

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»  
Институт машиностроения  
Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»  
15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных  
производств  
\_\_\_\_\_  
(код и наименование направления подготовки, специальности)  
Технология автоматизированного машиностроения  
\_\_\_\_\_  
(направленность (профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Модель математического формирования микрогеометрии при  
вдавливании индентора в тугопластическое пространство  
\_\_\_\_\_

Студент	<u>К.В. Каманин</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Научный руководитель	<u>Н.М. Бобровский</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Консультанты	<u>В.Г. Виткалов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)

Руководитель программы д.т.н., доцент Н.М. Бобровский \_\_\_\_\_  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия ) (личная подпись)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ Г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент Н.Ю. Логинов. \_\_\_\_\_  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия ) (личная подпись)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ Г.

Тольятти 2017

## Содержание

Введение .....	4
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБЪЕКТЕ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	9
1.1. ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ .....	9
1.2. Способы обработки поверхностным пластическим деформированием .	11
1.2.1. Динамические методы отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием .....	14
1.2.2. Статические методы отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием .....	16
1.2.3. Комбинированные методы отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием .....	18
1.3. Увеличение износостойкости и эксплуатационных возможностей изделий при обработке поверхностным пластическим деформированием ..	24
1.4. Повышение производительности обработки статическими методами поверхностного пластического деформирования .....	28
1.5. Общие сведения о поверхностях и их контакте .....	29
1.6. Особенности микрогеометрии и её влияние поверхности находящиеся в контакте .....	31
1.7. Методология исследования .....	32
2. ОСНОВЫ КОНТАКТНОЙ МЕХАНИКИ .....	34
2.1. Теории контактных явлений и их развитие .....	34
2.1.1. Упругий контакт .....	35
2.1.2. Пластичный контакт .....	37
2.1.3. Эластично-пластиковый контакт .....	40

2.2. Топография поверхности: текстура поверхности, шероховатость, волнистость .....	41
2.3. Контактная проблема гладких поверхностей .....	43
2.4. Контактная проблема шероховатой поверхности .....	45
2.5. Моделирование шероховатой поверхности .....	47
2.6. Трёхмерные модели грубой поверхности созданные в коммерческом программном обеспечении методом конечных элементов .....	52
2.7. Метод конечных элементов .....	58
2.7.1. Основная теория метода конечных элементов .....	60
2.7.2 Спецификация и геометрия .....	64
3. Экспериментальные исследования формирования математической модели микрорельефа для вдавливания индентора в тугоплавкое тело .....	68
3.1. Методология моделирования конечных элементов .....	68
3.2. Предварительная обработка данных в программных пакетах Matlab-SolidWorks .....	69
3.2.1. Определение геометрии поверхностного слоя в программном пакете Matlab .....	69
3.2.2. Преобразование 2D-массив в трёхмерную поверхность в программной среде SolidWorks .....	71
3.3. Предварительная обработка смоделированной поверхности в программных пакетах ABAQUS .....	75
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	<b>87</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	<b>89</b>

## Введение

На сегодняшний день построение моделей трехмерных объектов по средствам математических алгоритмов и наборов изображений является одной из наиболее актуальных тенденций развития во множестве областей, современного производства включая машиностроение. Применение возможностей современных математических теорий в прикладных задачах дают нам широчайшие возможности в осуществление эффективной и надежной автоматизации извлечения, обработки и представлении информации, а так же в формировании и развитии новых исследовательских методик. Вместо использования опытных экземпляров и материальных физических образцов с каждым днём всё большее применение находят компьютерные модели и цифровые трёхмерные графические объекты. Данная тенденция оправдывается тем, что работа с цифровыми моделями существенно экономит время, обеспечивает меньшие затраты материальных ресурсов, даёт большую гибкость, многократно увеличивает варианты использования и достигается быстрым вычислением критических характеристик. Думаю, любой специалист согласится с тем, что при нынешнем уровне развития вычислительной техники и стремительном развитии программного обеспечения проведение экспериментов при помощи математических моделей и проверки результатов на нескольких контрольных образцах в разы быстрее и эффективнее. Это обусловлено возможностью прогнозировать множество возможных результатов до проведения практических экспериментов.

Безусловно, формируемые модели, применяемые в исследованиях и разработках, должны быть максимально приближены и аппроксимированы к реальным или создаваемым объектам. Существующие на сегодняшний день методы построения работоспособных моделей разнообразны и многочисленны. К ним относятся аналитические модели – служащие для построения теоретических моделей и экспериментальные – использующиеся

в качестве инструмента формирования имитационных моделей, целиком определяемых замерами, проведёнными с использованием реальных испытаний. Как правило, на практике выступает промежуточный способ. Принцип метода заключается в аппроксимирование множества методов относительно небольшого количества измеренных параметров соответствующих имеющимся аналитическим структурам. Примером применения данного способа являются методы трёхмерной реконструкции [1, 2].

Создание трехмерных объектов с помощью математических моделей и двумерных данных (чертёж, изображение и т.п.) оказались весьма востребованы при визуализации и проведении анализа данных [3]. Формирование трехмерной структуры сопутствует её углубленному исследованию, обеспечивает возможность анализа её строения, функциональности и возможности модернизации, вплоть до мельчайшей детали.

Однако, в ряде случаев, когда исходные параметры представляют собой облако точек с заданным набором параллельных сечений, а задача сводится к формированию адекватного объемного тела, известные математические алгоритмы оказываются неэффективны. Однако они не гарантируют выявление ценной информации, используемой при анализе. Возможно, что при их реализации понадобятся значительные вычислительные ресурсы [4].

Наиболее распространёнными подходами вычисления геометрии объекта исследования являются методы плотной и разреженной стереофотограмметрии. Эти методы позволяют вычислить облако точек, составляющих "Каркас" объекта исследований. К несчастью эти алгоритмы вычисляют трехмерные координаты точек с существенной ошибкой: структура облака точек содержит значительное количество ложных точек, пересекающихся или не лежащих на поверхности объекта. Триангуляция

облака точек с лишними координатами порождает очень неточную структуру модели [5].

Данная выпускная квалификационная работа является частью исследований, направленных на создание алгоритма, позволяющего не обладающему специализированным оборудованием и квалификацией пользователю, моделировать микрогеометрию поверхностного слоя по заданным габаритам с возможностью внесения необходимых параметров (материала, твёрдости, силы и т.п.) и моделирования процесса выглаживания индентором. Будет разработан инструментарий для применения современной методологии моделирования.

Необходимо учитывать, что на нынешнем уровне развития темы возможности моделирования имеет ряд ограничений по сравнению с практическими опытами. Поэтому в выпускной работе необходимо учитывать ряд ограничений:

- Параметры грубой поверхности извлекаются с использованием данных трехмерных координат из измерённой поверхности, однако случайная шероховатая поверхность, сгенерирована методом математического моделирования.
- Поверхностное моделирование производится только по отношению к тугоплавкой поверхности при статическом контакте.
- Все контактные взаимодействия будут сухими, что означает, что он не учитывает применения СОЖ (Смазочно-охлаждающая жидкость).
- Свойства материала сформированной поверхности соответствует алюминию.
- Тепловые связи от трения не учитываются.
- Поверхность сгенерирована в коммерческих системах MatLab, SolidWorks и ABAQUS, что в свою очередь не гарантирует получения

достоверного результата при использовании другого программного пакета.

В данной работе будут рассмотрены основные этапы развития математических теорий и алгоритмов, методик моделирования объёмных объектов и разработана методика, отвечающая всем современным требованиям. В результате планируется получить работоспособную модель с широкими возможностями дальнейшей её модернизации.

Это исследование позволит сделать один шаг вперед к возможности прогнозирования результатов при контактном взаимодействии различных поверхностей во время обработки путем моделирования.

Цели настоящего исследования заключаются в следующем:

- Создание трехмерных моделей шероховатых поверхностей в программной среде MatLab получив числовое значение каждого элемента микрогеометрии поверхности.
- Сгенерировать в программной среде SolidWorks поверхность из полученных числовых значений микрогеометрии поверхности.
- Исследовать контакт генерируемой поверхности с поверхностью инструмента на ABAQUS.
- Нанесение сгенерированной поверхности в статическом случае упругого и упругого пластичного контакта.
- Сравнение модели конечных элементов с экспериментальной моделью.

Научная новизна работы.

В диссертации представлен новый метод генерации детерминированных шероховатой поверхности в программной среде ABAQUS с предварительной обработкой в программной среде SolidWorks. Этот метод наиболее современный и практически не изучен нынешними специалистами в трибологии. Затем берется случайная геометрия реальной шероховатой поверхности и деформируемого гладкого шара (индентора) для

моделирования реального шероховатого поверхностного контакта с использованием метода конечных элементов. Эти методы, в сочетании со способностью моделировать реальные поверхности в программной среде ABAQUS, могут быть использованы, чтобы помочь исследователям в материаловедении, машиностроении и за его пределами лучше понять микромасштабную механику поверхностного контакта.

Работа состоит из 4 пунктов:

Первой пункт описывает вопросы, касающиеся важности темы, целей, ограничений, методики исследования и методологии написания работы. Основное обсуждение этого тезиса - контакт шероховатой поверхности.

Во втором пункте представлена информация, охватывающая базовую теорию, которая описывает грубые поверхности, завершённые предыдущими работами многих исследователей в той же области.

В третьем пункте обсуждается процедура моделирования шероховатых поверхностей. Перед описанием процедуры моделирования представлено небольшое введение метода конечных элементов (МКЭ). В процессе генерации участвует несколько таких программных продуктов, как Matlab, SolidWorks и ABAQUS.

Четвёртый пункт включает экономическое обоснование выбранной темы.

# 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБЪЕКТЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1. ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Преждевременный выход из строя деталей является весомой проблемой в современном машиностроении. Потеря работоспособности связана с разрушением поверхностного слоя детали. Вследствие чего при обработке деталей в тех процессе зачастую применяют операции упрочнения поверхностного слоя, обеспечивающие требуемый микрорельеф и высокую твёрдость.

Необходимость выхода российских технологий и продукции машиностроения на мировые рынки требует поиска неиспользованных возможностей внутренних резервов. Преждевременный выход из строя деталей машин является существенной проблемой на сегодняшний день. Снижение усталости изделий, как правило, зависит от целостности поверхностного слоя. Исследованиями Балтера М.А, Демкина Н.Б., Крагельского И.В., Кудрявцева И.В., Рыжова Э.В., Сулова А.Г. установлено, что эксплуатационные свойства поверхности находятся в зависимости от показателей качества. В результате в техпроцессах все чаще начали использовать методы обработки направленные на упрочнение поверхностного слоя, для формирования требуемого микрорельефа, высокой прочности, сжимающей остаточные напряжения, требуемую равномерную упрочняющую обработку по всей длине изделия.

Для того, чтобы получить алгоритм для научно обоснованных требований к упрочненному слою проводится множество испытаний. Так Безъязычным В.Ф., Киричком А.В., Тескером Е.И. выявили необходимость формирования в упрочненном слое эпюр твердости и остаточных напряжений по глубине, максимально соответствующих эксплуатационным требованиям. Ивановым Г.П., Куманиным В.И., Смелянским В.М. доказано, что в ряде случаев для повышения эксплуатационных свойств деталей машин

наиболее эффективен поверхностный слой с гетерогенно упрочненной структурой. Реализация таких требований вызывает необходимость в совершенствовании и создании новых способов упрочнения.

Простым и эффективным способом, обеспечивающим качественные эксплуатационными свойствами поверхностного слоя в широком диапазоне, являются методы обработки, основанные на обработке поверхностным пластическим деформированием (ППД). Применение ППД обеспечивает формирование требуемой шероховатости поверхностного слоя, упрочнение поверхностного слоя, снижение остаточного напряжения.

Упрочнение деталей при помощи поверхностного пластического деформирования осуществляется за счёт силового контактного взаимодействия деформирующего инструмента с поверхностным слоем обрабатываемой заготовки при их относительном движении. Процесс обрабатывания деталей ППД является бесстружечным, то есть происходит без снятия стружки. Обработка происходит за счет деформирования микронеровностей поверхностного слоя и прилегающих к нему, слоёв материала. Результатом является упрочнение поверхностного слоя, значительное снижение шероховатости и возникновения остаточных напряжений сжатия.

По сей день методы ППД не могут полностью реализовать равномерное упрочнение по всей поверхности и обеспечить формирование поверхностного слоя с необходимыми требованиями твёрдости и остаточным напряжениям. В результате целый ряд деталей в машиностроении не может использоваться при ППД.

Множества проведённых исследований методов ППД показывают, что недостатки могут быть устранены способами использующими энергию удара для нагружения. Энергия удара обеспечит наибольший диапазон контролируемых показателей качества. К недостаткам данных методов можно отнести низкую точность регулирования, поскольку энергия, расходуемая на пластическую деформацию удара будет различной.

Значительный вклад в исследование и разработку способов ППД внесли отечественные ученые Алимова О.Д., Балтер М.А., Барац Я.И., Бабичева А.П., Бобровский Н.М., Браславский В.М., Дрозд М.С., Драчев О.И., Демкина Н.Б., Еремьянцева В.Э., Жасимов М.М., Иванов Г.П., Кудрявцев И.В., Крагельский И.В., Одинцов Л.Г., Проскуряков Ю.Г., Петросов В.В., Папшев Д.Д., Рыжов Э.В., Розенберг А.М., Соколинского В.Б., Смелянский В.М., Сулова А.Г., Хворостухин Л.А., Чепа П.А., Чекин Г.И., Шнейдер Ю.Г., Яценко В.К., Ящерицын П.И. и др. Исследования способов ППД представлены в работах иностранных исследователей Брудера И., Зума А., Конига Х., Прзибильского В., Нейкиррехена И., Холла И. и др.

Управляя статико-импульсными процессами, осуществляется варьирование рядом новых параметров, что в свою очередь расширяет круг возможностей ППД, но и в то же время усложняет управление формирования качества поверхностного слоя.

Для расширения технологических возможностей, увеличения производительности и обеспечения требуемого качества поверхностного слоя детали проектируются новую оснастку для ППД направленные на достижения выше перечисленных задач различными методами.

## 1.2. Способы обработки поверхностным пластическим деформированием

Представленные исследования в первую очередь направлены на выявление общих и частных случаев ППД при огромном разнообразии средств применения этого вида обработки. Способы упрочнения ППД делятся на 3 группы:

- динамические;
- статические;
- комбинированные. [6]

При проведении патентного поиска было выявлено, что оснастку для ППД можно разбить на две группы (статические и ударные) по ГОСТ 18296-72 и классифицировать по способам обработки ППД (Рисунок 1.1).

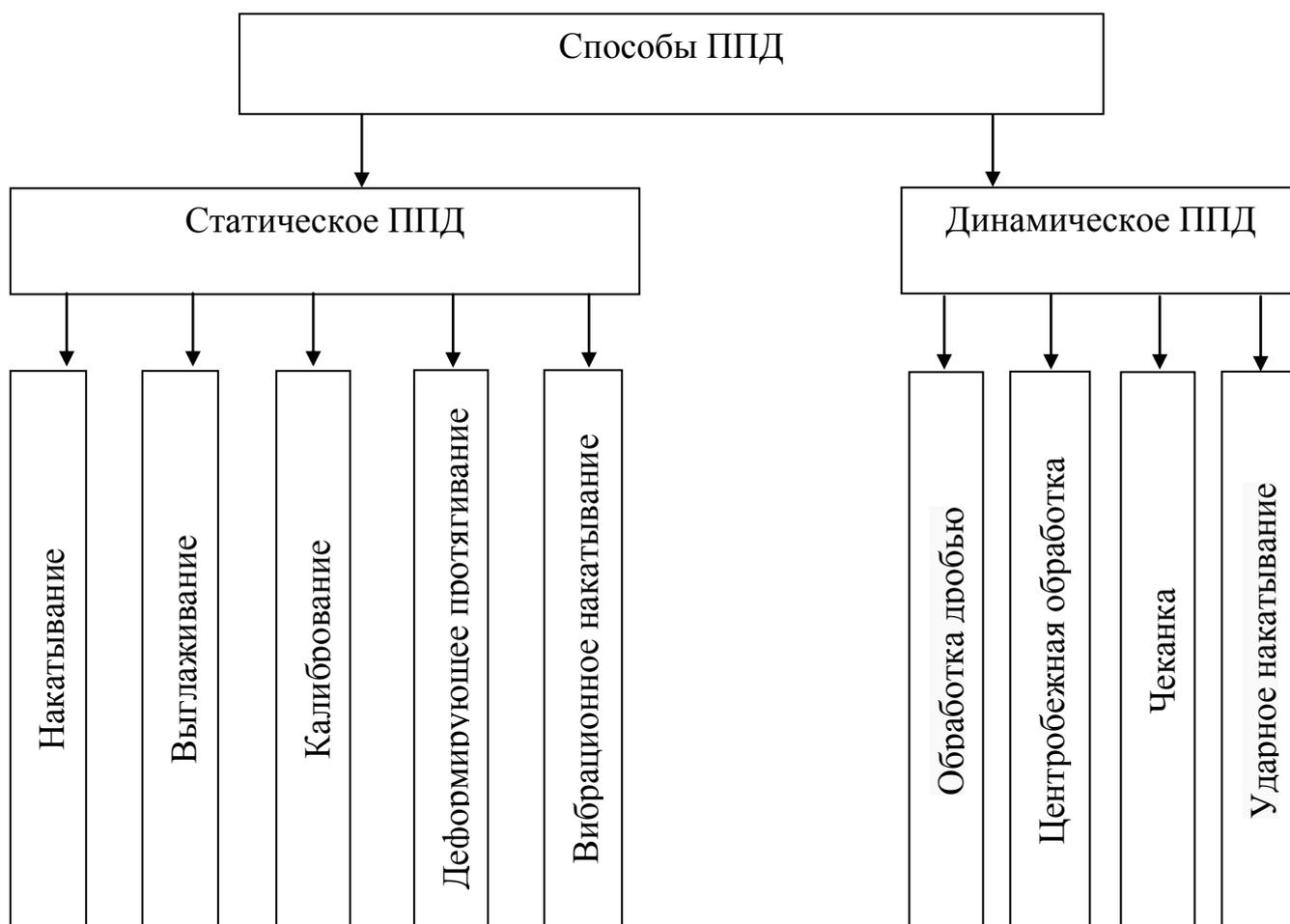


Рисунок 1.1. – Классификация оснастки по способам обработки поверхностным пластическим деформированием.

Принцип действия статических методов обработки заключается в том, что обрабатывающий инструмент, рабочие тела или среда в которой происходит обработка, воздействуют на обрабатываемую поверхность с определенной силой. В результате происходит плавное перемещение влияющего очага, последовательно проходящего по всей поверхности заготовки. При этом инерционные силы существенного не влияют на поверхностное пластическое деформирование.

Во время использования ударных методов обрабатывающий инструмент, рабочее тело или среда воздействуют на всю обрабатываемую поверхность или ее часть. Сила, появляющаяся в каждом цикле изменяется от наиболее незначительных значений до своего максимума, а в случае локального ударного воздействия очаг деформирования может последовательно и равномерно проходить всю обрабатываемую поверхность.

После анализа технологического уровня и конструктивных особенностей оснастки было выявлено, что наиболее эффективными являются устройства способные регулировать микрорельеф и глубину упрочнения поверхности. Это обусловлено возможностью широкого применения в различных отраслях машиностроения.

Исправление основных недостатки ППД на сегодняшний день остаются актуальными: большинство методов ППД не повышает геометрической точности детали; невозможность обработки большинством методов тонкостенных и неравнопрочных деталей; образование на торцовых поверхностях детали наплывов, требующих дополнительной обработки. Но упрочнение поверхностного слоя при помощи ППД позволяет обрабатывать ряд поверхностей различными методами (Рисунок 1.2.).



Рисунок 1.2. – Классификация приспособлений по способам обработки поверхностей.

На сегодняшней день одними из наиболее актуальных являются изучение методов точного прогнозирования возникающих показателей при использовании энергии удара.

### 1.2.1. Динамические методы отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием

К динамической группе относят способы обработки, при которых контактное взаимодействие деформирующего инструмента с заготовкой носит дискретный, ударный характер. К таким способам относятся вибрационная обработка в среде свободных деформирующих элементов, центробежная обработка шариками и щетками, дробеструйное упрочнение,

Все эти способы описываются в работах Бабичева А.П., Петросова В.В., Хворостухина Л.А. и др. [7,8,9,10,11]

В работе [12] приведены результаты экспериментов при использовании метода алмазного вибронакатывания при обработке внутренних поверхностей заготовок из закаленной стали. Изначальные неровности поверхности снижаются на 2-3 класса точности. К тому же вибронакатывание позволяет регулировать высоту шероховатости, путём изменения силовых и кинематических параметров обработки.

Как показывают исследования динамической обработки поверхностным пластическим деформированием в работах Папшева Д.Д., [13] метод обеспечивает повышение работоспособности деталей и сварных конструкций. Это наглядно демонстрирует снижение шероховатости поверхностного слоя в 1,3-2 раза за счет применения в процессе обработки секционных щеток. Твердость поверхностного слоя увеличивается приблизительно на 10-20% при толщине упрочненного слоя в 0,09-1,2 мм.

Применение микрошариков для повышения надежности деталей является одной из наиболее перспективных методов обработки [14]. Усталостные испытания продемонстрировали повышение предельной выносливости на 8%. К тому же было показано, что на поверхностном слое формируется микрорельеф с шероховатостью  $Ra=0,6-1,2$  мкм.

Метод многоконтактного силового виброударного выглаживания один из наиболее изучаемых среди методов обработки ППД на сегодняшний день. Внедрение метода позволяет обеспечить повышение производительности обработки деталей.

В этой группе наиболее распространенным, эффективным и во множестве случаев незаменимым методом обработки ППД является обработка дробью. В первую очередь метод направлен на повышение несущих способностей изделия. Исследования Петросов В.В. [15] наглядно демонстрируют, что главное превосходство метода заключается в высокой

универсальности и технологичности, позволяющей обрабатывать любые сложнофасонные поверхности без использования дорогостоящего оборудования и даже точного базирования. Гидродробеструйная обработка рабочей позволяет значительно повысить износостойкости деталей в 2 раза, улучшает микрорельеф поверхностного слоя и создает остаточное напряжение сжатия [16].

Силовое виброударное выглаживание позволяет исключить часть недостатков присущих традиционному выглаживанию. Метод увеличивает производительность обработки за счет увеличения осевой подачи до 1 мм/об. Таким образом, образуется возможность достижения низкой шероховатости поверхностного слоя, увеличить глубину и степень упрочнения [17].

