фрохт. Ленинград : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950. – 488 с.
86. **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.
87. **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, 2018. – С. 119–124.
88. **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.
89. **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.
90. **Огородников А. И.** Компьютерное моделирование процессов механической обработки кремния / А. И. Огородников, И. Н. Тихонов // Наноматериалы и нанотехнологии. – 2011. – №4. – С. 54-60.

91. **Огородников А. И.** Компьютерное моделирование дефектных зон в кремниевых пластинах при скрайбировании / А. И. Огородников // Новые материалы и технологии – НМТ-2010 : материалы Всероссийской научно-технической конференции, 16-18 ноября 2010 г. – Москва, 2010. – Т. 2. – С.94.
92. **Огородников А. И.** Оценка напряженно-деформированных состояний кремниевых пластин с металлическим покрытием / А. И. Огородников, И. Н. Тихонов // Ресурс и диагностика материалов и конструкций : материалы IV Российской научно-технической конференции, 26-28 мая, 2009 г. – Екатеринбург, 2009. – С. 175.
93. Морозов Е. М. Прочностной анализ. Фидесис в руках инженера / Е. М. Морозов, В. А. Левин, А. В. Вершинин. Москва : Издательская группа URSS, 2015. – 408 с.
94. 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.
95. Kumar V. Predictive analytics: A review of trends and techniques / V. Kumar, M. L. Garg // International journal of computer applications. – 2018. – V. 182 (1). – P. 31-37.
96. **Огородников А. И.** Возможности программного комплекса ANSYS/ LS-DYNA / А. И. Огородников // Новые образовательные технологии в вузе : Материалы VIII Международной научно-методической конференции НОТВ-2011, 2-4 февраля 2011 г. – Екатеринбург: изд-во УрФУ, 2015. – С. 150-152.
97. **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.
98. **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: ОмГТУ, 2016. – С. 187-192.
99. **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.
100. Резцы алмазные для скрайбирования. ОСТ 2И77-1-85. – Утвержден Министерством станкостроительной и инструментальной промышленности СССР 29.03.1985. – 16 с.
 101. Johnson K. L. Contact mechanics / K. L. Johnson. London : Cambridge University Press, 1985. – 232 p.
 102. **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.
 103. **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.
 104. **Ogorodnikov A. I.** Computer simulation of machining technologies and scratching of covered silicon wafers / A. I. Ogorodnikov // Advanced computer and information technologies: Proceedings of Russian-Korea scientific workshop, 16-18 May 2012. – Ekaterinburg : UrFU, 2012. – P.117-121.
 105. **Ogorodnikov A. I.** Finite-element simulation of scratching a coated brittle plate / A. I. Ogorodnikov // AIP Conference Proceedings. – 2016. – V. 1785. – DOI: 10.1063/1.4967041.
 106. **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.
 107. **Огородников А. И.** Интеграция программ САЕ и САМ 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.
 108. **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.

109. **Ogorodnikov A. I.** Scratching and tension on the surface of brittle materials / A. I. Ogorodnikov // Высокие технологии, экономика, промышленность : Сборник статей Тринадцатой 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.
110. **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.
111. **Ogorodnikov A. I.** Simulation of defect zones in scribed silicon wafers / A. I. Ogorodnikov, O. M. Ogorodnikova, I. N. Tikhonov // The 11th Europhysical Conference on Defects in Insulating Materials EURODYM 2010 : Book of Abstracts, 12-16 July 2010. – Pecs (Hungary), 2010. – P. A63.
112. Yoffe E. H. Elastic stress fields caused by indenting brittle materials / E. H. Yoffe // Philosophical Magazine A. – 1982. – V. 46(4). – P. 617-628.
113. Ahn Y. Sliding microindentation fracture of brittle materials: Role of elastic stress fields / Y. Ahn, T. N. Farris, S. Chandrasekar // Mechanics of materials. – 1998. – V. 29. – P. 143-152.
114. **Ogorodnikov A. I.** Finite-element simulation of scratching a coated brittle plate wafers / A. I. Ogorodnikov // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций : Сборник материалов X международной конференции 16-20 мая 2016 г. – Екатеринбург : ИМАШ УрО РАН, 2016. – С. 17.
115. **Ogorodnikov A. I.** Computer-aided analysis of cutting processes for brittle materials / A. I. Ogorodnikov, I. N. Tikhonov // AIP Conference Proceedings. – 2017. – V. 1915. – DOI: 10.1063/1.5017334.
116. Liu K. The mechanism of ductile chip formation in cutting of brittle materials / K. Liu, X. P. Li, S.Y. Liang // International Journal of Advanced Manufacturing Technologies. – 2007. – V. 33. – P. 875-884.