#### 1.2.2. Статические методы отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием

Статическая группа включает в себя способы, в процессе которых контактное взаимодействие инструмента и заготовки осуществляется непрерывно при их взаимном движении. К таким методам относят: дорнование, выглаживание и обкатывание. Их широкое применение обусловлено относительной простотой реализации.

Дорнование является одним из наиболее эффективных способов отделочно-упрочняющей обработки отверстий, нашедшим широкое распространение в промышленности [18]. Исследования Проскуракова Ю.Г. показывают, что при дорновании повышается прочность прессовых посадок и долговечность деталей, имеющих концентраторы напряжений в виде поперечных отверстий. Результаты опытов показали, что при дорновании отверстия цилиндра из стали 45 его несущая способность может быть повышена в 2,5 раз. Точность после дорнования возрастает до 6-9 качества,

а шероховатость снижается от  $Rz=40...6,3$  мкм до исходной  $Rz=3,2...0,8$  мкм, а в отдельных случаях и до  $Rz=0,8...0,2$  мкм.

Алмазное выглаживание один из простейших способов ППД отличающихся высокой стойкостью инструмента и производительность. [19] Выглаживание позволяет достичь шероховатость  $Ra=0,32-0,1$  мкм. Во время обработки заметно возрастает микротвердость, а в поверхностном слое возникает остаточное напряжение сжатия. Процесс алмазного выглаживания кинематически аналогичен точению. Однако в роле инструмента вместо резца используется алмазный выглаживатель, осуществляющий пластическое деформирование поверхностного слоя, выравнивая и упрочняя его. В исследованиях университета "Gh.Fsahi" по упрочнению поверхностного слоя методом выглаживания роликом [20] представлены эксперименты наглядно демонстрирующие, что в диапазоне подач  $s=0,1-0,2$  мм/об.,  $v=10-15$  м/мин. и силе прижима ролика  $P=900-1200$  Н шероховатость выглаженной поверхности достигает значений  $Ra=0,1...0,2$  мкм.

Метод бесцентрового отделочно-упрочняющего обкатывания напроход является одним из статистических методов обработки ППД. Он обеспечивает повышение качества поверхности деталей машин и долговечности изделия при одновременном увеличении производительности пруда [21]. Выявлено, что в процессе обработки разноразмерность уменьшается с исходных 18 мкм до 6 мкм после обкатывания, осуществляется значительное исправление погрешностей геометрической формы в поперечном сечении. Работы Торбило В.М. [22] показывают, что выглаживанием обрабатываются, не только стали, но и чугуны и даже цветные металлы. Причём обработка сопровождается неизменным увеличением износостойкости и прочности.

На сегодняшней день для повышения качества поверхностного слоя используют способ обработки упрочняющим диском [23]. Исследования приведённые в [24] представляют результаты проведённых экспериментов по восстановлению размеров наружных диаметров на образцах из сталей

1X17H2, 2X18H9, 3X13 методом поверхностного пластического деформирования. Особенность заключается в том, что среди трех рабочих роликов два ролика являются гладкими, а один с кольцевыми канавками специального профиля с шагом 0,15 мм. Ролик с кольцевыми канавками выдавливает материал, в то время как гладкие ролики обжимают его. Это обуславливает контактную поверхность не менее  $2/3$  номинальной. В зависимости от профиля канавки и нажимного усилия, возможно, стабильно поднять диаметр от 1 до 10 мкм. Показатели испытаний демонстрируют, что восстановленные цилиндрические сопряжения сопротивляются повторным нагрузкам лучше, чем, к примеру, притертые на 10-20%.

### 1.2.3. Комбинированные методы отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием

К комбинированным способам обработки относят методы поверхностного пластического деформирования, включающие в себя иные физико-механическое воздействие на заготовку или совмещённые с процессами резания. К таким воздействиям относятся пропускание электрического тока через место контакта инструмента и заготовки, применения ультразвуковых колебаний, лазеры, предварительный нагрев или охлаждение и т.д. [25]

Комбинированная обработка резанием и поверхностным пластическим деформированием (ППД) находят широкое применение в качестве исполнительных элементов в различных машинах и устройствах.

Устройства для комбинированной обработки резанием и ППД позволяют снизить трудоемкость обработки за счёт совмещения получистовой и чистовой обработки. При этом благодаря использованию процесса обкатывания роликами обрабатываемой поверхности, обеспечивается высокое качество по шероховатости поверхности, создаётся упрочнённый слой, улучшающий эксплуатационные свойства деталей.

Оснастка для комбинированной обработки резанием и ППД стали основой для разработки типовых технологических процессов обработки (Рисунок 1.3).

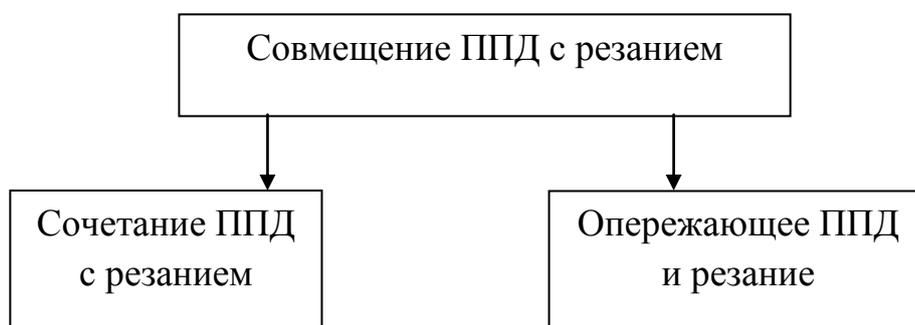


Рисунок 1.3 – Классификация оснастки для комбинированной обработки ППД.

Существуют различные конструкции оснастки для комбинированной обработки резанием и ППД, в том числе отличающихся количеством режущих элементов, число которых не превышает двух. От количества режущих элементов в комбинированных устройствах в значительной степени зависит производительность обработки резанием и ППД, так как режимы обкатывания поверхности роликами и резания резцами различны и связаны с глубиной резания, подачей и скоростью резания. Учитывая, что пятно контакта от деформирующего элемента на обкатываемой поверхности имеет протяженность, измеряемую в миллиметрах, а величины подач для резцов измеряются в десятых долях миллиметра, то могут возникать условия, при которых возможен перенаклёп поверхностного слоя и появление шелушения, что недопустимо. Для того чтобы этого не было, необходимо снижать припуск под обкатывание и повышать точность в поперечном сечении детали при сохранении относительно невысоких скоростей резания. Увеличение скоростей резания, а следовательно, чисел оборотов вращения детали, может вызывать вибрации в системе из-за биения неточной заготовки. Одним из путей повышения производительности комбинированной обработки резанием и ППД штоков является увеличение количества режущих элементов

в устройстве, что позволяет снимать повышенные припуски при увеличении величин подач и исключении возможных прогибов детали под воздействием сил резания в направлении, перпендикулярном к их радиальной составляющей.

В известных устройствах для комбинированной обработки резанием и ППД наблюдается силовое замыкание воздействующих на заготовку усилий, причем радиальное усилие связано с высокой жесткостью обкатной части устройства, а осевое усилие обеспечивается механизмом продольной подачи станка. С учетом того что жесткость всех механизмов продольной подачи станка может быть довольно велика, основным упругим элементом в системе может оказаться заготовка, продольная жесткость которой будет являться фактором, влияющим на качество ее обработки с использованием устройства для комбинированной обработки резанием и ППД.

Иными словами, возникает необходимость в обеспечении обработки поверхностей нежестких заготовок типа полый цилиндр после обтачивания обкатыванием роликами с регламентированным осевым усилием.

Метод размерно-совмещенного обкатывания (PCO) представляет собой упрочняющую обработку, при которой резец срезает наплыв материала, возникающий перед деформирующим инструментом в направлении подачи. Этот метод наглядно представлен в работах Смелянского В.М. описывающих превосходство метода за счёт того, что функции размерообразования детали в значительной мере переданы от резца к ролику, вследствие чего понижается влияние износа резца на точность обработки. Испытания показывают, что натяг способен достигнуть 1 мм на ролик без разрушения поверхности материала. [26,27,28]

Работе [29] демонстрирует возможность совмещения метода ППД с обработкой резанием, на многоцелевых станках, что в свою очередь повысит качество поверхностного слоя и их точность, позволит расширить внедрение методов ППД при обработке отверстий в корпусных изделиях.

В работе [30] представлен метод позволяющей сперва наносить рельеф резцом, а затем сглаживать его частично деформирующим инструментом. Исследования показывают, что данный метод формирования микрорельефа поверхности исключает образование наплывов.

Электромеханический метод обработки выделяется на фоне других за счет мелкодисперсной и твердой структуры поверхностного слоя изделия, обладающего высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Принцип упрочнения метода обработки ППД заключается в процессе обработки через место контакта деформирующего инструмента с изделием. Пропускается ток большой силы с низким напряжением. В результате выступающие неровности поверхностного слоя изделия подвергаются значительному нагреву. Микронеровности под давлением деформирующего инструмента сглаживаются, что в свою очередь приводит к упрочнению поверхностного слоя изделия.

Использование ультразвуковых колебаний является отдельным научным направлением. При прочих равных условиях удается снизить прикладываемую к инструменту силу в 2,5...3 раза [31].

Эксперименты, проводимые в физико-технических институтах КуАИ, МАИ, АН БССР и др. демонстрируют, воздействие ультразвуковых колебаний на поверхностный слой металла приводит к ощутимому понижению механических свойств материала изделия. Это даёт возможность применять ультразвук в качестве интенсификации ППД поверхностного слоя металла, открывая тем самым новые возможности технологического упрочнения.

Особенно это актуально для нежестких изделий, изготавливаемых из высокопрочных материалов [32]. Результаты, представленные в данном исследовании, четко демонстрируют, что при ультразвуковом упрочнении, наряду с формированием благоприятных сжимающих остаточных напряжений, имеет место значительное повышение чистоты обрабатываемой

поверхности, вплоть до 2-5 классов точности. Изделия, упрочнённые данным методом способны выдержать нагрузку при эксплуатации по сравнению со шлифованными в 4-5 раз больше до разрушения.

Испытания, приведённые в исследовании [33] демонстрируют значительное увеличение предела выносливости деталей на 40-48% и улучшением чистоты обработанной поверхности на 2-3 класса точности по сравнению со шлифованием.

Исследования [34] демонстрируют метод увеличения ресурса работы изделия за счет применения метода ультразвукового упрочнения (УЗУ) несвязанными шариками. Результатом внедрения метода УЗУ стало упрочнение поверхностного слоя на глубину в 100 мк. при значении твердости на 7% выше подсчитанной по зависимостям. Метод увеличивает контактную выносливость изделия на 35-40%, что в свою очередь приводит к значительному повышению долговечности детали.

Деформирующее протягивание [35] также использует ультразвуковые колебания. В результате удаётся ощутимо снизить силы трения. Это происходит благодаря изменению кинематики скольжения инструмента, тем самым увеличивая качественные характеристики обработанной поверхности. Доказано что УЗУ оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное и энергетическое состояние поверхности материала. В таком случае максимальное значение интенсивности деформации и энергетического возбуждения находятся на некотором расстоянии от поверхности.

Исследование [36] демонстрирует воздействие луча лазера с ультразвуковым инструментом (ЛУЗО) одновременно и комбинированное (Л+УЗО) воздействие. Внедрение ЛУЗО и Л+УЗО приводит к микротвердости поверхностного слоя, увеличивая в 4-5 раз. Шероховатость поверхностного слоя изменяется от  $Ra=0,63$  мкм до  $Ra=0,25$  мкм. При этом в

поверхностном слое материала возникает остаточные микронапряжения сжатия.

На сегодняшний день упрочнение обкатывания шариком в сочетании с лазерной обработкой является одним из наиболее актуальных и перспективных методов упрочняющей комбинированной обработки. Обработка лазерным лучом дополнительно повышает твердость предварительно упрочненной методами ППД поверхности в значительных пределах.

К перспективным методам комбинированной обработки необходимо отнести деформирующее-легирующее упрочнение с введением в контактную зону инструмента с деталью электрического тока [37].

Комбинированные методы упрочняющей обработки ППД использующие химико-физические свойства [38] продемонстрировали ряд достоинств. Импульсное анодирование поверхности (ИА) в кислотных растворах в комбинации с методами упрочнения ППД, сопровождается увеличением микро-твердости и шероховатости ( $Ra=0,035 \dots 0,06$  мкм).

С увеличением рабочей температуры, коэффициент трения деталей обработанных электроискровое легирование поверхности (ЭИЛ) твердыми износостойкими металлами в комбинации с выглаживанием в 1,5...2 раза меньшим, нежели для изделий обработанных после химико-термической обработки (ХТО) в расплавах карбонатных солей щелочных металлов в комбинации с тем же выглаживанием.

Теоретически и экспериментально доказана возможность обеспечения высоких физико-механических и геометрических характеристик качества поверхностного слоя посредством нанесения твердосплавных покрытий с последующим импульсным пластическим деформированием. В результате шероховатость поверхностного слоя снижается до  $Ra=0,4$  мкм. Износостойкость изделия возрастает на 10-50%. Микротвёрдость достигает 14260 МПа.

### 1.3. Увеличение износостойкости и эксплуатационных возможностей деталей при обработке поверхностным пластическим деформированием

Эксплуатационный срок использования деталей и агрегатов, в первую очередь определяется эксплуатационными свойствами деталей находящихся в условиях наибольшего нагружения. К факторам, оказывающим влияние на долговечность изделий, прежде всего, относятся: микрорельеф поверхности, прочность поверхностного слоя, геометрические параметры, износостойкость и др.

В независимости от видов нагрузки воздействующих на деталь наибольшее влияние испытывает поверхности изделий. Их поверхностный слой наиболее интенсивно подвержен влиянию внешних факторов окружающей среды.

Технически процесс обработки деталей в первую очередь демонстрирует эксплуатационные характеристики поверхностного слоя изделия. Вследствие чего методы упрочнения деталей при помощи поверхностного пластического деформирования являются наиболее эффективными методами упрочнения поверхностного слоя по сравнению с другими способами финишной обработки. Эта тенденция подтверждается рядом исследований.

Работа Одинцова Л.Г. [39] наглядно демонстрирует увеличение износостойкости и эксплуатационных возможностей деталей, упрочнённых методом алмазного выглаживания на 60-90% по сравнению с не обработанными изделиями. Параметры были сняты после пробега в 42000 км. Таким образом, износ деталей значительно снижается за счет применения ППД.

Исследования Барацем Я.И. продемонстрировали повышение эксплуатационных характеристик контактирующей пары поршень-корпус. Он сочетал методы упрочнения ППД с нанесением регулярного микрорельефа.

При опытно-промышленных испытаниях метода обработки проводились исследования выявляющие влияние параметров и режимов обработки на герметичность сопряжения, прирабатываемость и износостойкость поверхностей находящихся в контактном взаимодействии.

Шнейдору Ю.Г. удалось доказать, что наиболее актуальным регулярным микрорельефом, для данной детали, является частичный РМР с соприкасающимися канавками [40].

Исследования Горохова В.А. демонстрировали результаты износа и прирабатываемости титановых изделий вследствие обработки вибро-обкатыванием, обкатыванием, точением и шлифованием. В итоге экспериментальные результаты продемонстрировали эффективности применения ППД. Износ приработки упрочнённых поверхностей был меньше в 2 раза. Это доказывает, что увеличение износостойкости изделий из титанового сплава увеличивается на 50% вследствие оптимизации геометрических и на 40% вследствие оптимизации физических параметров обрабатываемых методами поверхностного пластического деформирования.

Из изделий подвергающихся воздействию трению во время эксплуатации значительное место занимают резинометаллические пары. Среди которых наиболее характерными являются шейки валов, состоящих в контактном взаимодействии с манжетными уплотнениями.

При финишной обработке шлифованием, полированием, алмазным выглаживанием для оценки износостойкости металлических поверхностей детали проведены испытания образцов на машине трения. Результаты наглядно демонстрируют, что упрочнение методом алмазного выглаживания

в 1,5-2 раза меньше изнашивается по сравнению с полированием и в 5 раз меньше по отношению со шлифованием.

При упрочнении щетками титановых сплавов прирост твердости достигает 20-30%. Толщина упрочненного слоя достигает 0,1-0,3 мм. Испытания наглядно показывают, что обработка щетками влечёт за собой снижение среднего арифметического отклонения микропрофиля шлифованных поверхностей приблизительно в 1,1-1,3 раза. Микротвердость поверхности закаленных сталей увеличивается на 15-30%. Износ понижается на 30-40% по отношению со шлифованными поверхностями. К тому же время приработки уменьшается практически в 1,5-2,3 раза. Это в свою очередь благоприятно сказывается на увеличении износостойкости заготовки.

Ультразвуковое упрочнение повышает эксплуатационный предел выносливости титановых изделий на 40-50% по отношению со шлифованием. Чистота поверхности после ультразвукового упрочнения возрастает на 1,5-3 класса по сравнению с изначальной.

Метод термического упрочнения повышает эксплуатационные возможности и выносливости детали за счет формирования оптимальных полей остаточных напряжений в теле детали.

Задачи по созданию полей остаточных напряжений решается двумя этапами. Для начала определяется температурное поле, а затем рассчитывается остаточное напряжение и ППД.

Пример крупноразмерных и ступенчатых валов изготовленных в ЦНИИТМАШе производились испытания по изучению усталостной прочности. В ходе испытаний были получены результаты показывающие, что наклеп приводит к значительному увеличению усталостной прочности.

Исследования качества поверхностного слоя на усталостную прочность предварительно обработанных точением титановых изделий, подвергнутых Упрочнению ППД проводимые в Санкт-Петербургском инженерно-

экономическом институте показали, что обработка шариками с увеличением усилия усталостная прочность увеличивается. При обкатке роликами с усилием 50 и 100 кГ она составляет 50-52 кГ/мм, а с увеличением усилия до 150-200 кГ снижается до 30-40 кГ/мм.

Изучение микрорельефа обкатанных изделий показало, что в результате поверхностной пластической деформации в поверхностном слое изделия формируется неоднородность структуры, влияющая на усталостную прочность.

Вибрационный метод упрочнения демонстрирует возможности повышения долговечности деталей. Прежде всего, это обусловлено особым строением микрорельефа поверхностного слоя изделия и физико-механическими свойствами поверхности металла.

Работы Бабичева А.П. по использованию виброгалтовки для изучения качества поверхностного слоя материала раскрыло ряд перспектив. Суть эксперимента проста. Виброгалтовка применялась в отожженном и закаленном состоянии с использованием рабочей среды ЭБ40СТ1К. Эксперимент продемонстрировал, что в первый период обработки, возникает резкое уменьшение шероховатости поверхности деталей. После такой обработки создается микрорельеф поверхности, выделяющийся отсутствием направленных следов обработки. Шероховатость поверхностного слоя почти равнозначна во всех направлениях. Причём как по форме, так и по величине. Одним из свойств полученной поверхности является повышенная активность и адгезия. Благодаря этому появляется возможность в процессе виброгалтовки наносить износостойкие покрытия, такие как пленку дисульфида молибдена, фосфатные и др. Результатом стало упрочнение поверхностного слоя и улучшения формы микрорельефа. К тому же после всех способов дробеструйной обработки, снижается интенсивность изнашивания изделий.

Работа Кудрявцева И.В [41] установила, что в ходе обработки в дробеметной установке (ДМУ) деталей из высокопрочного чугуна твердость поверхности увеличилась на 34%, предел выносливости вырастает на 15% при глубине упрочнения 0,5 мм.

Способы ДМУ и ГДУ существенно влияют на повышение, малоциклового ударной усталостной прочности высокопрочной закаленной стали и её долговечности. Предел выносливости образцов из различных сталей и цветных сплавов, упрочненных методом ГДУ, повышается на 30-90%, а долговечность – на 450-900%.

Повышение качества поверхностного слоя материала обеспечивается за счет комбинированного статико-импульсного приложения нагрузки к деформирующему инструменту. Предударное статическое нагружение создает благоприятные условия для более полной передачи энергии ударного импульса материалу детали. Импульсная передача энергии в зону локального контактного взаимодействия детали и инструмента позволяет интенсифицировать процесс ППД, приводит к углублению активной зоны. Шероховатость поверхности при обработке приближена к шероховатости поверхности при статическом ППД.

Эффективно так же сочетание высокотемпературной термической обработки с поверхностно пластическим деформированием. Исследовалось влияние обкатки роликами на упрочнение поверхности, образцов стали 60С2А после обычной закалки и ВТМО. Наблюдались, большие упрочнения обрабатываемой стали, повышенный запас пластичности после ВТМО позволяет проводить более интенсивное упрочнение без снижения поверхностной микро-твердости.

#### 1.4. Повышение производительности методов статического ППД

Существуют множество возможностей повышения производительности статической обработки поверхностным пластическим деформированием.

Производительность алмазного выглаживания определяется подачей и скоростью обработки, поэтому эти параметры необходимо выбирать, возможно, большими в пределах, обеспечивающих требуемое качество поверхности.

#### 1.5. Общие сведения о поверхностях и их контакте

В повседневной жизни мы часто сталкиваемся с феноменами трибологии – науки описывающей явления трения, износа, смазки и взаимодействия контактирующих поверхностей при их взаимном перемещении. Любой продукт, где один материал скользит или трется о другой, подвергается воздействию сложных физических взаимодействий. Трибология играет важную роль в современном производстве. В процессах металлообработки трение сопровождается более сильным ускорением износа инструмента, что в свою очередь сказывается на мощностях, необходимых для обработки детали. Это приводит к увеличению затрат из-за более частой смены инструмента, потери допусков при смещении размеров инструмента и больших усилий, необходимых для формирования детали. Исследования трибологии широко применяются в машиностроении [42].

Топография поверхности определяет состояние износа. Грубые поверхности имеют более высокий коэффициент трения по сравнению с гладкими поверхностями. Шероховатость играет важную роль в определении того, как изготовленная деталь будет взаимодействовать с окружающей средой. При контакте шероховатые поверхности чувствительны к микрорельефу поверхностного слоя. Небольшие изменения в распределении высоты, ширины и кривизны пиковых значений неровностей может оказать заметное влияние на процесс получения необходимой шероховатости.

Даже поверхность, прошедшая через тщательное шлифование и полирование имеет неравномерную микрогеометрию поверхностного слоя по

всей длине детали. Когда два тела с номинально плоскими поверхностями контактируют, площадь реального контакта обычно будет составлять лишь малую часть номинальной площади контакта (Рисунок 1.4). Мы можем визуализировать контактные области как небольшие области, где неровности поверхностного слоя одного твердого тела сжимаются при контакте с неровностями другого твердого тела. В зависимости от условий деформации они могут деформироваться упруго или пластически [43-44].

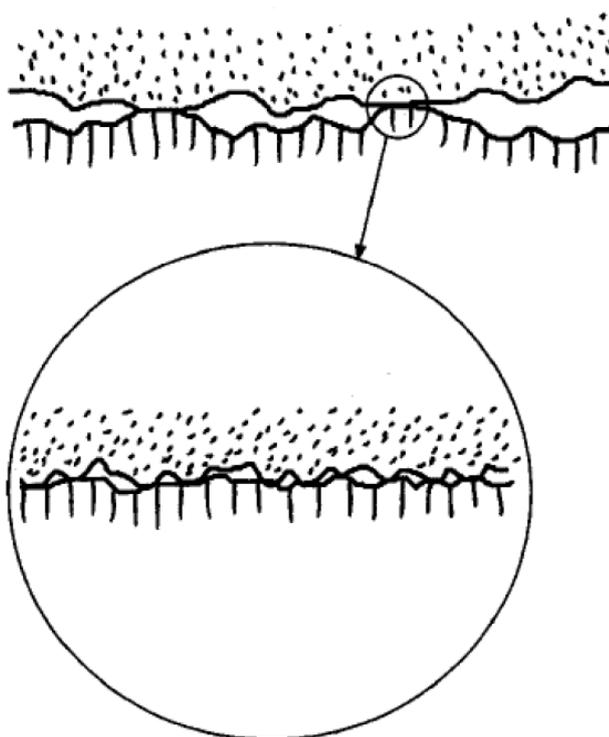


Рисунок 1.4 - Контакт между двумя шероховатыми поверхностями.

В прошлом многие авторы проводили исследования микрогеометрии поверхностного слоя. Классический анализ упрощает предположения о топографии поверхности и его деформировании. Традиционно поверхности моделировались аналитически с использованием допущений и упрощений. Неровности были смоделированы как разнообразие геометрических форм. Поверхностная высота выступов и структура контакта рассматривались как распределения вероятностей. Поведение одной пары взаимодействующих неровностей часто экстраполировалось для описания поведения пары взаимодействующих поверхностей, покрытых неровностями [45]. Эти

предположения были приняты, не потому что они показывали точное представление о структуре шероховатости, а потому, что они сделали возможным моделирование. В 1950-х и 60-х годах, когда большая часть этой работы отвечала требованиям времени, альтернативы не было. Однако фактическая площадь контакта микрорельефа поверхностей, изменения, происходящие при нагрузке и относительные движения, являются важными параметрами в понимании многих трибологических явлений, таких как жесткость соединений, износ, адгезия (сцепление поверхностей разнородных твердых и/или жидких тел), сила трения, фрикционное нагревание, тепловой и электрический контакт, сопротивление и утечка жидкости [46].

До сих пор при анализе не учитывались эффекты шероховатости поверхности из-за трудности создания модели шероховатой поверхности, а также для упрощения модели с целью сокращения времени расчета. Однако многие инженерные области, такие как MEMS (проектирование и моделирование микроэлектромеханических систем), стремятся развить возможности систем для проектирования и моделирования поверхностей. Таким образом, с опережением численных возможностей топография поверхностного слоя может быть включена в моделирование с использованием конечных элементов [47].

#### 1.6. Особенности микрогеометрии и её влияние поверхности находящиеся в контакте

Отдельное изучение микрогеометрии поверхности и периодической микроструктуры одинаковых неровностей дает нам глубокое понимание процесса точечной деформирования. Однако общей деформация намного сложнее: формы неровностей не так просты, как считалось, ширина, высота и вертикальное положение подчиняются правилам распределения из-за фрактальной природы шероховатых поверхностей. Простые геометрические и аналитические модели не могут объяснить все эти аспекты. Таким образом,

необходимы полномасштабные анализы конечных элементов, чтобы лучше понять общей деформацию шероховатой поверхности.

Геометрия поверхности многих компонентов и систем не всегда известна и не всегда измеряется. Эти условия затрудняют исследование микрогеометрии поверхности. Математическое моделирование контактных поверхностей является обычным явлением, но большинство моделей содержат обширные предположения о форме и размере неровностей.

### 1.7. Методология исследования

На рис.1.3. представлена блок-схема методологии исследования. Исследование начинается с обзора научной литературы из многочисленных работ многих исследователей. Более того, анализируется конкретный эксперимент, который был сделан ранее в качестве литературных данных. Результат моделирования сравниваются с экспериментальными данными с использованием коммерческого программного обеспечения конечных элементов ABAQUS 6.10-1. Исследование было проведено для анализа результатов симуляции под наблюдением руководителя. Исследование проводилось из анализа процесса, направленного на завершённую ранее модель шероховатой поверхности из алюминиевого сплава в качестве материала.

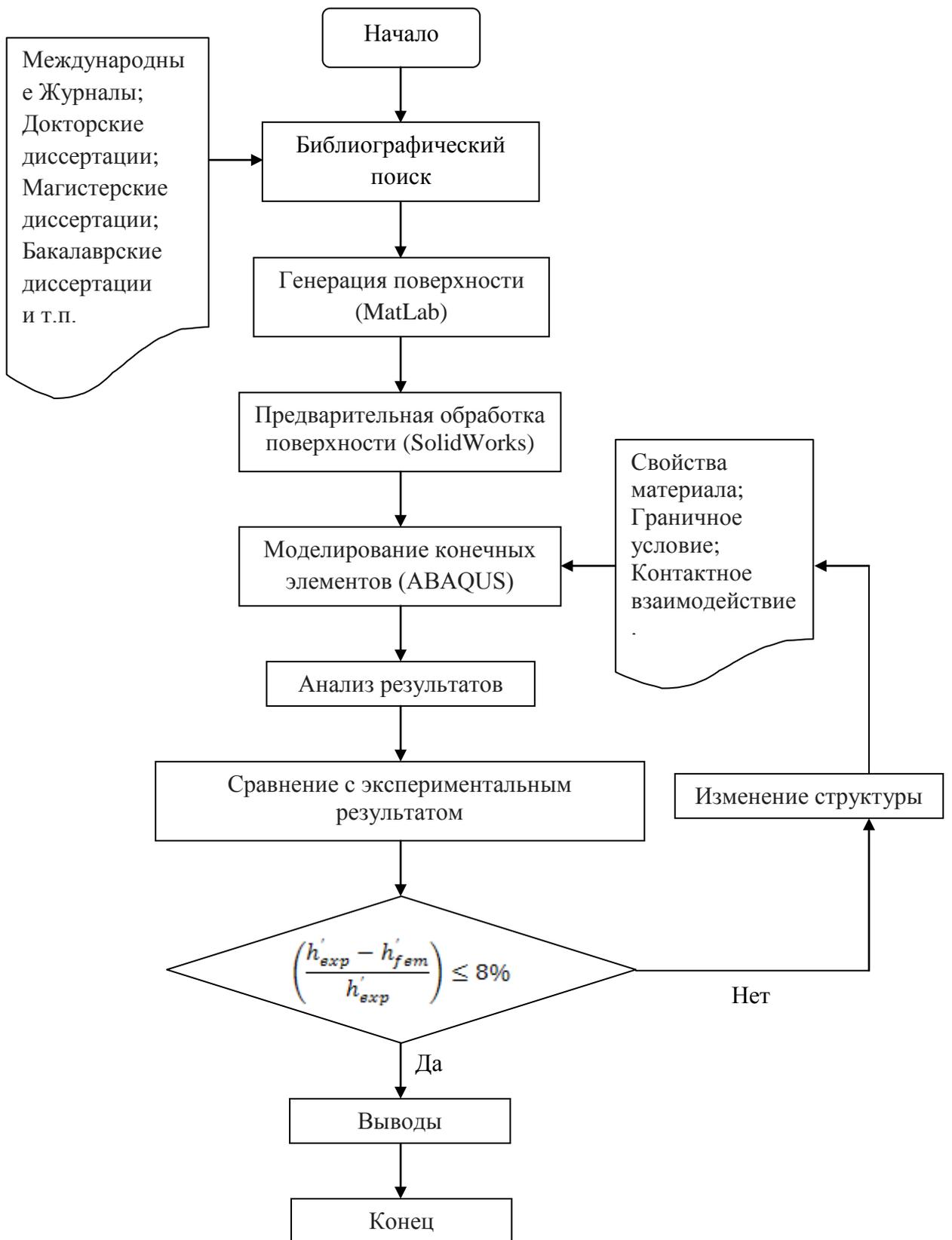


Рисунок 1.5 - Блок-схема методологии исследования.

## 2. ОСНОВЫ КОНТАКТНОЙ МЕХАНИКИ

### 2.1. Теории контактных явлений и их развитие

Контактные явления широко распространены в повседневной жизни и играют очень важную роль в инженерных структурах и системах. К ним относятся трение, износ, адгезия и смазка. На внешних поверхностях деталей и компонентов имеют место термические, физические и химические процессы. Механика контактов - это изучение относительного движения сил и трибологического поведения двух твердых поверхностей, которые касаются друг друга или втираются, друг в друга по областям их границ. Однако контакт между деформируемыми телами очень сложен и еще малоизучен.

Контактная теория была первоначально разработана Генрихом Рудольфом Герцем [48] и остается основой для большинства контактных проблем, встречающихся в машиностроении. Теория относится к контакту двух упругих тел с гладкой поверхностью и могут быть описаны с ортогональными радиусами кривизны, такими как тор (тороид). Кроме того, размер фактической площади контакта должна быть небольшой по сравнению с размерами всего тела и радиусом его кривизны. Герц сделал предположение, основанное на наблюдениях, что площадь контакта эллиптически по форме для таких трехмерных тел. Уравнения упрощаются, когда площадь контакта круглая, например, со сферами, находящимися в контакте. При чрезвычайно эллиптическом контакте предполагается, что контактная площадь имеет постоянную ширину по длине контакта, например, между параллельными цилиндрами. Теория Герца ограничена трением поверхностей упругих твердых тел. С тех пор эту теорию развивали такие исследователи как Джонсон, Кендалл, Робертс и Борис Дерягин.

Дальнейшее продвижение в области контактной механики произошло в середине 20-го века Боуденом Ф.П. и Тейбором Д. [49-50] Было подчеркнута важность шероховатости поверхности для тел, находящихся в контакте.

Благодаря исследованию шероховатости поверхности истинная площадь контакта между телами оказывается меньше, чем кажущаяся площадь контакта. Такое понимание решительно изменило направления изучения в трибологии. Работы Боудена и Тэйбора дали несколько теорий в контактной механике шероховатых поверхностей.

Вклад Archard J.F. [51] также следует упомянуть при обсуждении новаторских исследований в этой области. Archard пришел к выводу, что даже для грубых упругих поверхностей контактная площадь приблизительно пропорциональна нормальной силе. Дальнейшие важные сведения по этим направлениям были даны Greenwood, J.A. и Williamson J.B.P [52]. Основными результатами их работ стало то, что истинная контактная поверхность в грубых материалах обычно пропорциональна нормальной силе, в то время как параметры отдельных микроконтактов практически не испытывают зависимости от нагрузок.

### 2.1.1. Упругий контакт

В области упругой поверхности контакта  $A_e$ , контактное усилие  $P_e$ , максимальное контактное давление  $p_m$  и среднее контактное давление  $p$  могут быть выражены в функции интерференции  $\omega$ . Выведенное из теории Герца [53] уравнение площади поверхности контакта для упругого контакта выражается в виде:

$$A_e = \pi \cdot R \cdot \omega \quad (2.1)$$

Сила контакта  $P$ , получена из уравнения  $\delta = \frac{\pi \alpha p_m}{2E}$ , тогда

$$\delta = \left( \frac{9P_e^2}{16RE^2} \right)^{1/3}$$

$$\delta^3 = \frac{9P_e^2}{16RE^2}$$

$$P_e^2 = \frac{16}{9} E^2 R \delta^3$$

$$P_e = \left( \frac{16}{9} E^2 R \delta^3 \right)^{1/2}$$

$$P_e = \frac{4}{3} E R^{1/2} \omega^{3/2} \quad (2.2)$$

Максимальное контактное давление  $p_m$ , получается из уравнения

$a = \frac{\pi p_m R}{2E}$ , из чего следует:

$$p_m = \frac{2E\omega}{\pi a} = \frac{2E\omega}{\pi(\omega R)^{1/2}}$$

$$p_m = \frac{2E}{\pi} \left( \frac{\omega}{R} \right)^{1/2} \quad (2.3)$$

Средняя контактная упругость  $p$  определяется по формуле:

$$p_e = \frac{2}{3} p_m = \frac{4E}{3\pi} \left( \frac{\omega}{R} \right)^{1/2} \quad (2.4)$$

В 1951 г. Табор [54] заявил, что максимальное контактное давление Герца достигает  $P_m=0,6 H$  на начало выхода так, что среднее давление  $p=0,4 H$ . Из этого соотношения можно получить среднее контактное давление  $p$  с твердостью  $H$  во время начальной точки текучести:

$$p = kH \quad (2.5)$$

Связь между максимальными контактными давлениями с твердостью во время начальной точки текучести выражается уравнением:

$$p_m = kH \quad (2.6)$$

Подставляя уравнение (2.6) в уравнение (2.3), критическая интерференция  $\omega_{1-CEB}$  определяется формулой:

$$\omega_{1-CEB} = \left( \frac{\pi k H}{2E} \right)^2 R \quad (2.7)$$

KE [55] модель использует значение  $k$ , поэтому критическая интерференция  $\omega_{1-KE}$  в начале выхода:

$$\omega_{1-CEB} = \left( \frac{\pi k H}{2E} \right)^2 R \quad (2.8)$$

Где  $k_{KE} = 0,454 + 0,41\nu$  - коэффициент Пуассона.

Zhao, Maietta и Chang [56] получают критическую интерференцию, основанную на среднем контактом давлении, путем подстановки уравнения (2.5) в уравнение (2.4), получая критическую интерференцию  $\omega_{1-ZMC}$ :

$$\omega_{1-ZMC} = \left( \frac{3\pi k_{ZMC} H}{4E} \right)^2 R \quad (2.9)$$

Где  $k_{ZMC} = 0,4$

Когда  $\omega < \omega_1$  контакт является упругим. В случае, когда  $\omega \geq \omega_1$  контакт является эластично-пластичным или полностью пластмассовым.

### 2.1.2. Пластичный контакт

Полностью пластичный контакт возникает, когда помехи увеличиваются и достигают среднего значения контактного давления (Рисунок 2.1). В полностью пластическом контакте используют контактную пластиковую модель.

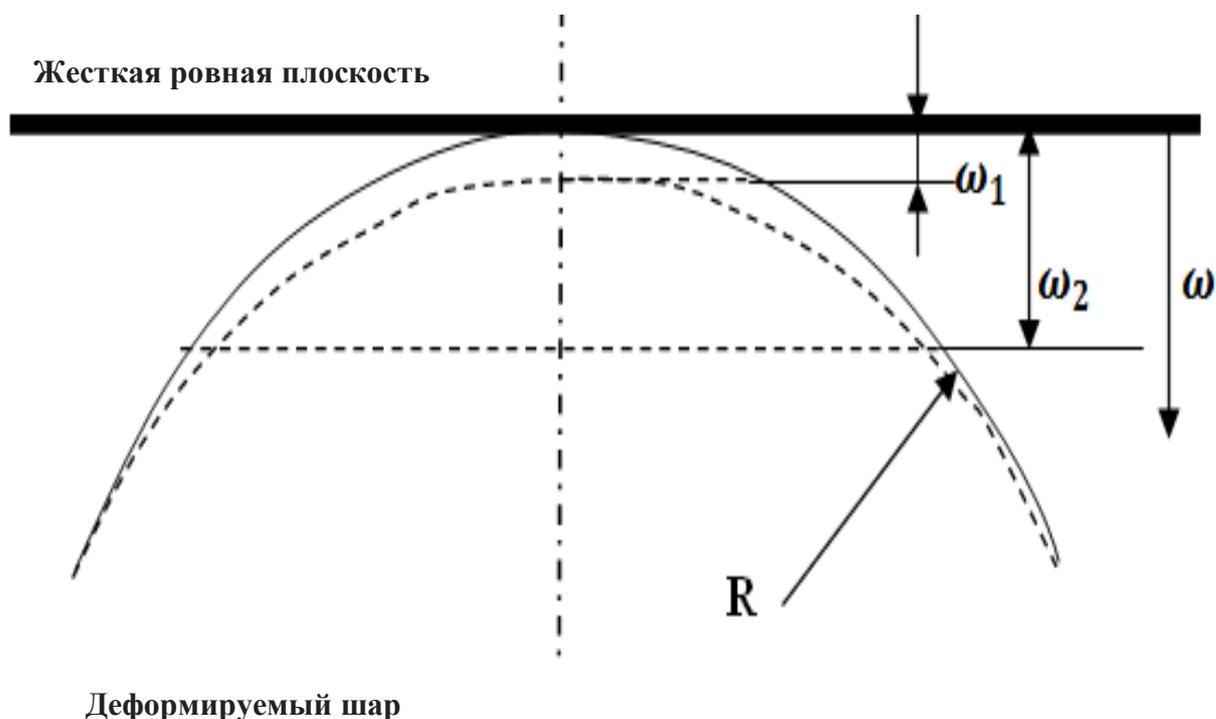


Рисунок 2.1 - Деформация неровности.

Во время деформации среднее контактное давление остается постоянным при значении  $H$  или:

$$p_{p-zmc} = H \quad (2.10)$$

Площадь контактной поверхности модели с использованием моделирования пластических контактов определяется по формуле:

$$A_{p-zmc} = 2\pi R\omega \quad (2.11)$$

Контактные усилия  $P_p$  равны площади контактной поверхности, умноженной на среднее контактное давление.

$$P_{p-zmc} = 2\pi R\omega H \quad (2.12)$$

Минимальное значение  $\omega_2$  на основании результатов Джонсона [20] показывает, что полностью пластическое состояние возникает, когда контактное усилие на полностью пластичном  $P_p$  ( $\omega = \omega_2$ ) примерно в

четыреста раз превышает контактную силу в точке начального выхода  $P_y$  ( $\omega = \omega_1$ ) или:

$$\frac{P_p}{P_y} = 400 \quad (2.13)$$

Используя уравнение (2.2), получаем:

$$P_y = \frac{4}{3}ER^{1/2}\omega_1^{3/2} \quad (2.14)$$

Из чего следует:

$$P_p \leq \frac{4}{3}ER^{1/2}\omega_1^{3/2} \quad (2.15)$$

Поделив уравнение (2.15) на уравнение (2.14), получим:

$$\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^{3/2} \geq \frac{P_p}{P_y} = 400 \quad (2.16)$$

или

$$\omega_2 \geq 54\omega_1 \quad (2.17)$$

Из приведенного выше уравнения определяют величину интерференции в полностью пластическом пределе  $\omega_{2-ZMC}$  к значению критической интерференции в точке текучести с помощью уравнения:

$$\omega_{2-ZMC} \geq 54\omega_{1-ZMC} \quad (2.18)$$

Значение помех в полностью пластичном пределе  $\omega_{2-KE}$  значения критической интерференции при пределе текучести  $\omega_{1-KE}$  равен:

$$\omega_{2-KE} = 110\omega_{1-KE} \quad (2.19)$$

### 2.1.3. Эластично-пластиковый контакт

Упругопластический контакт – это переход от упругого к полностью пластическому контакту. Эластично-пластический контакт возникает, когда интерференция находится между  $\omega_1$  и  $\omega_1 < \omega < \omega_2$ . При соприкосновении поверхностей возникает деформация, состоящая из упругой и пластической деформации. Соотношение между площадью контактной поверхности и средним контактным давлением в зависимости от интерференции является очень сложным соотношением. Соотношение между средним контактным давлением и интерференцией в упругопластическом контакте:

$$P_{ep-ZMC} = H - H(1 - k) \frac{\ln \omega_2 - ZMC - \ln \omega}{\ln \omega_2 - ZMC - \ln \omega_1 - ZMC} \quad (2.20)$$

В то время как площадь поверхности контакта выражается как:

$$A_{ep-ZMC} = \pi R \omega \left[ 1 - 2 \left( \frac{\omega - \omega_1 - ZMC}{\omega_2 - ZMC - \omega_1 - ZMC} \right)^3 + 3 \left( \frac{\omega - \omega_1 - ZMC}{\omega_2 - ZMC - \omega_1 - ZMC} \right)^2 \right] \quad (2.21)$$

Используя уравнение (2.20) и (2.21) упругопластическая контактная сила представляет собой произведение между средним контактным давлением с площадью поверхности контакта:

$$P_{ep-ZMC} = \left[ H - H(1 - k) \frac{\ln \omega_2 - ZMC - \ln \omega}{\ln \omega_2 - ZMC - \ln \omega_1 - ZMC} \right] \cdot \left[ 1 - 2 \left( \frac{\omega - \omega_1 - ZMC}{\omega_2 - ZMC - \omega_1 - ZMC} \right)^3 + 3 \left( \frac{\omega - \omega_1 - ZMC}{\omega_2 - ZMC - \omega_1 - ZMC} \right)^2 \right] \quad (2.22)$$

Зависимость среднего контактного давления от интерференции при упругопластическом контакте с уравнением:

$$\left( \frac{P_{ep-KE}}{Y} \right) = 1,19 \left( \frac{\omega}{\omega_{1=KE}} \right)^{0,289} \quad \text{для} \quad 1 \leq \frac{\omega}{\omega_{1=KE}} \leq 6 \quad (2.23)$$

$$\left( \frac{P_{ep-KE}}{Y} \right) = 1,61 \left( \frac{\omega}{\omega_{1=KE}} \right)^{0,117} \quad \text{для} \quad 6 \leq \frac{\omega}{\omega_{1=KE}} \leq 100 \quad (2.24)$$

Где  $Y$  - предел текучести материала.

В то время как связь между поверхностями в контакте интерференционная функция упругопластического контакта представлена в уравнении:

$$\frac{A_{ep-KE}}{A_{c-KE}} = 0,93 \left( \frac{\omega}{\omega_1} \right)^{1,136} \quad \text{для} \quad 1 \leq \frac{\omega}{\omega_1-KE} \leq 6 \quad (2.25)$$

$$\frac{A_{ep-KE}}{A_{c-KE}} = 0,94 \left( \frac{\omega}{\omega_1} \right)^{1,146} \quad \text{для} \quad 6 \leq \frac{\omega}{\omega_1-KE} \leq 110 \quad (2.25)$$

$A_{c-KE}$  является важной контактной областью, когда  $\omega = \omega_1-KE$ .