**ПРИЛОЖЕНИЕ П1. СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ
РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013616642

**Программный модуль «Моделирование силового
воздействия режущего инструмента на хрупкие материалы
с покрытием» ("BritmaCUT")**

Правообладатель: **Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н.Ельцина» (RU)**

Автор: **Огородников Алексей Игоревич (RU)**

Заявка № **2013612121**

Дата поступления **12 марта 2013 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **15 июля 2013 г.**

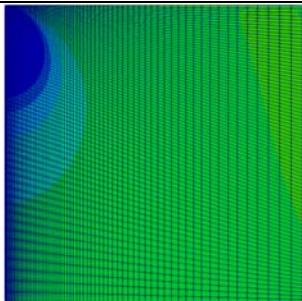
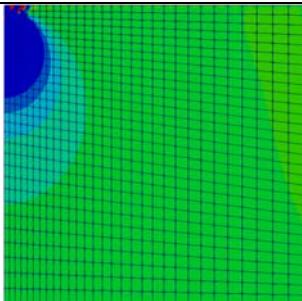
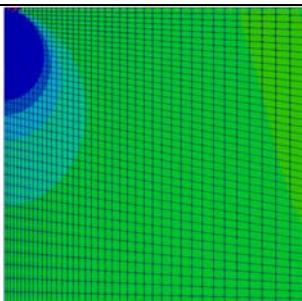
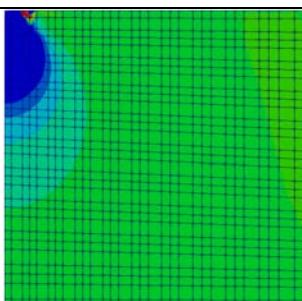
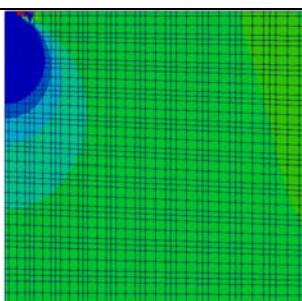
*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Б.П. Симонов



**ПРИЛОЖЕНИЕ П2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РЕШЕНИЯ НА СЕТКЕ
В ПРОГРАММЕ ФИДЕСИС**

Порядок элемента	Количество элементов	Время расчета, с	Напряжение в контрольной точке, МПа	Отклонение расчетных напряжений, %	Распределение напряжений в сечении
1	40^3	353	-2.921623	0.6	<p>Stress distribution plot showing the distribution of stress in a section. The color bar indicates stress values from -2.500e+01 (blue) to 2.500e+01 (red). A coordinate system (X, Y, Z) is shown at the bottom left. The plot shows a high stress concentration in the top-left corner.</p>
1	50^3	468	-2.911314	0.4	<p>Stress distribution plot showing the distribution of stress in a section. The color bar indicates stress values from -2.500e+01 (blue) to 2.500e+01 (red). A coordinate system (X, Y, Z) is shown at the bottom left. The plot shows a high stress concentration in the top-left corner.</p>
1	60^3	597	-2.905029	0.2	<p>Stress distribution plot showing the distribution of stress in a section. The color bar indicates stress values from -2.500e+01 (blue) to 2.500e+01 (red). A coordinate system (X, Y, Z) is shown at the bottom left. The plot shows a high stress concentration in the top-left corner.</p>
1	70^3	703	-2.901024	0.1	<p>Stress distribution plot showing the distribution of stress in a section. The color bar indicates stress values from -2.500e+01 (blue) to 2.500e+01 (red). A coordinate system (X, Y, Z) is shown at the bottom left. The plot shows a high stress concentration in the top-left corner.</p>