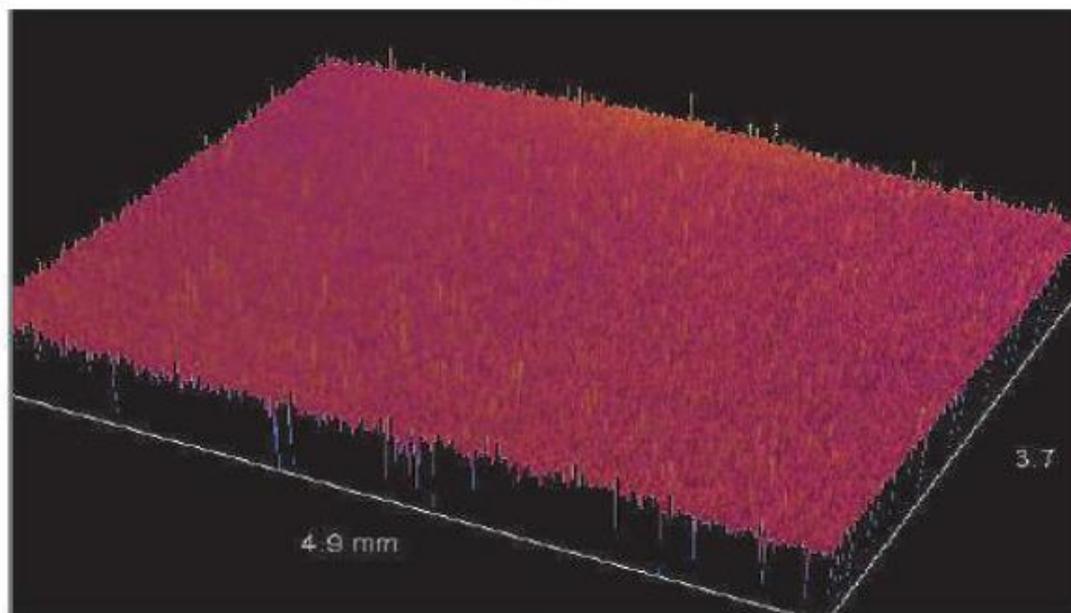
## 2.2. Топография поверхности: текстура поверхности, шероховатость, волнистость

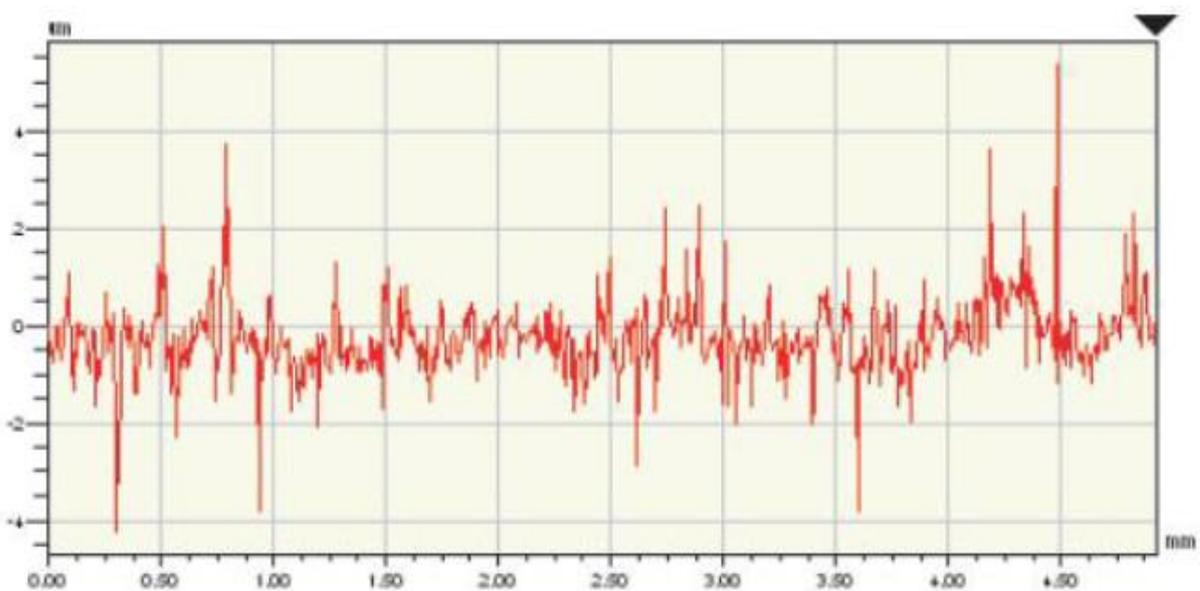
Топография поверхности - это трехмерное представление геометрических неровностей поверхности. Поверхность может быть шероховатой или гладкой в зависимости от величины и расстояния между вершинами и впадинами, а также в зависимости от того, как получается поверхность. Текстура поверхности относится к локально ограниченному отклонению поверхности от идеальной геометрии детали.

Для анализа влияния шероховатости на различные трибологические параметры требуются параметры поверхности. Шероховатость относится к близко расположенным неровностям, оставленным на поверхности в процессе обработки. Волнистость - это компонент текстуры, на который накладывается шероховатость. Это относится к неровностям, возникшим от вибраций, термической обработкой или деформацией. Шероховатость поверхности не может быть легко определена одним параметром. Фактически, есть несколько способов представить грубость поверхностного слоя. Все шероховатые поверхности имеют высоту и длину волны, при этом

первая измеряется под прямым углом к поверхности, а вторая в её плоскости. Распределение высоты измеряется от базовой плоскости [57].

Характеристика поверхности может быть одномерной или двумерной в зависимости от процесса механической обработки. Для одномерного случая высота  $z$  изменяется с одной из координат, тогда как в другой координате существует кривая, где изменение  $z$  сравнительно невелико. Но для поверхностей, образовавшихся путём применения обычных методов обработки, когда одномерная характеристика не подходит, требуется описание двумерных шероховатостей поверхности. Атомный силовой микроскоп и трехмерный поверхностный профилометр используются для улучшения разрешения и точности измерения шероховатости. Типичные одномерные и двумерные изображения номинально плоских поверхностей показаны на рисунке 2.2.а и б. Масштаб, используемый для высоты, намного больше, чем для длины волны, потому что высота неровностей от средней плоскости меньше по сравнению с длинами волн [58].





а – двумерная; б – одномерная. Рисунок 2.2 Типичное представление поверхности.

### 2.3. Контактная проблема гладких поверхностей

Изучение деформации тел разделено на два подхода. В первом случае, поверхность представляют плавной. Их геометрию можно упростить для описания параметров. Второй подход допускает, что все поверхности состоят из множества высот и впадин, которые имеют несколько неровностей, считающихся шероховатой поверхностью. Герц впервые проанализировал упругий контакт между двумя несоответствующими сферами. Он дал аналитическое решение для нормального контакта между двумя изогнутыми телами для контактного давления и внутренних напряжений.

В анализе Герца были сделаны следующие предположения:

- Радиусы кривизны контактирующих тел велики по сравнению с радиусом окружности области контакта.
- Контакт без трения.
- Поверхности являются непрерывными и несоответствующими друг другу.

– Каждое твердое тело можно рассматривать как полупространство.

Исходя из этих предположений, можно проанализировать поля напряжений, генерируемых индентором, контактирующим с упругой поверхностью [59]. В случае упругого контакта со сферическим индентором радиуса  $R$  контакт между индентором и поверхностью увеличивается с нагрузкой. Распределение контактного давления  $p$ , определяется формулой:

$$p = p_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{1/2} \quad (2.26)$$

Полная контактная нагрузка  $P$  может быть получена из вышеупомянутого распределения давления:

$$P = \int_0^a p(r) 2\pi r dr = \frac{2}{3} p_0 \pi a^2 \quad (2.27)$$

Где максимальное давление  $p_0=3/2$ , с  $p_m$  обозначающее среднее давление. Радиус контактной окружности  $a$  задается:

$$a^3 = \frac{3PR_e}{4E} \quad (2.28)$$

$E$  является эффективным модулем упругости и  $R_e$  представляет собой эффективный радиус кривизны, определяемый как:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (2.29)$$

$E_1, \nu_1, R_1$  - модуль Юнга, коэффициент Пуассона и радиус кривизны материала индентора

$E_2, \nu_2, R_2$  - соответствующие параметры образца.

Глубина вдавливания  $h$  связана с радиусом индентора:

$$h = \frac{a^2}{R_e} \quad (2.30)$$

Когда две номинально плоские поверхности приводятся в контакт под нагрузкой, контакт происходит только в отдельных местах. Реальная область контакта - суммирование всех отдельных областей. Реальная площадь - это только часть номинальной площади контакта. Реальная площадь контакта между двумя твердыми поверхностями оказывает глубокое влияние на трение и износ деталей, тепловую и электрическую проводимость, контактные напряжения и жесткость соединений. Это объясняется, как нормальное распределение (распределение Гаусса) может быть применено к параметрам поверхности на практике, и причины регулярного появления такого распределения, определяющего каждый индивидуальный эффект. Для шероховатой поверхности, контактирующей с жесткой плоскостью, модель предполагает постоянный радиус вершины для неровностей и дает хороший порядок оценки числа контактов, реальной площади контакта и номинального давления при любом заданном отрыве. В большинстве моделей неровности предполагаются либо сферическими, параболоидными, либо эллиптическими параболоидными по форме, и соответствующее решение Герца для одиночного контакта используется в анализе.

#### 2.4. Контактная проблема шероховатой поверхности

Традиционно поверхности моделировались аналитическим методом с использованием допущений и упрощений. Поверхность, получаемая при любых обычных процессах механической обработки, никогда не бывает гладкой. Неровности на поверхности объекта называются неровностями. Неровности были смоделированы как разнообразие геометрических форм. В прошлом ряд авторов изучали проблему грубого контакта с поверхностью с помощью аналитического метода. Их результат был очень полезен, но их применение ограничено относительно небольшим диапазоном нагрузок.

Поверхностная высота выступов и структура контакта рассматривались как распределение вероятностей. Поведение одной пары взаимодействующих

неровностей часто экстраполировалось для описания поведения пары взаимодействующих поверхностей, покрытых неровностями. Исследование самого контакта классически следует двум типам подхода: стохастически или детерминистически. Одна из первых моделей была построена из предположения, что вершины неровностей являются сферическими с постоянным радиусом, шероховатости деформируются упруго и их высота подается нормальному распределению. Статистические модели оказали значительное влияние на контактный анализ и были рассмотрены многими авторами [60]. Тем не менее, эти модели не учитывают реальную геометрию поверхности и взаимодействия между неровностями. Затем были разработаны детерминистические подходы для введения более точного геометрического описания [61].

Шероховатость поверхности может влиять на рабочие характеристики компонентов и системы в самых различных областях, включая трибологию, герметизацию жидкости, передачу тепла, электронную упаковку, стоматологию и медицину. Хотя можно измерить топографию реальной поверхности и включить эти данные в модель конечных элементов [62-63], эта практика все еще относительно редка [64].

Фактически, большинство аналитиков создают вероятностные поверхности на основе предполагаемой, известной или желаемой геометрии поверхности [65], отчасти потому, что реальную геометрию не всегда можно измерить. В последнее время исследователи работают над анализом реальных поверхностей либо экспериментально [66], либо разработали модель шероховатой поверхности в программном обеспечении с конечным элементом. Моделирование конечных элементов допускает контактное моделирование со сложной геометрией, граничным условием, свойствами материала и моделями материалов. Метод конечных элементов был использован для решения контактной задачи для искусственных фрактальных поверхностей. Начиная с измерений шероховатости, синтезированные фрактальные поверхности были также использованы в

исследованиях Валлетта и др. [67-68], где они использовали численную процедуру для решения контактной задачи.

## 2.5. Моделирование шероховатой поверхности

Классический анализ проблем поверхностного контакта был основан на статистических моделях. Предполагалось, что их неровности имеют определенную форму, и их физические размеры, такие как ширина и высота, как предполагается, имеют определенное статистическое распределение. Шероховатая поверхность представлена набором неровностей заданной формы, рассеянных по опорной плоскости. Высота вершин имеет статистическое распределение и считается, что контактирующие неровности упруго деформируются в соответствии с теорией Герца.

Многие модели, описывающие шероховатость пытаются характеризовать шероховатость с помощью ряда индикаторов, таких как среднее арифметическое отклонения по вертикали  $Ra$  и средней линии  $m$ , среднеквадратичное значение  $R_s$  или стандартное отклонение  $\sigma$ . Однако поверхность не может быть полностью описана с использованием только профиля поверхности в вертикальном направлении. Это было сделано для упрощения проблемы. С быстрым развитием более быстрых компьютеров за последнее десятилетие разработка более реалистичных моделей контактного моделирования становится более реальной.

Вебстер и Сейлс [69] сделали компьютерную модель для сухого контакта без трения реальной шероховатой поверхности, которая использует данные, записанные непосредственно из измерительного прибора *stylus*. В нем был представлен численный метод исследования упругого контакта реальной шероховатости и топографии для исследования широкого круга задач о трениях контакта. Кроме того, они исследовали численную упругопластическую модель контакта гладкого шара на направленно

структурированной анизотропной шероховатой поверхности. Получена контактная информация, такая как степень пластической деформации и состояния контакта в диапазоне шероховатой поверхности, и результаты анализа были использованы для корреляции результатов теста на трение.

Ли и Ченг [70] также использовали компьютерное моделирование, чтобы сделать модель для контакта между продольно ориентированной шероховатой поверхностью для моделирования контакта между чисто продольной поверхностью. За это время моделирование модели на компьютере действительно занимало много времени. Было исследовано несколько методов, чтобы увеличить эффективность времени и уменьшить требования к размеру памяти компьютера. Они разработали моделирование сухого контакта трехмерной шероховатой поверхности на основе метода подвижной сетки. Метод позволил уменьшить требуемую оперативную память (320 Кб с предыдущих 12,8 Гб). Этот метод уменьшает необходимое пространство для хранения матрицы деформации до порядка  $N$  (Рисунок 2.3). Время вычисления для построения матрицы также пропорционально  $N$ .

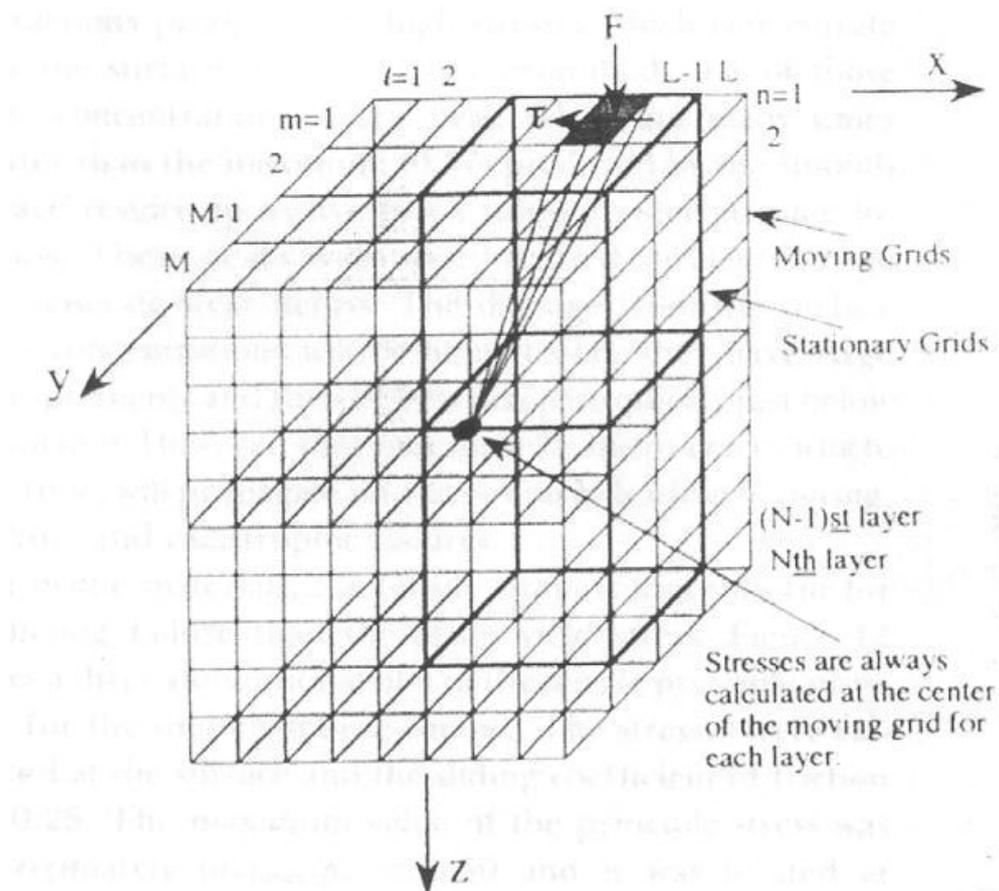


Рисунок 2.3 - Схема представления трехмерного метода подвижной сетки

Чанг и Гао [71] определили новый метод контактной задачи для оптимизации эффективности компьютера. Две поверхности, приведённые в контакт, создают давление в каждой точке поверхности и только внутри, истинная площадь контакта моделируется в алгоритм. Метод используется для расчета давлений и поверхностных смещений в контактах шероховатых поверхностей. Карпенко и Акав [72] также работали над вычислительным методом для анализа контакта двух шероховатых волнистых поверхностей, для которых номинальная площадь контакта может быть сколь угодно большой, как волнистой, так и грубой (Рисунок 2.4).

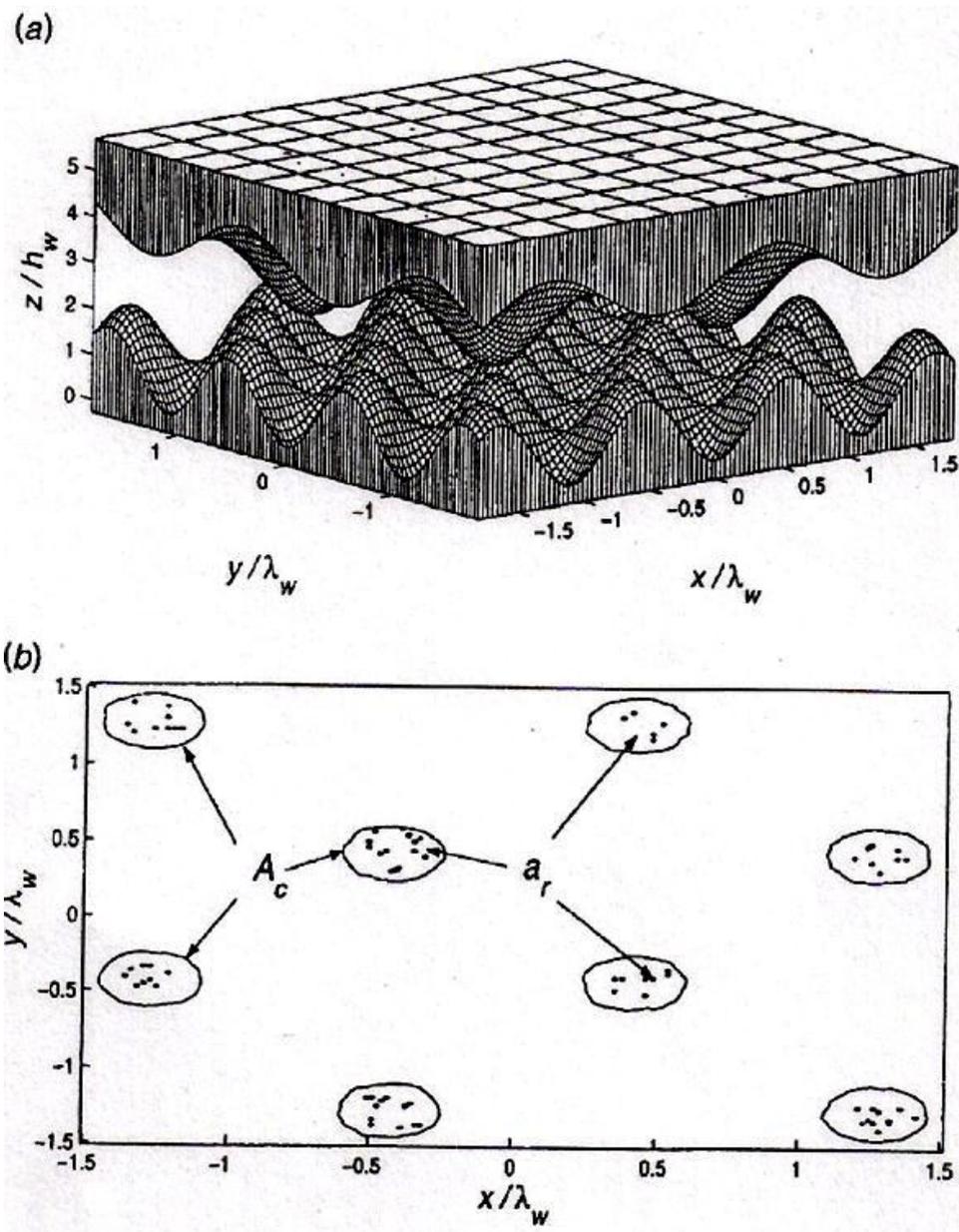


Рисунок 2.4 - Схематическая трехмерная модель Карпенко.

Другой метод генерации грубой поверхности представили Пей и др. [73], когда они представили расчет конечных элементов без трения, не адгезивный, контакт между жесткой плоскостью и упругопластическим телом с фрактальной поверхностью (рис.2.5). Все упомянутые выше исследования шероховатой поверхности генерируются оцифрованным измеренным профилем поверхности контакта и используются для компьютерного моделирования.

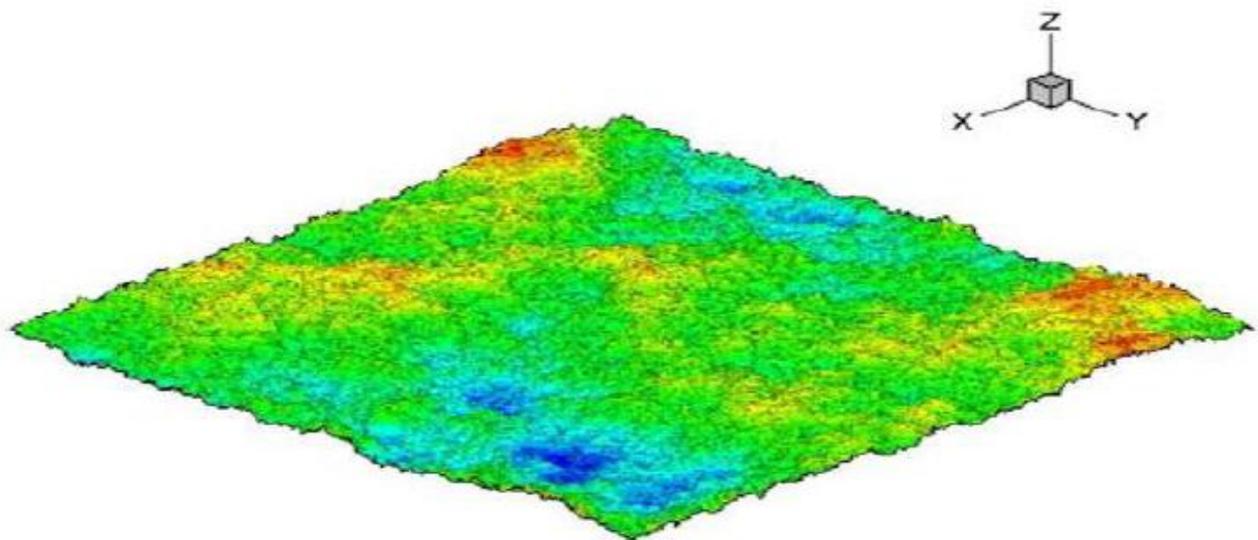


Рисунок 2.5 - Фрактальная поверхность  $L = 256$ , порожденная последовательным случайным алгоритмом средней точки. Высоты увеличены в 10 раз, чтобы сделать шероховатость видимой, и цвет изменяется от темного (синий) к свету (красный) с увеличением высоты.

В последнее время анализируют упругопластический конечный элемент линейного контакта между цилиндром и жесткой плоскостью с помощью ABAQUS [74]. Тем не менее, они все еще генерировали грубую поверхность из измеренной реальной поверхности, которая импортировалась в ABAQUS с помощью скрипта Python (Рисунок.2.6). В другом исследовании конечных элементов, недавно опубликованном Ястребовым и Дюрандом [75], был представлен нормальный без трения механический контакт между пластичным материалом и жесткой плоскостью с использованием метода конечных элементов и репрезентативного поверхностного элемента. Их исследование также представило новую уменьшенную модель для анализа шероховатой поверхности. Их новая модель может решить проблему за считанные минуты вместо методов, которым нужно несколько дней. Новая модель представляет собой серию основных кривых, полученных с помощью элементарных вычислений конечных элементов на отдельных неровностях и

феноменологических соотношений, чтобы учесть взаимодействие между соседними неровностями шероховатой поверхности.

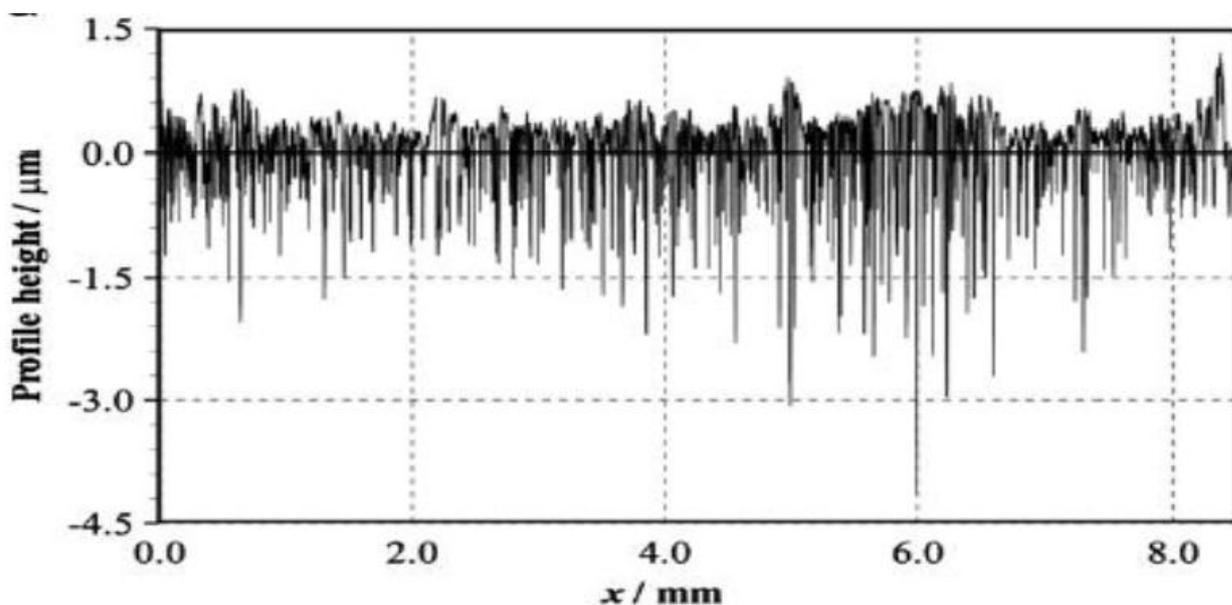


Рисунок.2.6 - Измеренная модель шероховатой поверхности.

В этой статье автор хочет ввести новый способ генерации шероховатой поверхности с использованием численного метода и экспортировать его результат в коммерческое программное обеспечение конечных элементов ABAQUS. Кроме того, анализ касательно давления и распределения контактов будет применен к контактной проблеме шероховатой поверхности относительно твердого гладкого шара. Грубая поверхность получается из экспериментальных данных, и результат сравнивается с результатом моделирования.

## 2.6. Трехмерные модели грубой поверхности, созданные в коммерческом программном обеспечении методом конечных элементов

Традиционно поверхности моделировались аналитически с использованием допущений и упрощений. Неровности были смоделированы как разнообразие геометрических форм. Высота неровностей поверхности и

образец контакта рассматривались как распределения вероятностей. Поведение одной пары неровностей взаимодействия часто экстраполировалось для описания поведения пары взаимодействующих поверхностей, покрытых неровностями. Эти предположения были сделаны, не потому что они показали точное представление о системе, а потому, что они сделали возможным моделирование. Поэтому люди, изучавшие шероховатую поверхность, анализируют одну неровность, которая, как предполагается, представляет собой другие неровности поверхности. Топография поверхности была взята из измеренной реальной поверхности с использованием оптических микро- и макро поверхностей с цифровыми данными записи.

Шварцер [76] геометрически строит все грубые поверхности, применяя математические функции. На рисунке 2.7 показан пример двух поверхностей одинаковой шероховатости в простой математической контактной ситуации, однако эта модель не может представлять реальную поверхность из-за неровностей, являющихся гомогенностью (однородностью).

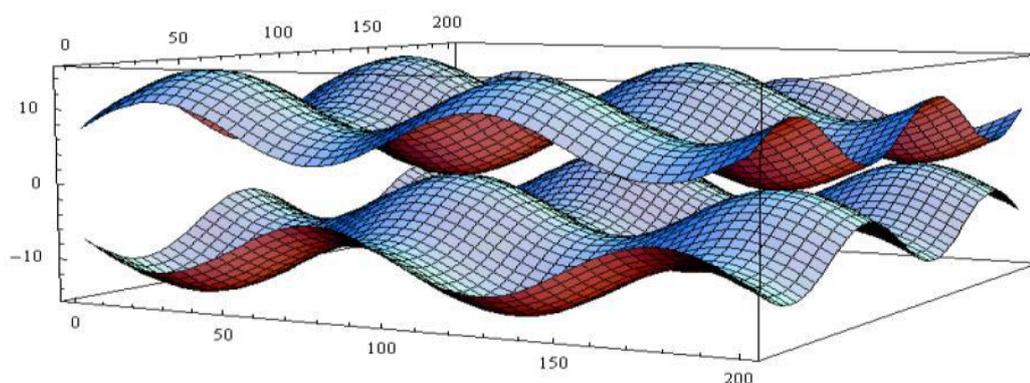


Рисунок 2.7 - Модель шероховатой поверхности.

В последнее время люди разработали шероховатую модель поверхности в программном обеспечении с конечным элементом. Моделирование конечных элементов допускает контактное моделирование со сложной геометрией, граничным условием, свойствами материала и моделями материалов. Bhowmik [77] моделировал шероховатую поверхность с неровностями однородности, как показано на Рисунке 2.8. В своей работе

механика контакта жесткой твердой сферы с поверхностью с хорошо определенным профилем шероховатости изучается с помощью экспериментов и моделирования конечных элементов. Хорошо определенный профиль шероховатости состоит из регулярного массива пирамидальных неровностей.

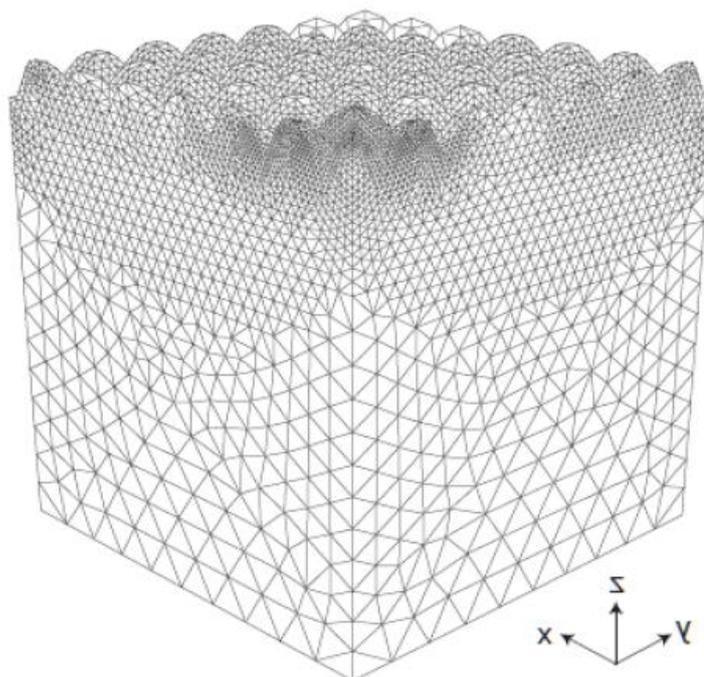


Рисунок 2.8 - Грубая поверхность.

Дэвид и др. [78] продемонстрировала симуляцию. Они использовали либо оптический профилометр, либо атомно-силовой микроскоп для захвата трехмерных точек данных контактных поверхностей. Затем, используя функции MatLab, они преобразуют замкнутую поверхность из стереолитографического формата в файл ASCII, совместимый с параметрическим языком проектирования ANSYS (APDL). На последнем этапе шероховатая поверхность была получена путем создания ключевых точек из импортируемого файла. Поскольку ключевые точки не являются копланарной, ANSYS использует кусочки для создания поверхности, а затем мы использовали твердотельное моделирование снизу вверх, чтобы создать объем блока с шероховатой поверхностью сверху. Рисунок 2.9 описывает

полный метод, разработанный на платформе ANSYS. Между тем Рисунок 2.10. Показывает интерфейс грубой поверхности в ANSYS.

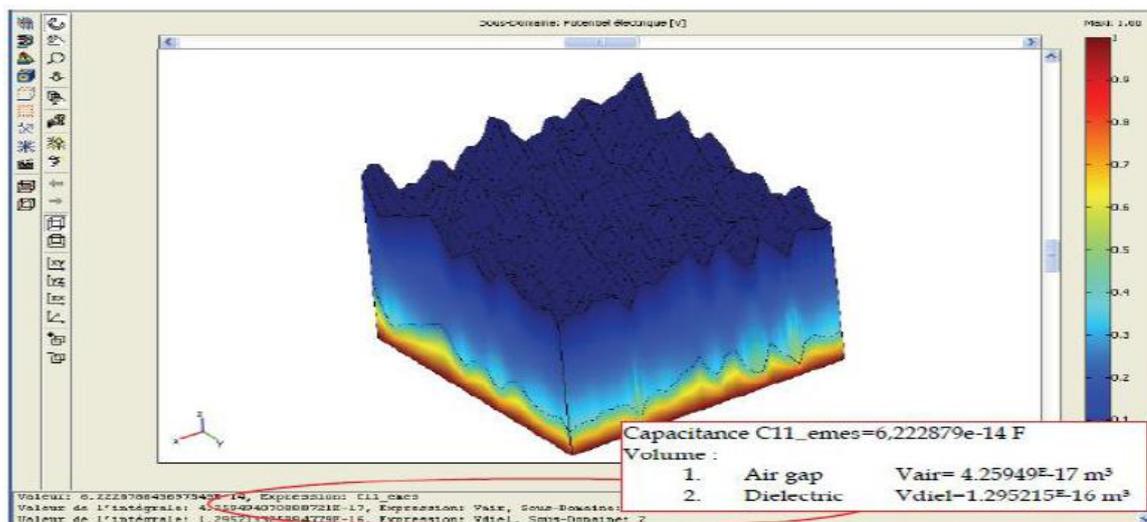


Рисунок 2.9 - Интерфейс шероховатой поверхности на ANSYS

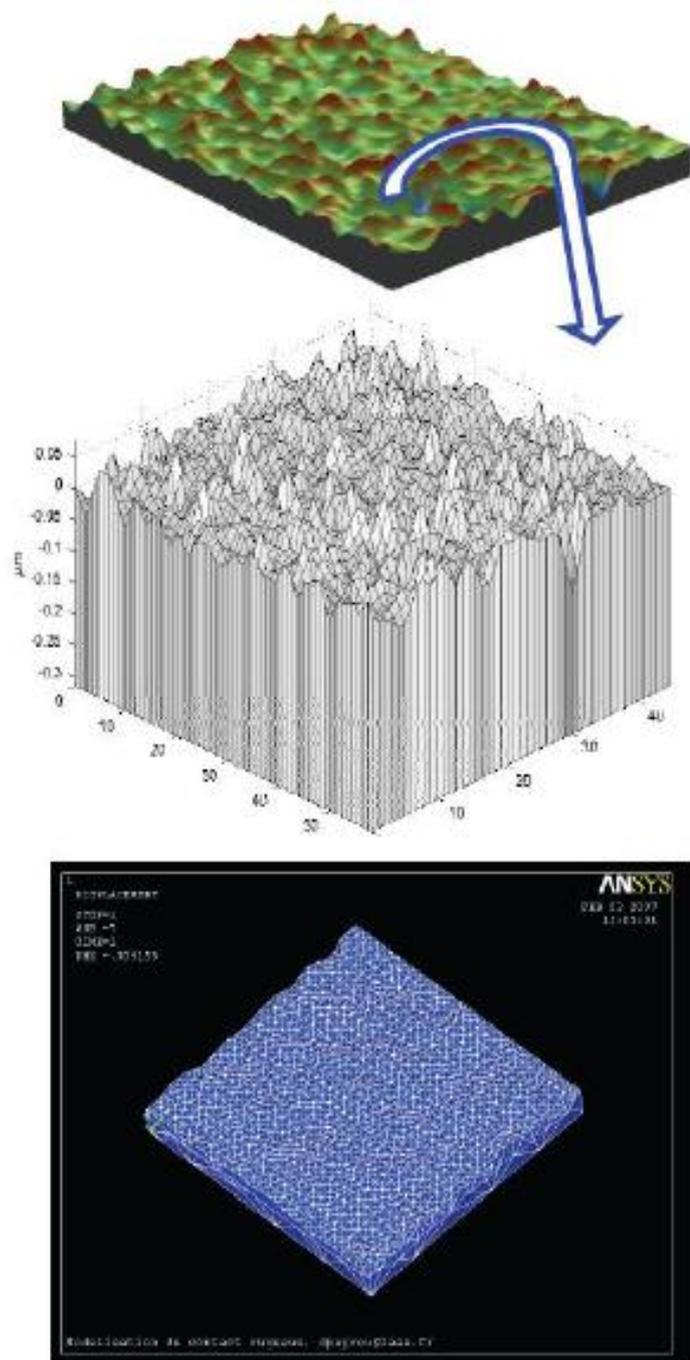


Рисунок 2.10 - Методика создания шероховатой поверхности.

М. Катрин Томпсон [79] из механического отдела MIT, представила методы генерации, использования и работы с неоднородными вариациями для включения вероятностных шероховатых поверхностей в ANSYS (Рисунок 2.11). В её работе обсуждается, как отделить поверхность от модели

с конечным элементом, передав информацию о поверхности из массивов в таблицы.

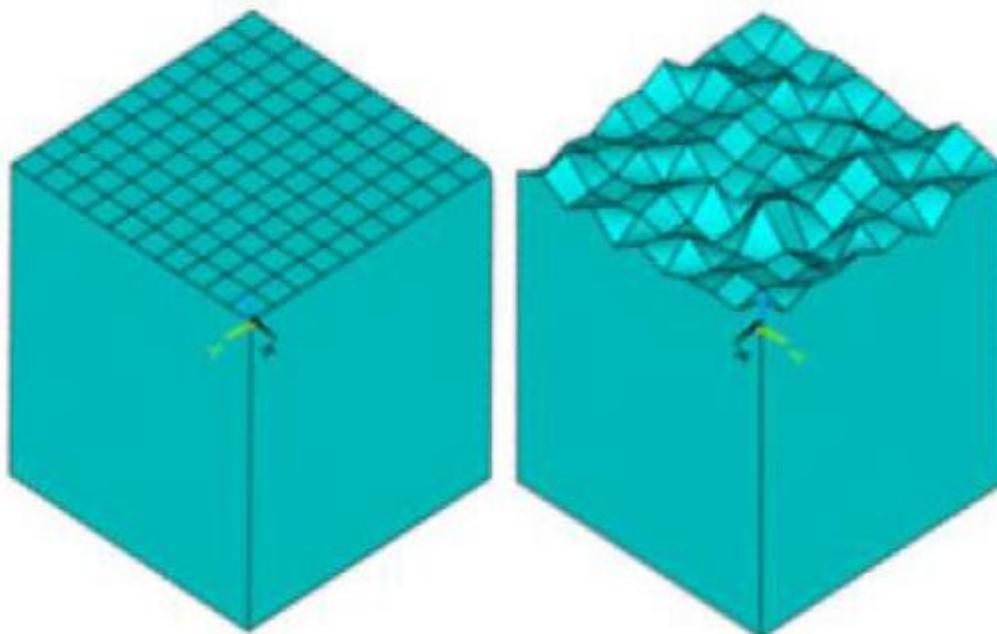


Рисунок 2.11 - Блок с нормально распределенной шероховатой поверхностью. Сетка, созданная перемещением всех узлов - фактический масштаб (слева), 100x смещение (справа).

Представлены методы создания геометрии сплошной модели по данным метрологии. Три примера поверхностей импортируются и используются в контактном анализе. Для этой работы данные метрологии импортируются в программу конечных элементов как двухмерный массив. Эти методы, в сочетании со способностью моделировать реальные поверхности в ANSYS, могут быть использованы, чтобы помочь исследователям в материаловедении, механической и электротехнической промышленности и за ее пределами, лучше понять микромасштабные явления поверхности. Тем не менее, модель Томпсон показывает неровности с резким пиком, а не гладким. Между тем, в реальной шероховатой поверхности геометрия неровностей рассматривается либо как полушарие, либо как эллипсоид, как было доказано предыдущими работами по

моделированию неровностей по измеренной реальной поверхности. Более того, модель Томпсона трудно сгрести из-за ее управляемой геометрии. В этой статье будет рассмотрен новый способ создания поверхности в ABAQUS с обработкой поверхности в SolidWorks. Результатом этой работы является грубая поверхность с гладкими неровностями. Поведение модели от этого метода будет сравниваться с поверхностью, которая обычно создается из ABAQUS.

## 2.7. Метод конечных элементов

При проектировании деталей и агрегатов в современном производстве широко используются программные комплексы компьютерного инженерного анализа (CAE). К программным комплексам CAE относятся: ABAQUS, ANSYS, COSMOS и т.д. Они обеспечивают решения широчайшего спектра задач в различных областях при помощи математических алгоритмов. От относительно простых, таких как: механика жидкости и газа, электродинамика, теплопередачу и т.п., до взаимосвязанных задач, включающих в себя целый ряд физических явлений.

Для наиболее эффективного применения этих передовых программных средств, необходимо быть ознакомленным с теоретическими основами изучаемого физического явления. Помимо этого необходимо обладать знаниями теории методов конечного элемента (МКЭ). Есть необходимость в навыках использования программного обеспечения для понимания процессов, происходящих в процессе реализации МКЭ.

Метод конечных элементов – это метод, разбивающий общую структуру объекта на небольшие взаимосвязанные части (сектора) составляющие общей каркас объекта исследования. Сектора строятся по математическим алгоритмам, что позволяем вычислять физические задачи в процессе моделирования. В основу метода вложены два основополагающих принципа:

- дискретизация исследуемого объекта на конечное множество элементов;
- кусочно-элементная аппроксимация исследуемых функций.

До появления метода конечных элементов применялись всевозможные методы статики, кинематики и механики деформируемого твёрдого тела, использующие дискретизацию. В XIX веке Пуассон предложил возможность рассмотрения сплошной среды в качестве системы конечных объёмов.

Во второй половине XIX века Максвелл заложил основы анализа стержневых конструкций. В последующие годы различные исследователи смогли сформулировать метод сил. А в последствие и метод перемещений.

Технологический прогресс XX века, в авиа и ракетостроении обеспечило молниеносное развитие цифровой и вычислительной техники, что в свою очередь привели к стремительному развитию математических алгоритмов на основе декомпозиции конструкций.

50-ые годы ознаменовались практическим использованием электронно-вычислительных машин (ЭВМ) для проведения инженерных расчётах. Именно это сподвигло сформировать различные матричные методы анализа конструкций.

Система уравнений равновесия, полученная при помощи МКЭ для линейно упругой модели тела, является с математической точки зрения системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Точность и эффективность различных способов решения СЛАУ во многом зависит от структуры и свойств матрицы: размера, обусловленности, симметричности, заполненности и т.д.

Математические алгоритмы решения СЛАУ можно разделить на два пункта:

- прямые;
- итерационные.

Прямой или точный метод позволяют получать точное значение неизвестного параметра за счет конечного числа операций. Однако это возможно в случае, если коэффициенты и начальные части уравнений заданы точно и не округлены при вычислениях.

Среди всех точечных методов наибольшее распространение получили метод исключения неизвестных Гаусса, метод квадратного корня, а также их разновидности. К таким разновидностям, прежде всего, относится фронтальный метод. Особенность фронтального метода заключается в том, что уравнения в нем генерируются параллельно с процессом решения системы.

Альтернативой точечным методам служат итерационные методы. Их принцип состоит в том, что сначала задаётся некоторыми приближёнными значениями неизвестных. Затем с помощью каких-либо алгоритмов их последовательно уточняют, приближаясь к точному решению.