1	80^3	2724	-2.898395	0.1	
2	30^3	321	-2.784386	0.2	
2	40^3	1105	-2.785542	0.05	
3	10^3	63	-2.785412	0.01	
4	10^3	655	-2.781067	0.2	

ПРИЛОЖЕНИЕ ПЗ. СОВМЕСТИМОСТЬ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ УДАЛЕННОГО ДОСТУПА С ОПЕРАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ

(C – сервер, K – клиент)

ПРИЛОЖЕНИЕ П4.
МЕТОДИКА ПОДГОТОВКИ СВОЙСТВ
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИБОРНЫХ ПЛАСТИН

Монокристаллический кремний является ортотропным материалом. В диссертации при компьютерном моделировании приборных пластин (100) и (111) использованы свойства, представленные в таблице. Направление резания совпадает с осью X системы координат.

Таблица – Упругие константы ортотропного материала
в компьютерной модели для инженерного анализа
полупроводниковых пластин монокристаллического кремния

Упругие константы монокристаллического кремния	Пластина (100), направление резания <110>	Пластина (111), направление резания <112>
Модуль нормальной упругости		
E_x , МПа	169×10^3	169×10^3
E_y , МПа	169×10^3	169×10^3
E_z , МПа	130×10^3	188×10^3
Коэффициент поперечного сжатия		
ν_{xy}	0.064	0.26
ν_{yz}	0.36	0.16
ν_{zx}	0.28	0.18
Модуль сдвига		
G_{xy} , МПа	50.9×10^3	66.9×10^3
G_{yz} , МПа	79.4×10^3	57.8×10^3
G_{zx} , МПа	79.4×10^3	57.8×10^3

В связи с размерными ограничениями по ошибкам вычислений и построений конечно-элементной сетки напряжения и свойства материалов в компьютерной модели задаются в МПа.

Упругие свойства ортотропного материала в заданной системе координат, оси которой не совпадают с кристаллографическими направлениями монокристалла, вычисляются по формулам:

$$\frac{1}{E} = s_{11} - 2(s_{11} - s_{12} - \frac{1}{2}s_{44})(l^2m^2 + m^2n^2 + n^2l^2),$$

$$\nu = \frac{s_{12} + (s_{11} - s_{12} - \frac{1}{2}s_{44})(l_1^2l_2^2 + m_1^2m_2^2 + n_1^2n_2^2)}{s_{11} - 2(s_{11} - s_{12} - \frac{1}{2}s_{44})(l_1^2m_1^2 + m_1^2n_1^2 + n_1^2l_1^2)},$$

$$\frac{1}{G} = s_{44} + 4(s_{11} - s_{12} - \frac{1}{2}s_{44})(l_1^2l_2^2 + m_1^2m_2^2 + n_1^2n_2^2),$$

где (l_1, m_1, n_1) и (l_2, m_2, n_2) – направляющие косинусы для двух ортогональных направлений в плоскости полупроводниковой пластины в заданной системе координат относительно кристаллографических направлений монокристалла; $s_{11} = 0.768 \times 10^{-5}$ МПа $^{-1}$, $s_{12} = -0.214 \times 10^{-5}$ МПа $^{-1}$, $s_{44} = 1.26 \times 10^{-5}$ МПа $^{-1}$ – коэффициенты податливости монокристаллического кремния при комнатной температуре.

Матрица коэффициентов податливости S связана с матрицей коэффициентов жесткости C ортотропного материала в соответствии с законом Гука соотношением:

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{bmatrix} = S^{-1} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{12} & s_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} \end{bmatrix}^{-1},$$

где $c_{11} = 165.7 \times 10^3$ МПа, $c_{12} = 63.9 \times 10^3$ МПа, $c_{44} = 79.6 \times 10^3$ МПа – коэффициенты жесткости монокристаллического кремния при комнатной температуре. Справочные коэффициенты податливости S и жесткости C соответствуют совмещению осей координат с кристаллографическими направлениями монокристаллического кремния X [100], Y [010], Z [001].