Наиболее широкое распространение среди итерационных методов получили метод прямой итерации, метод Гаусса-Зейделя, метод последовательной верхней релаксации, градиентные методы наискорейшего спуска и сопряжённых градиентов.

### 2.7.1. Основная теория метода конечных элементов

Развитие компьютерных технологий происходит настолько быстро, что данная тенденция отразилась на множестве областей исследований в промышленности. Мечта специалистов в области развития науки и промышленности стала реальностью. В наши дни методы проектирования и анализа широко применяют математические комплексные вычисления во многих проектах. Метод конечных элементов внес много выводов в области производства и отраслевых исследований, это связано с его ролью в качестве инструмента исследования в численном моделировании.

Метод конечных элементов - это метод анализа, основанный на идее разбития очень сложного объекта на несколько простых частей (блоков) или путем деления очень сложного объекта на более мелкие фрагменты.

1. Основная концепция анализа метода конечных элементов.
  - 1.1. Создание дискретных элементов для получения отклонений и сил в меньших масштабах от частей структуры.
  - 1.2. Используя элементы континуального подхода для получения решений из задач теплообмена, механики жидкости и сплошной механики.
2. Процедуры структурного анализа.
  - 2.1. Разделение структуры на куски (элементы с узлом).
  - 2.2. Предоставление физических свойств каждого элемента.
  - 2.3. Соедините элементы на каждом узле, чтобы сформировать приближенную систему уравнений для структуры.
  - 2.4. Решение систем уравнений связано с неизвестным числом узлов (например, смещением).
  - 2.5. Вычислите требуемое количество (например, штаммы и напряжения).
3. Реализации на компьютере.
  - 3.1. Предварительная обработка (создание модели FE, нагрузок и ограничений).
  - 3.2. Решатель МКЭ (система сборки и отделки уравнений).
  - 3.3. Пост-обработка (показать результаты).
4. Типы элементов в методе конечных элементов.
  - 4.1. Одномерные элементы (линии)

Эти элементы включают тип пружины (пружины), фермы, балки, трубы и т.д. как показано на рисунке 2.12.



Рисунок 2.12 - Линейный элемент.

#### 4.2. Двумерные элементы (поля)

Эти элементы включают тип мембраны, пластины, оболочки и т. д. как показано на рисунке 2.13.

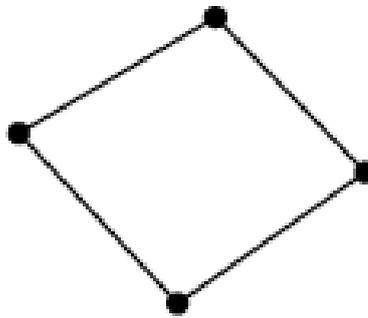


Рисунок 2.13 - Элемент поля.

#### 4.3. Элементы трехмерного (объемного)

К ним относятся тип элемента (трехмерные поля - температура, смещение, напряжение, скорость потока), как показано на рисунке 2.14.

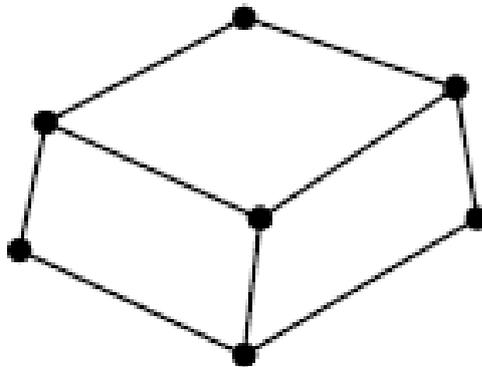


Рисунок.2.14 - Объёмный элемент.

Этот элемент используется в двумерных задачах, требующих высокой точности в анализе модели (Рисунок 2.15).

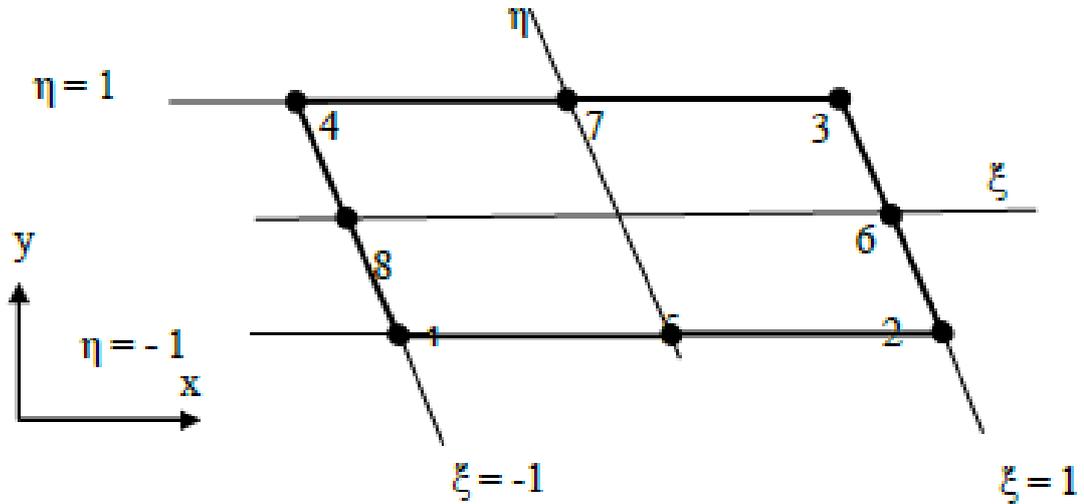


Рисунок 2.15 - Элемент квадратичного четырехугольника.

В этом элементе восемь точек. Четыре точки расположены по углам фигуры и ещё четыре точки посередине. В естественной системе координат  $(\xi, \eta)$  эти восемь функций в форме  $(N)$ ,

$$N_1 = \frac{1}{4} \cdot (1 - \xi) \cdot (\eta - 1) \cdot (\xi + \eta + 1)$$

$$N_2 = \frac{1}{4} \cdot (1 + \xi) \cdot (\eta - 1) \cdot (\xi - \eta + 1)$$

$$N_3 = \frac{1}{4} \cdot (1 + \xi) \cdot (\eta + 1) \cdot (\xi + \eta - 1)$$

$$N_4 = \frac{1}{4} \cdot (1 - \xi) \cdot (\eta + 1) \cdot (\xi - \eta + 1)$$

$$N_5 = \frac{1}{2} \cdot (1 - \eta) \cdot (1 - \xi^2)$$

$$N_6 = \frac{1}{2} \cdot (1 + \xi) \cdot (1 - \eta^2)$$

$$N_7 = \frac{1}{2} \cdot (1 + \eta) \cdot (1 - \xi^2)$$

$$N_8 = \frac{1}{2} \cdot (1 - \xi) \cdot (1 - \eta^2) \quad (2.31)$$

Более того,

$$\sum_{i=1}^8 N_i = 1 \quad (2.32)$$

Уравнение смещением  $(u, v)$  является

$$u = \sum_{i=1}^8 N_i \cdot u_i$$

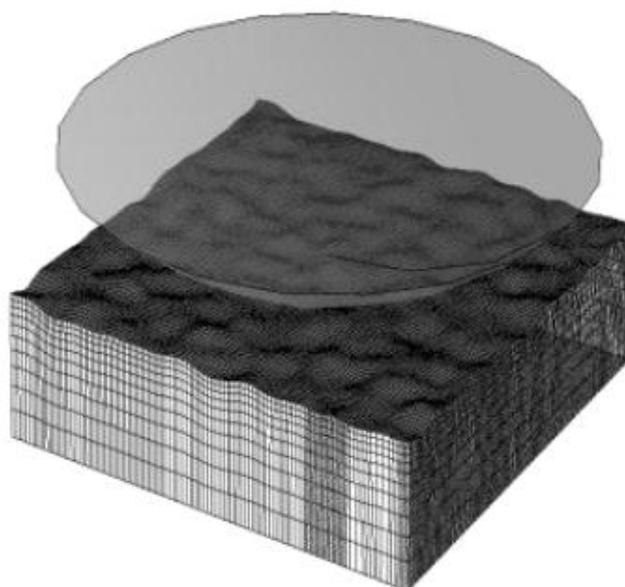
$$v = \sum_{i=1}^8 N_i \cdot v_i \quad (2.33)$$

### 2.7.2. Спецификация и геометрия

На данном примере проверяется модель поверхности из настоящего метода, применяя конкретный случай контактной упругой деформируемой шероховатой поверхности жестким гладким шаром (Рисунок 2.16.а). В ABAQUS, создаётся объёмная модель грубой поверхности, импортированной из SolidWorks (Рисунок 3.6.б). Поверхность для моделирования имеет волнистость с несколькими высотами неровностей. Кроме того, поверхность может быть легко зацеплена с меньшей сеткой на поверхности. Эта проблема контакта будет применена для оценки модели.



а



б

а) Модель контакта грубой поверхности и жесткого шара; б) геометрия поверхности в ABAQUS после импорта из SolidWorks. Рисунок 3.6 - модель поверхности.

В процессе моделирования будет три модели: первая - синусоидальная поверхность, вторая - случайная шероховатая поверхность, а третья - экспериментальная модель, перенесенная в модель с конечным элементом. Эти модели применяются при статическом контакте. Программный пакет ABAQUS использовался для анализа трех моделей, созданных в этом исследовании

Контактное статическое моделирование выполняется для определения деформации, возникающей на шероховатых поверхностях. Различные типы контактных взаимодействий приводят к деформации. Количество начальных симуляций выполняется только один раз, целью которого является определение деформации различных типов контактных взаимодействий и сравнение их друг с другом.

Материалы грубой поверхности, используемые для всех симуляций в этом исследовании, - алюминий. Свойства материала, используемого для экспериментальных данных, являются эластичными:  $E = 75,2$ ,  $\nu = 0,3$  и  $\sigma_y = 85,714$  МПа с соответствующей моделью материала без трения и жесткого контакта. Результат моделирования проводится для определения деформированной неровности. В качестве поверхности поперечных сечений, в которой некоторая неровность деформируется, как показано на рисунке 2.17.

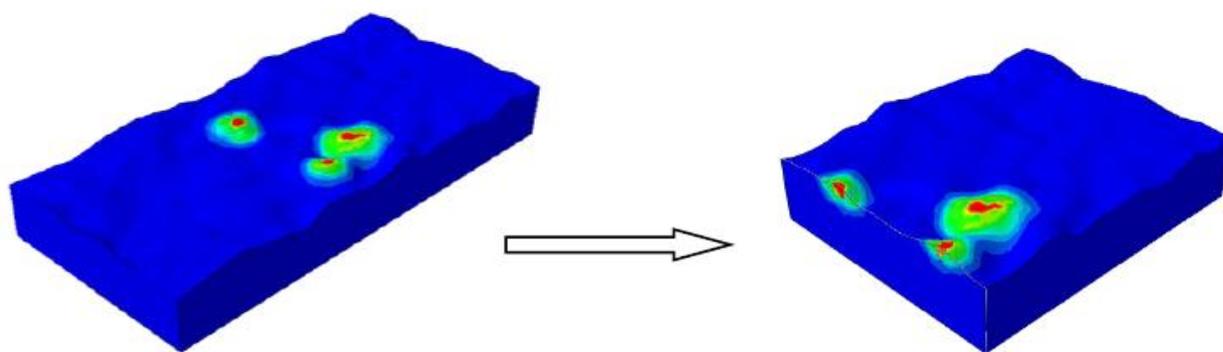


Рисунок 3.7. Поверхность в поперечном сечении.

Моделирование с использованием метода конечных элементов разбивающий поверхность на несколько элементов, а затем повторно соединяет элементы в «узлах», как если бы узлы были штифтами или каплями клея, которые удерживали элементы вместе. Этот процесс приводит к набору одновременных алгебраических уравнений. Каждый узел имеет значения, которые представляют состояние поверхности. Рисунок 2.18. демонстрирует, что метод используется для получения значений из каждого узла.

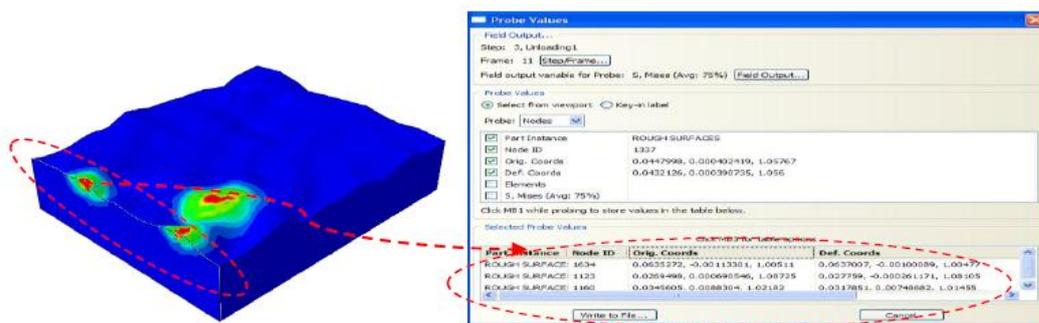


Рисунок 2.18 - Процедуры измерения напряжения Misses из каждого узла.

Плотность сетки была увеличена вокруг верхней поверхности. Контактную нагрузку на единицу длины контакта, соответствующую данной помехе, извлекали путем суммирования сил реакции на каждом из узлов, находящихся в контакте с жесткой плоскостью. Контактный размер был получен из файлов выходных данных, созданных программным обеспечением, которое указывало состояние контакта на каждом поверхностном узле. Контактные давления и внутренние значения напряжения были получены из стандартных полевых выходов программного обеспечения. В описанных здесь моделированиях конечных элементов термин «помеха» представляет собой приближение верхнего края модели к контактной плоскости, а нулевые помехи соответствуют начальному контакту недеформированной модели при нулевой нагрузке. Размер каждого приращения интерференции определялся необходимостью поддерживать численное сближение процесса итеративного решения, воплощенного в программном обеспечении, для решения нелинейного контакта.

### 3. Экспериментальные исследования формирования математической модели микрорельефа для вдавливания индентора в тугоплавкое тело

#### 3.1. Методология моделирования конечных элементов

Моделирование начинается с создания геометрической модели шероховатой поверхности. Модель геометрии относится к автору analysis [80] относительно топографии реальной поверхности. Материал по свойствам определён как алюминиевый сплав.

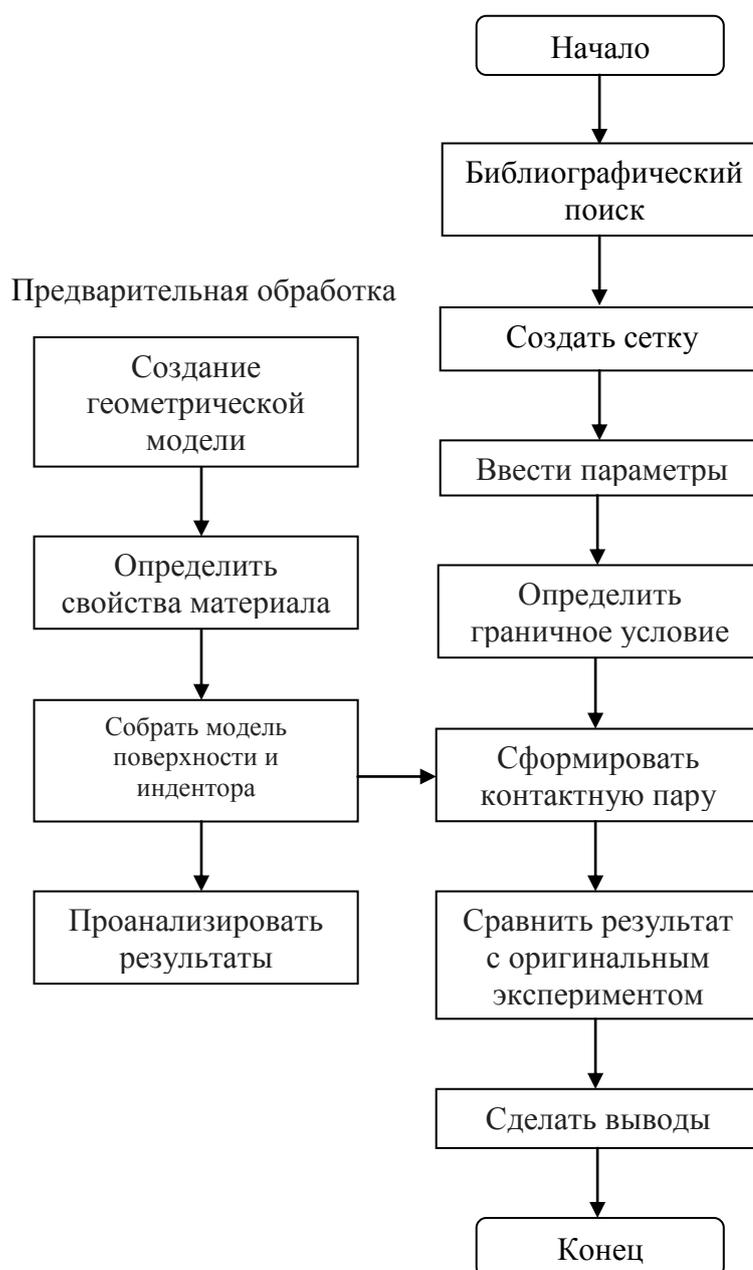


Рисунок 3.1 - блок-схема моделирования на ABAQUS 6.10-1.

Определение типа управления и решения управления действительно влияет на результат моделирования. Точность в действиях должно быть обязательным, чтобы результат был схож с теорией, особенно при определении контактной пары (Рисунок 3.1).

### 3.2. Предварительная обработка данных в программных пакетах MatLab-SolidWorks

#### 3.2.1. Определение геометрии поверхностного слоя в программном пакете Matlab

В данном исследовании работа происходит на реальной поверхности, которая сгенерирована графически (Рисунок 3.2).

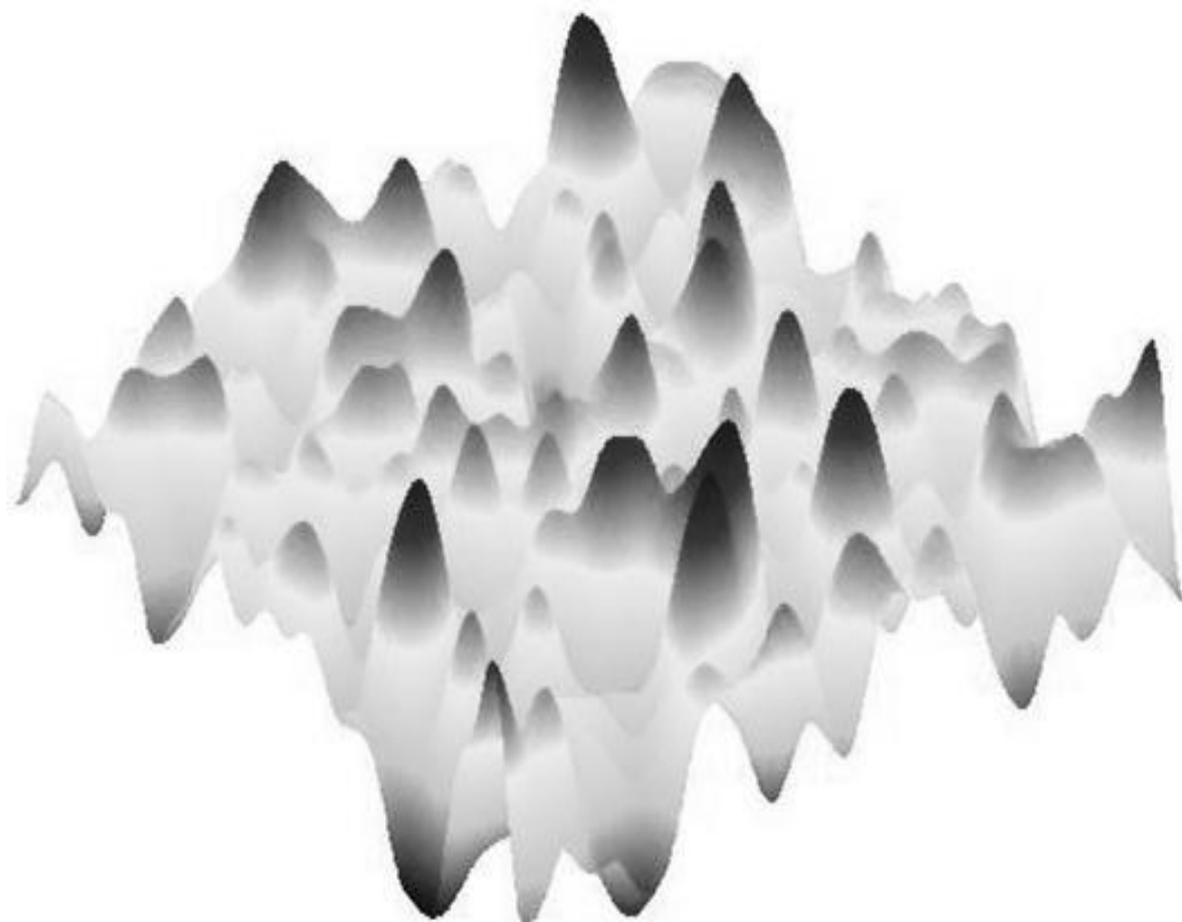


Рисунок 3.2 - Графическое изображение шероховатой поверхности:  $n = 500$ ,  
 $rl = 2$ ,  $h = 0,5$  и  $cl = 0,2$ .

Сформированная поверхность включает в себя: число точек поверхности вдоль квадратной стороны  $n$ , длине поверхности вдоль квадратной стороны  $rl$ , высоте  $h$  и корреляционную длину в координатах  $x$  и  $y$   $clx$ . Все они определяются для генерирования поверхности. Разный цвет на графическом графике указывает на разную высоту поверхности, более яркая область представляет область с более высокими неровностями, тогда как более темная область представляет область с более низкими неровностями. Затем модель генерируется в квадратной форме согласно программному алгоритму:

```

N=500;

rL=2;

h=0.5;

clx=0.2;

x = linspace(-rL,rL,N);

y = linspace(-rL,rL,N);

[X,Y] = meshgrid(x,y);

Z = h.*randn(N,N);

F = exp(-((X.^2+Y.^2)/(clx^2/2)));

f = 2/sqrt(pi)*rL/N/clx*ifft2(fft2(Z).*fft2(F));

surf(X,Y,f,'FaceColor','interp',...

'EdgeColor','none',...

'FaceLighting','phong')

axis equal off

mg=[f;Y;X]

es=rot90(mg)

sp=reshape(es,[],3)

```

```
csvwrite('E:/rough.xyz',sp)
```

```
type E:/rough.xyz
```

Сгенерированная поверхность преобразуется в данные содержащие координаты каждой точки поверхности. Необработанные данные экспортируются из поверхностных данных в формат «XYZ», в котором указаны координаты  $x$ ,  $y$  и  $z$  для каждой точки. Информация переформатируется, поэтому файл данных поверхности становится файлом, который создает и заполняет 2D-массив поверхности.

### 3.2.2. Преобразование 2D-массив в трёхмерную поверхность в программной среде SolidWorks

Программный пакет SolidWorks используется для преобразования координат поверхности полученных ранее в программном пакете MatLab в твердую поверхность путем соединения каждой координаты с массивом поверхности.

Для начала необходимо убедиться в том, что SolidWorks содержит программное дополнение ScanTo3D. Именно эта функция позволяет считывать формат .XYZ. С помощью программы ScanTo3D можно открыть отсканированные или смоделированные данные (файлы сетки или облака точек) и данные кривой из математических программ, подготовить открытые данные, а затем преобразовать их в поверхность или твердотельную модель. Наличие дополнения можно проверить во вкладке инструменты → параметры → ScanTo3D.

В SolidWorks открываем созданный ранее файл «rough» формата данных «.XYZ». Он будет рассматриваться как массив узлов, который имеет форму поверхности или проще облаком точек (Рисунок 3.3).

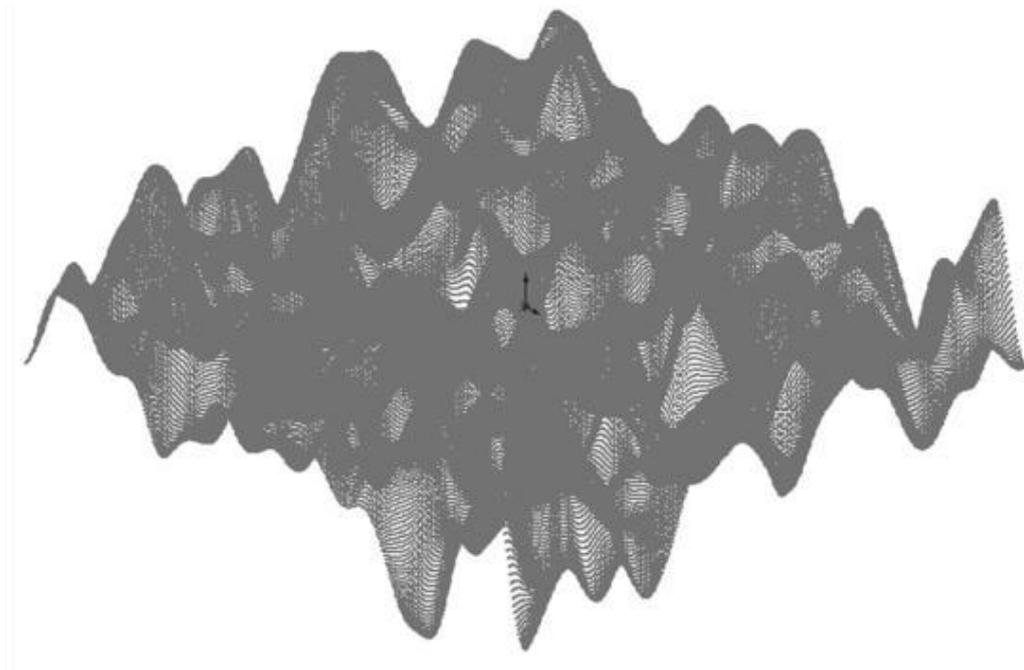


Рисунок 3.3 - облаков точек в SolidWorks состоящее из множества узлов, представляющих собой шероховатую поверхность с размером 0,04 пикселя.

Вначале на SolidWorks облако точек преобразовывается в сетку, соединив каждый узел, чтобы установить жесткую геометрию поверхности. До этого этапа поверхность была не совсем гладкой и почти острой на каждом узле. Поэтому следующим шагом было сглаживание поверхности с помощью инструментов «ScanTo3D». Однако эти функции доступны только в сборке программы «Premium Office». Этот метод сгенерирует сетку в твердую поверхность и изменит ее геометрию так, чтобы она была абсолютно гладкой (Рисунок 3.4).

Используйте параметр Мастера поверхности *Автоматическое создание* для автоматического создания поверхностей из сетки. Инструмент Мастера поверхности *Управляемый процесс создания* требует большего участия пользователя и работает лучше для моделей, состоящих из аналитических форм (простые формы, такие как механически обрабатываемые детали), но не для сложных деталей. Чтобы открыть данные сканирования:

- Выберите *Открыть* или выберите один из следующих типов файлов данных сканирования в поле *Тип файлов*:
  - Файлы сетки (\*.nxm; \*.scn; \*.3ds; \*.obj; \*.stl; \*.wrl; \*.ply; \*.ply2)
  - Файлы PointCloud (\*.xyz; \*.txt; \*.asc; \*.vda; \*.igs; \*.ibl)
- Перейдите к файлу для получения *Имени файла*.
- Выберите *Параметры*, установите *параметры импорта* и затем нажмите на кнопку *ОК*.
- Нажмите кнопку *Открыть*.

*Сетка* или *Облако точек* отображаются в дереве конструирования FeatureManager.

Чтобы запустить Мастером подготовки сетки:

- Откройте файл сетки или облака точек и выберите *Помощник подготовки сетки* (панель инструментов ScanTo3D) или *Инструменты, ScanTo3D, Помощник подготовки сетки*.
- Следуйте инструкциям Мастера для подготовки сетки, из которой будут извлекаться поверхности.

После подготовки сетки можно выбрать продолжить работу в Мастере поверхности (Параметр *Запуск Мастера поверхности* выбран по умолчанию).

Чтобы запустить Мастер поверхности:

- Откройте файл, содержащий элемент сетки и выберите *Мастер поверхности* (панель инструментов ScanTo3D) или выберите *Инструменты, ScanTo3D, Мастер поверхности*.
- Следуйте инструкциям Мастера, который использует два метода извлечения поверхностей:

- Автоматическое создание. Использует одношаговый процесс для автоматического создания твердотельной модели. Этот метод хорош для создания анатомических и органических форм.
- Направляемое создание. Использует многошаговый процесс создания поверхностей, дает вам больше контроля над созданием поверхностей. Этот метод хорош для создания аналитических поверхностей или для тех случаев, когда вы хотите контролировать создание поверхностей.

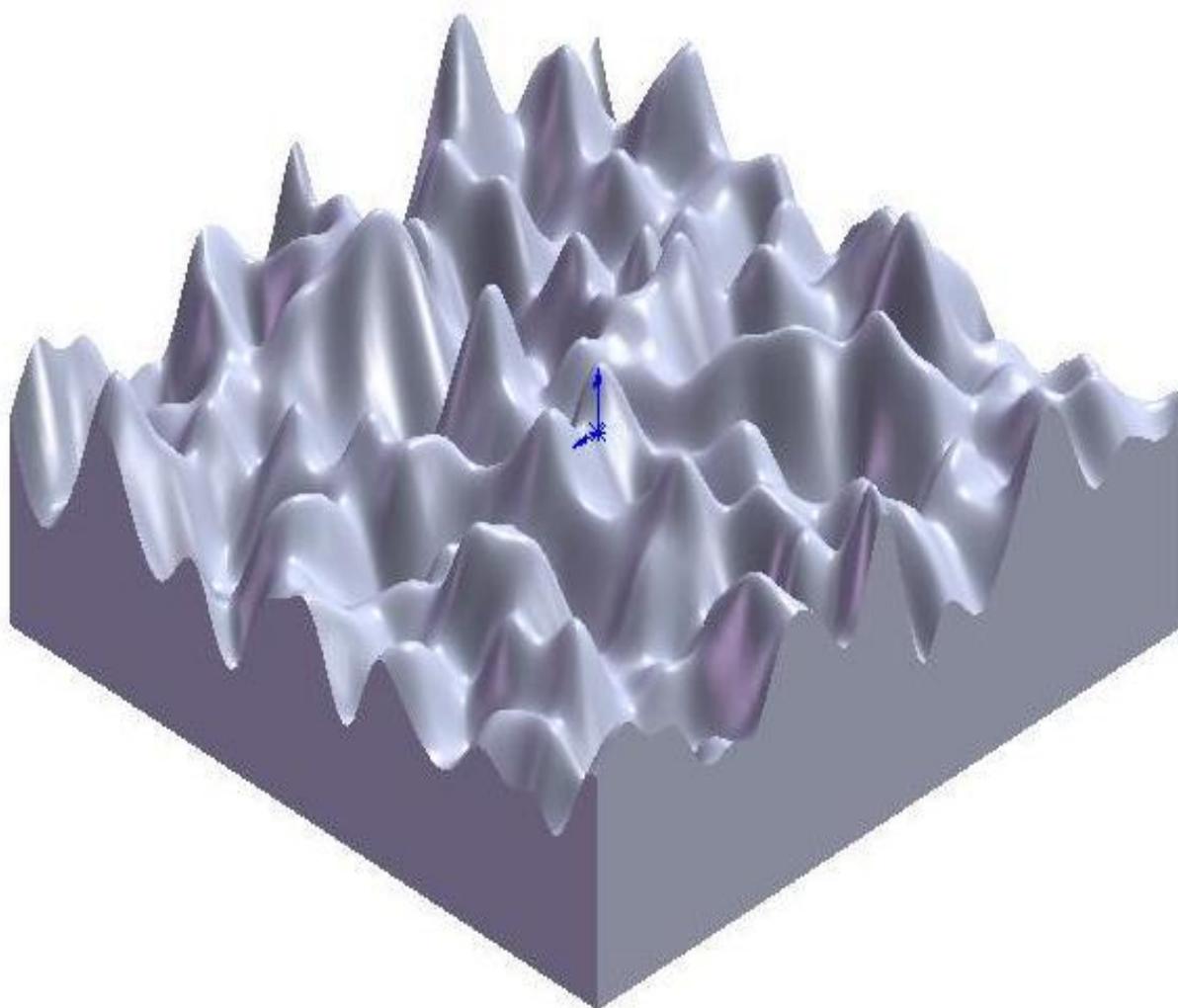


Рисунок 3.4 - Сглаженная поверхность и заданной толщиной.

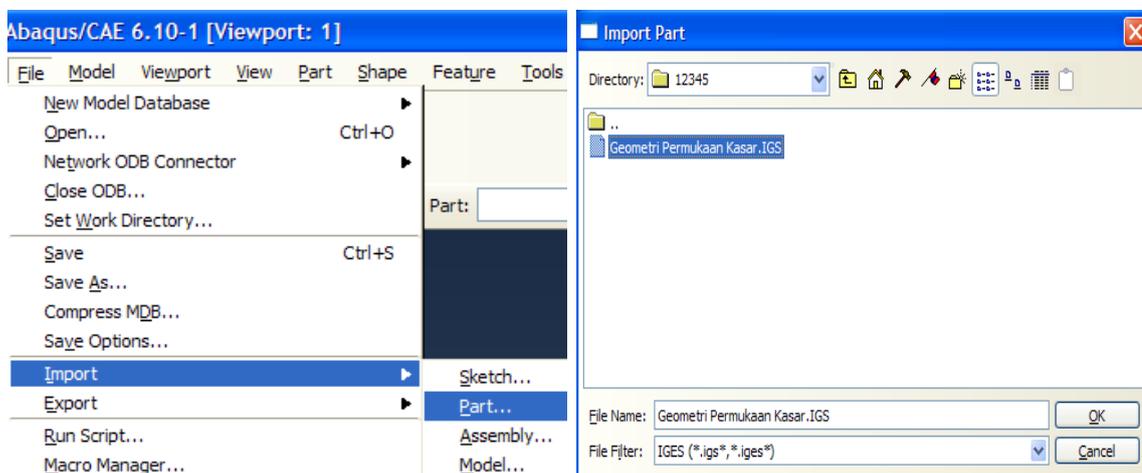
При создании твердого тела/поверхности во время процесса генерации автоматическое создание обеспечивает лучшее управление формами и более гладкую поверхность, чем при создании ориентированных объектов. В конце

концов, после задание толщины поверхности это выглядит скорее как грубая поверхность. Наконец поверхность можно сохранить в формате данных IGES. Это формат файла, определяет нейтральный формат данных, который позволяет осуществлять цифровой обмен информацией между системами автоматизированного проектирования (CAD).

### 3.3. Предварительная обработка смоделированной поверхности в программных пакетах ABAQUS

Геометрия деталь используется для создания модели перед симуляцией. Геометрия может быть непосредственно сделана в ABAQUS и может также импортироваться из программного обеспечения САПР. Грубая геометрия поверхности здесь получена из формата САПР с расширением (\*.IGES). Процедуры создания геометрии показаны на рисунке 3.5.

Импортируем файл в формате IGES при помощи команд File > Import > Part. Выбираем путь к файлу.



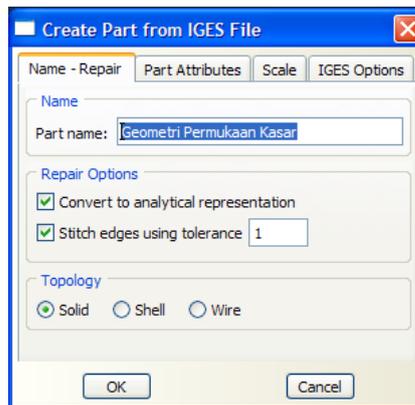


Рисунок 3.5 – Импортирование файла с расширением IGES в Abaqus.

Затем к сформированной геометрической модели необходимо передать свойства материала. Используемый материал представляет собой эластично пластический материал с модулем Юнга алюминия  $E = 75,2$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,34$  и предел текучести  $\sigma_y = 85\ 752$  МПа. Свойства материала при построении в виде графика напряжений, показанного на рисунке 3.6.

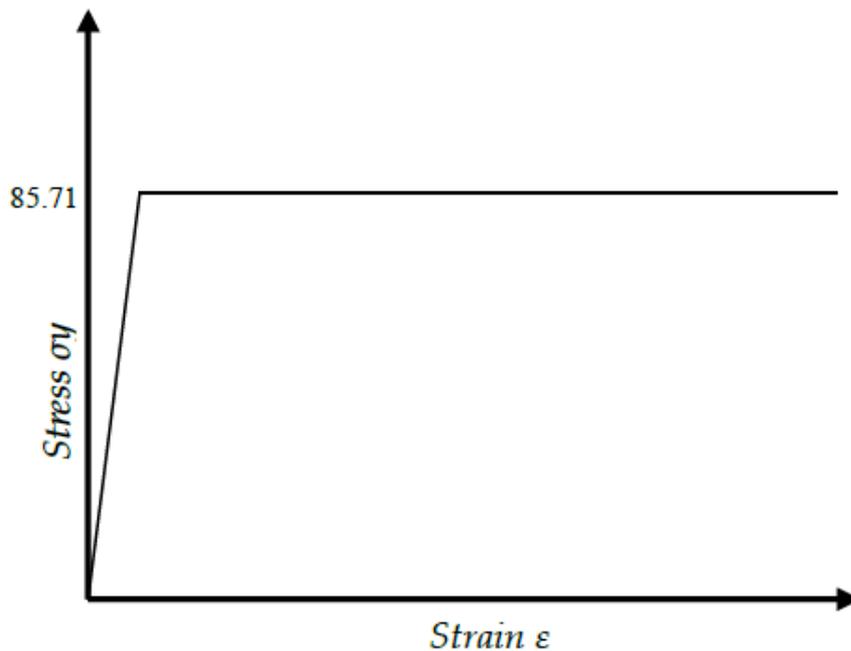


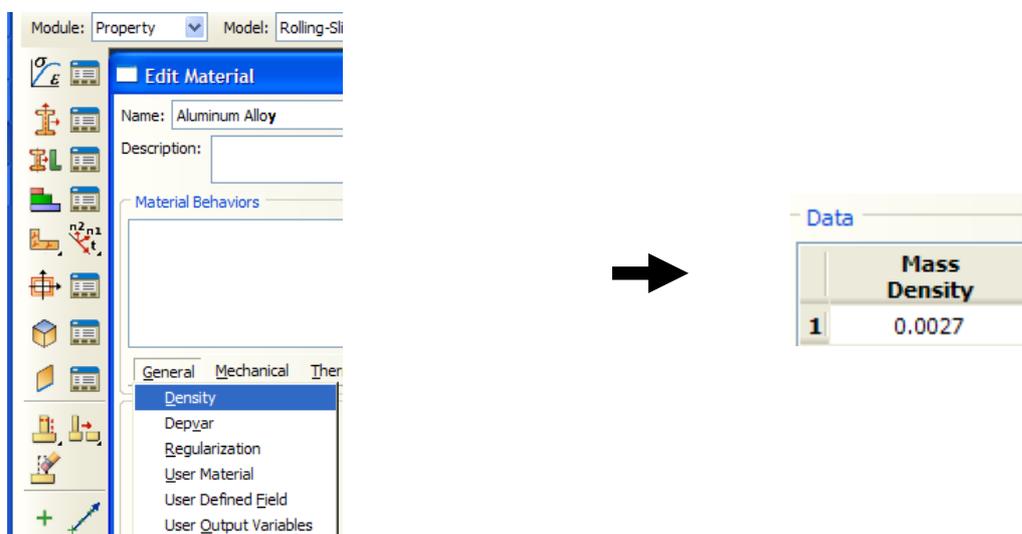
Рисунок 3.6 - График свойств материала алюминиевого сплава.

График свойств материала из алюминиевого сплава затем используется в таблице напряжений. (Таблица 3.1)

Таблица 3.1 - Значения напряжения алюминиевого сплава.

Усилие	Пластиковый штамп
85,714	0
85,714	0,005
85,714	0,01
85,714	0,015
85,714	0,02
85,714	0,025
85,714	0,03
85,714	0,035
85,714	0,04
85,714	0,045
85,714	0,05

Значения свойств материала затем передаются в программное обеспечение ABAQUS. (Рисунок 3.7)



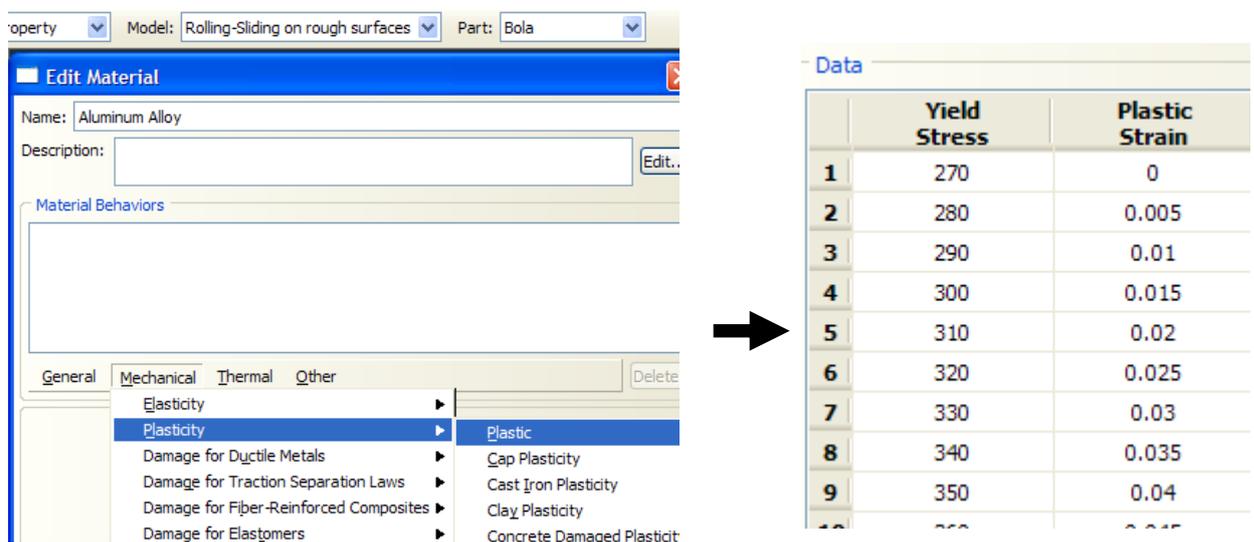
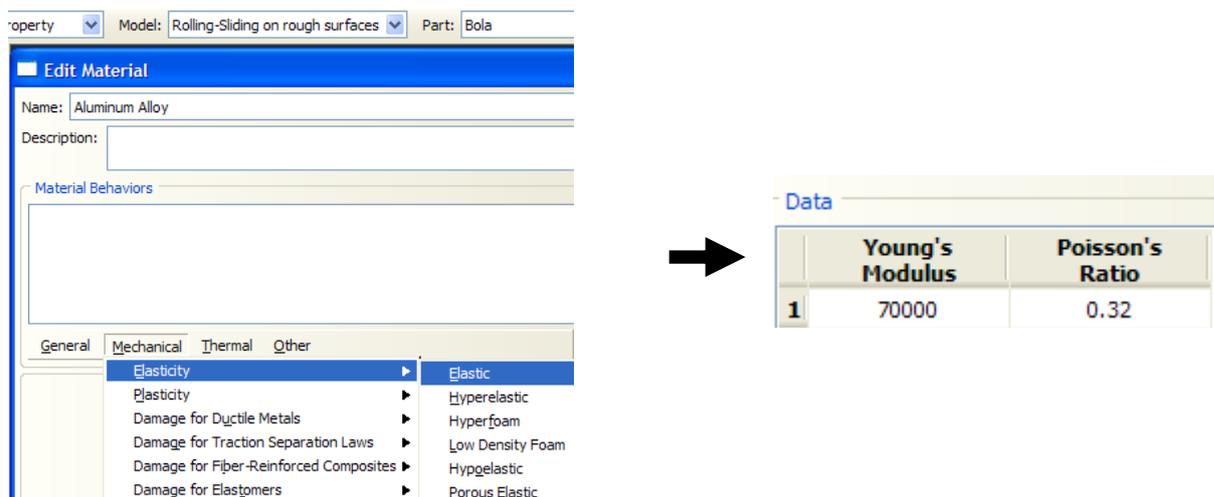


Рисунок 3.7 – ввод данных о свойствах материала.

Необходимо определить свойства материала грубой геометрии поверхности. Для жесткой сферы параметры не задаются, потому что характер аналитической жесткости не требует свойств материала. Процедуры применения материала к геометрии показаны на рисунке 3.8.