ПРИЛОЖЕНИЕ П5. ДОКУМЕНТЫ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ



ИНЖЕТЕХ

проектирование и производство
модельно-стержневой оснастики

Исх. № 02 от 02.06.2021 г.

на № _____ от _____._____._____. г.

ООО "ИНЖЕТЕХ"

Почтовый и юридический адрес: 620137, Свердловская
область, г. Екатеринбург, ул. Аппаратная, д. 13.
Расчетный счет: 40702810738380001124
в ФИЛИАЛ "ЕКАТЕРИНБУРГСКИЙ"
АО "АЛЬФА-БАНК"

Кор. счет: 30101810100000000964
ИНН: 6612025972 КПП: 668601001 БИК: 046577964
ОГРН: 1086612000958
Тел./факс: (343) 3-801-999 ingetech@ingetech.ru,
www.ingetech.ru

АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

результатов диссертационной работы Огородникова Алексея Игоревича на тему:

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

Настоящим актом подтверждается, что методика предиктивного анализа напряженно-деформированных состояний неметаллических материалов при лезвийной обработке, разработанная Огородниковым А.И. в рамках диссертационной работы, апробирована и используется в проектно-поисковой работе ООО «ИНЖЕТЕХ».

ООО «ИНЖЕТЕХ» выполняет автоматизированное проектирование управляющих программ для изготовления литейной оснастки из неметаллических материалов на станках с ЧПУ и постоянно ведет поиск новых, высокотехнологичных материалов.

Методика, предложенная Огородниковым А.И., автоматизирует инженерный анализ процессов резания и включает выполнение ресурсоемких расчетов в облаке, дополненное быстрыми способами передачи и обработки данных инженерного анализа. Экономическая эффективность предложенной методики заключается в сокращении времени и стоимости пользования сетевыми вычислительными ресурсами, а также в отказе от инсталляции на компьютерах компании дорогостоящего программного обеспечения от зарубежных разработчиков.

Исполнительный директор
ООО «ИНЖЕТЕХ»

А.В. Искорцев





Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ)

ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002,
факс: +7 (343) 375-97-78; тел.: +7 (343) 374-38-84
контакт-центр: +7 (343) 375-44-44, 8-800-100-50-44 (звонок бесплатный)
e-mail: rector@urfu.ru, www.urfu.ru
ОКПО 02069208, ОГРН 1026604939855, ИНН/КПП 6660003190/667001001

23.08.2021 № 01.03-04/285

На № _____ от _____

АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
результатов диссертационной работы Огородникова Алексея Игоревича
в учебном процессе ФГАОУ ВО "Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина"

Настоящим актом подтверждается, что практические результаты диссертационной работы "Параметрическое компьютерное моделирование механической обработки хрупких материалов для интеграции в автоматизированную систему технологической подготовки производства", представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук старшим преподавателем кафедры электронного машиностроения Института новых материалов и технологий (ИНМТ) УрФУ Алексеем Игоревичем Огородниковым, используются в учебном процессе УрФУ.

В практике проектного обучения и научно-исследовательской работы студентами и преподавателями ИНМТ УрФУ используется сформированная А.И. Огородниковым инфраструктура инженерного проектирования и компьютерного моделирования в облаке, включая методическое обеспечение САПР и инструментарий для управления проектами, выполняемыми в интегрированной программной среде CAD/CAE/CAM/PLM. Работа по созданию инфраструктуры инженерного проектирования выполнена в рамках соглашения о стратегическом партнерстве № 02-25/007 от 14 января 2021 г. между УрФУ и Группой компаний "АСКОН".

Директор по образовательной деятельности
УрФУ

С.Т. Князев

Директор
Школы базового инженерного образования
ИНМТ

Д.В. Куреннов