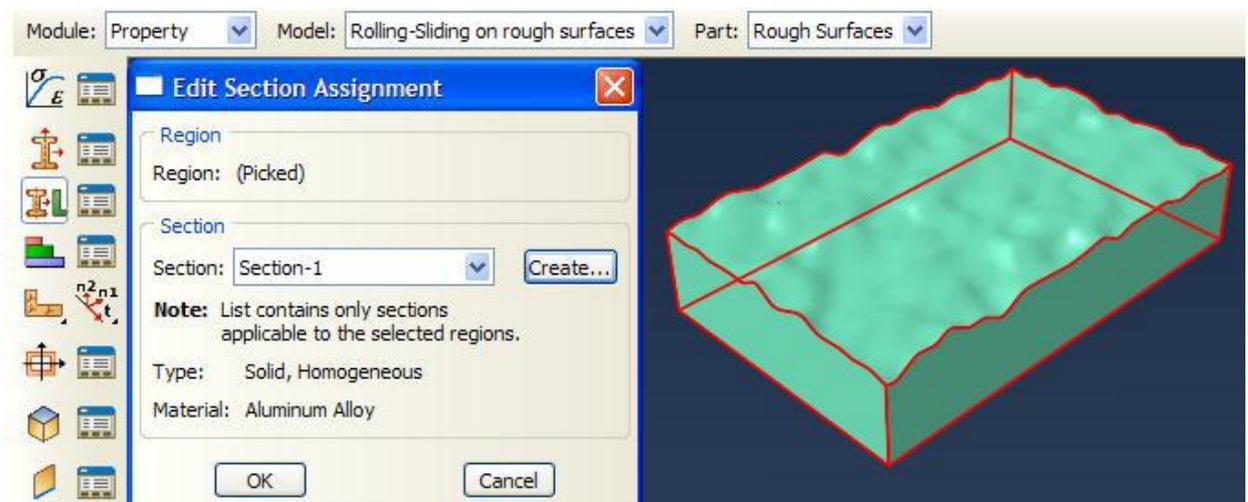
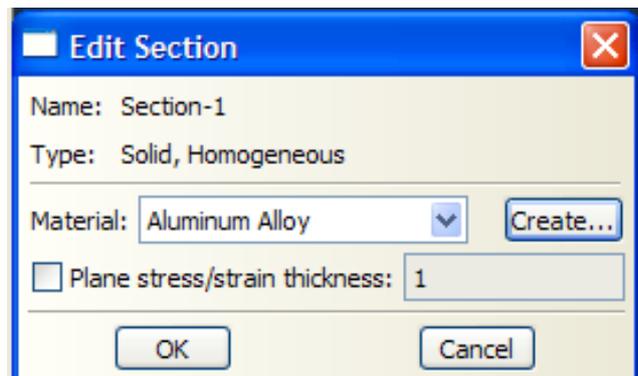
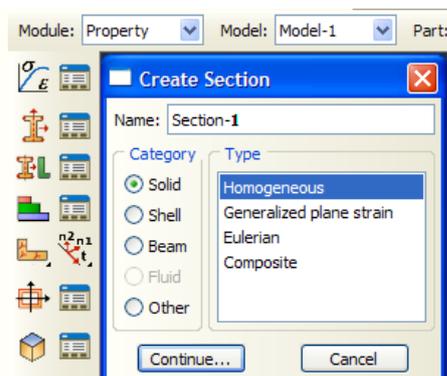


Рисунок 3.8 - Процедуры нанесения свойств материала на грубую поверхность.

Геометрия детали на этом этапе - это грубая поверхность и сферическая геометрия. Затем две геометрии накладываются вместе (в сборе) на экран, подобный тому, как показано в сборке на рисунке 3.9.

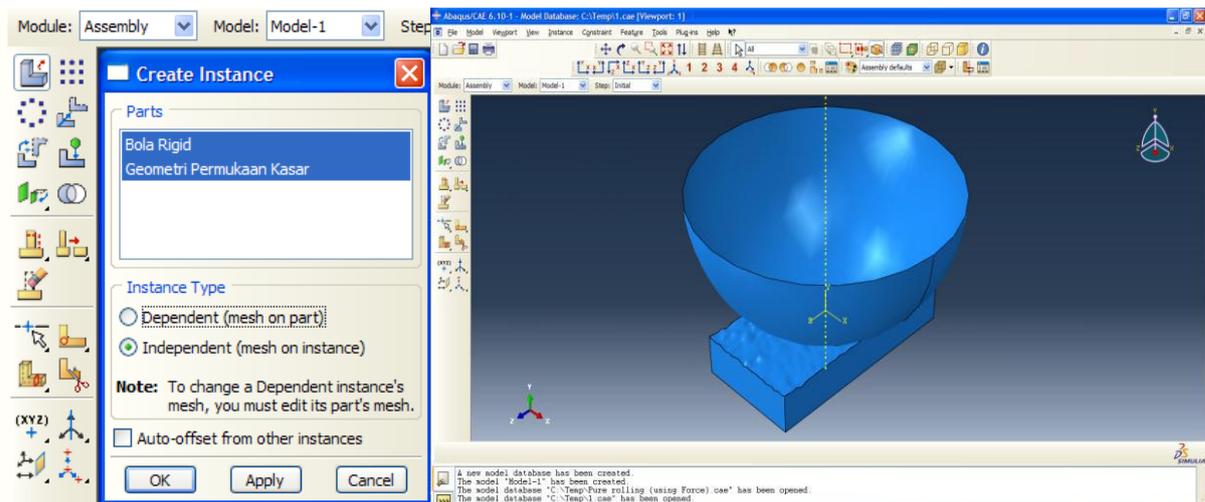


Рисунок 3.9 - Создание сборки.

Step procedures - это определение типа анализа, выполняемого в программном обеспечении ABAQUS. Анализ, проведённый в этом исследовании, представляет собой статический анализ, как показано на рисунке 3.10.

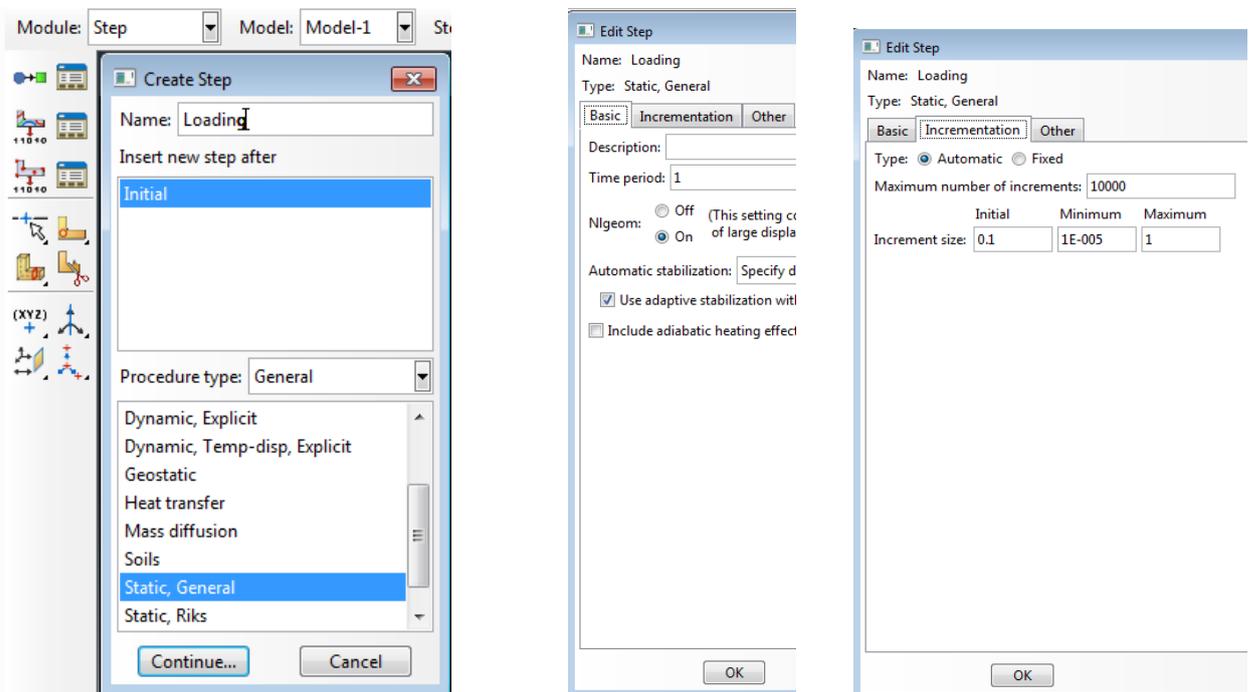


Рисунок 3.10 - Статический анализ.

Настраиваем взаимодействие между контактирующими поверхностями. Контактным взаимодействием в этом случае является взаимодействие между твердой сферической поверхностью с шероховатой поверхностью. Жесткая сферическая поверхность индентора определяется как исполнительная поверхность, в то время как шероховатая поверхность как рабочей поверхностью. Взаимодействие, имеет коэффициент трения 0,3.

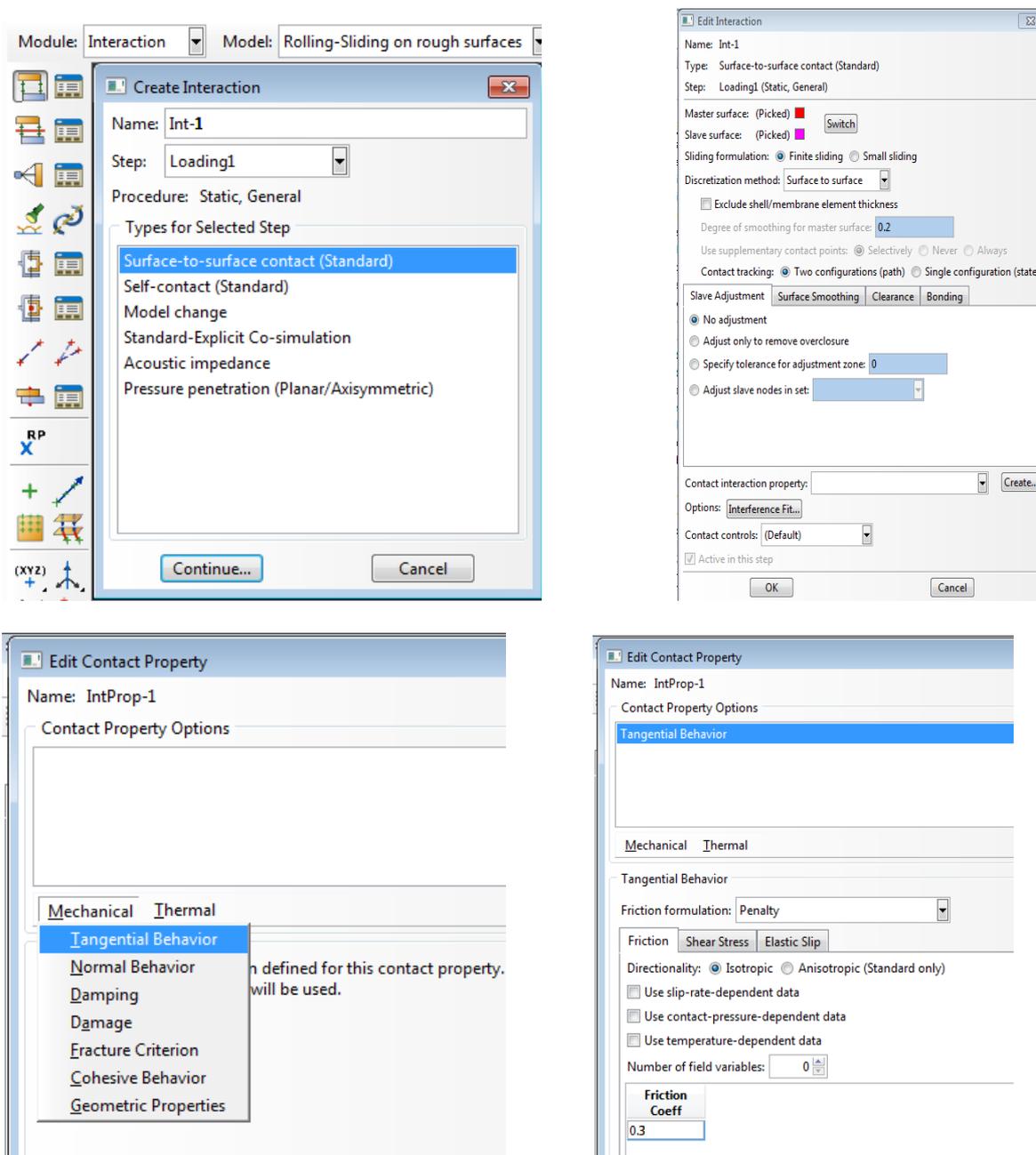


Рисунок 3.11 - Настройка взаимодействия поверхностей.

Нагрузка необходима для определения граничных условий (ограничение). Нагрузка может быть силой, давлением, моментом и т.д. (Рисунок 3.12). Граничные условия могут быть смещением, вращением, скоростью и т.д. Поскольку жесткая сферическая нагрузка индентора либо в виде интерференции, либо контактная сила в центре шара зависит от желаемого значения. Поверхность геометрической грубой модели при заданных граничных условиях не может двигаться в любых направлениях. (Рисунок 3.13)

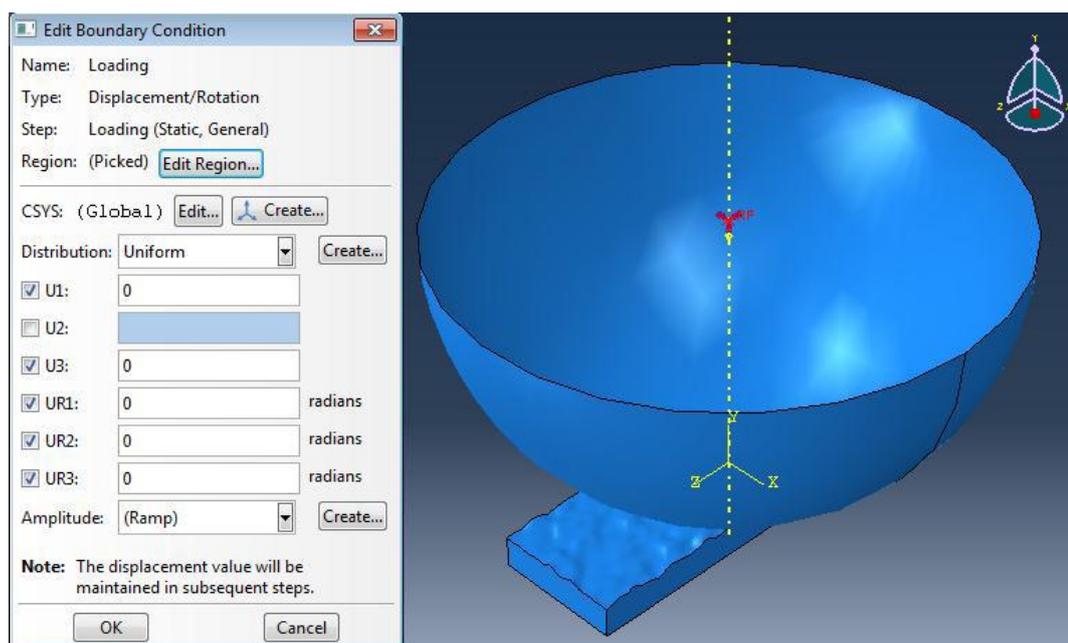
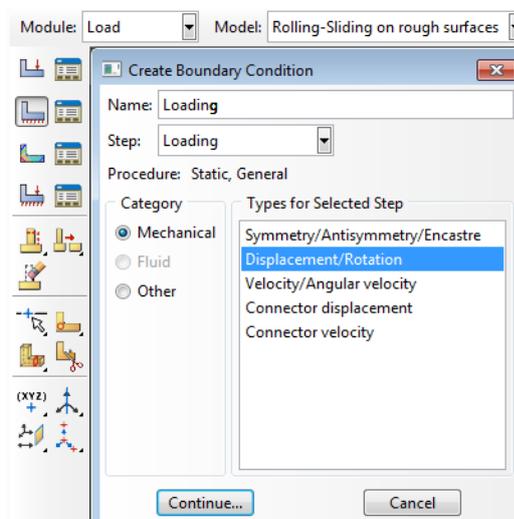


Рисунок 3.12 - Процедуры применения нагрузки.

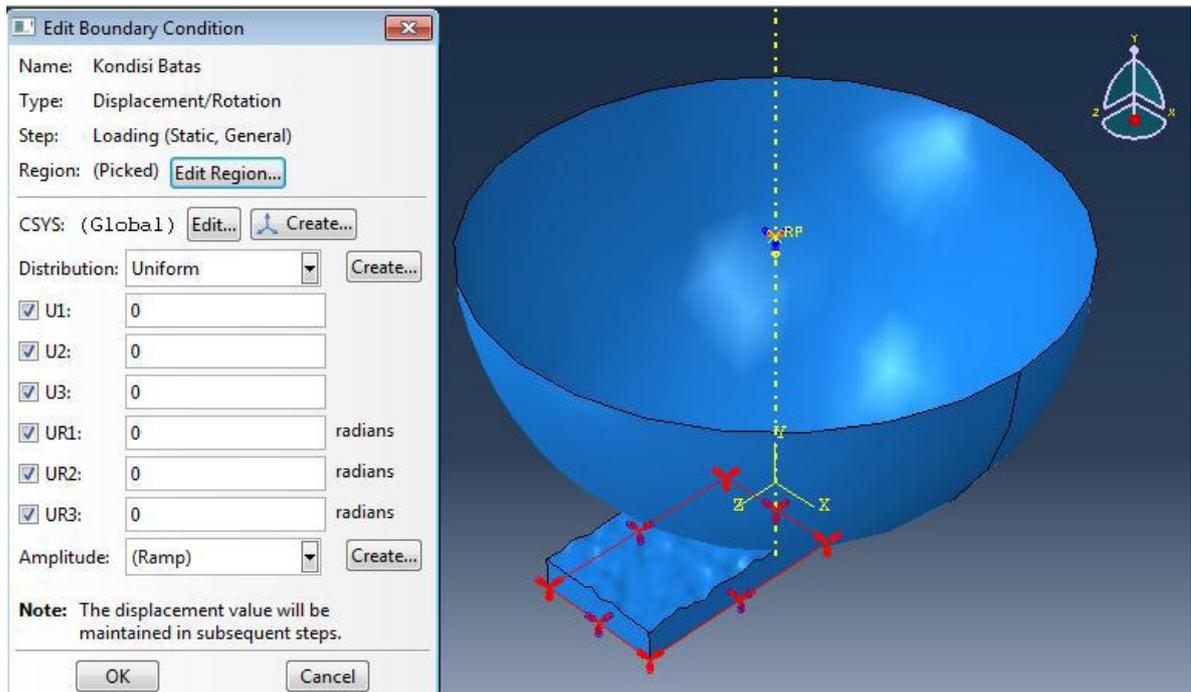


Рисунок 3.13 - Настройка граничных условий.

Mesh - наносит геометрию для нескольких элементов. Типы используемых элементов C3D6 (6-узловая линейная треугольная призма) представлены на рисунке 3.13.

- Глобальные значение (длина элемента 0,1).

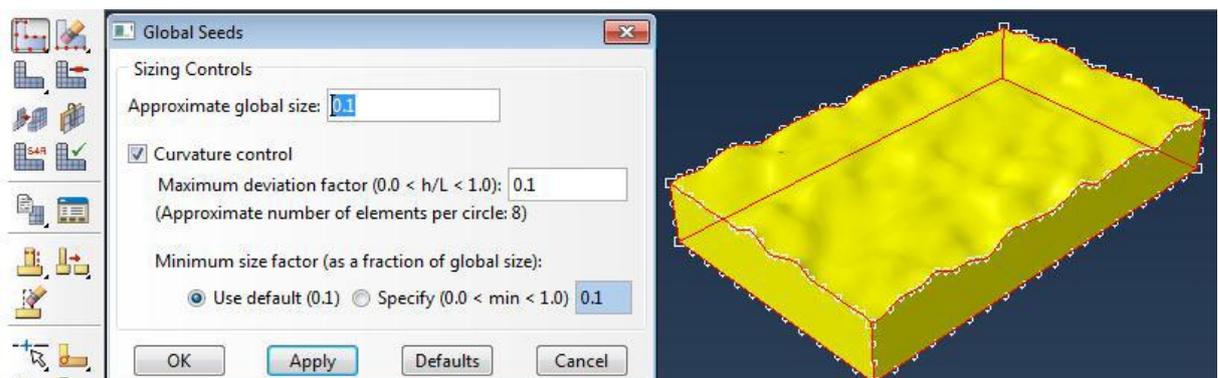


Рисунок 3.14 - Задание параметров размера.

- Локальная (Задание размера на шероховатой поверхности с длиной 0,1 как показано на рисунке 3.14)

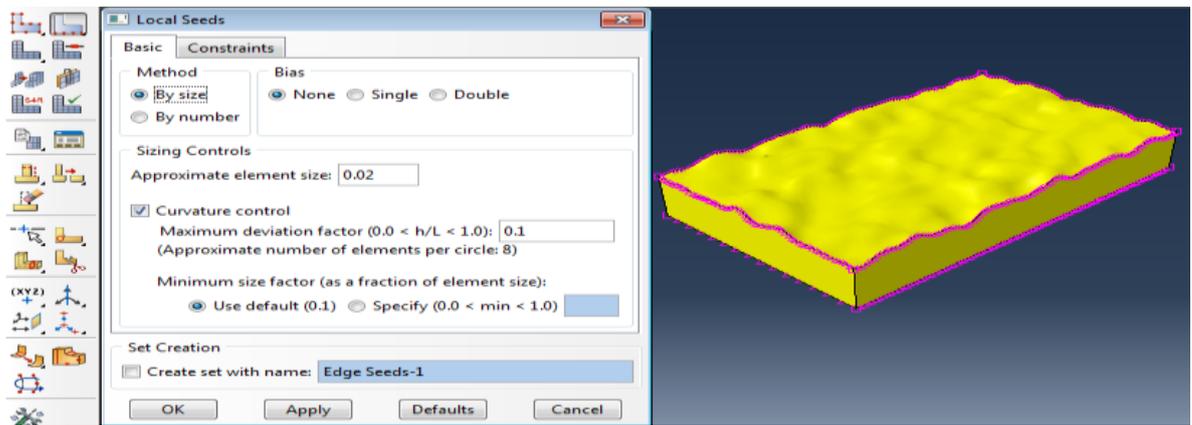


Рисунок 3.15 - Управление калибровкой в локальной области.

– Управление сеткой (Рисунок 3.16)

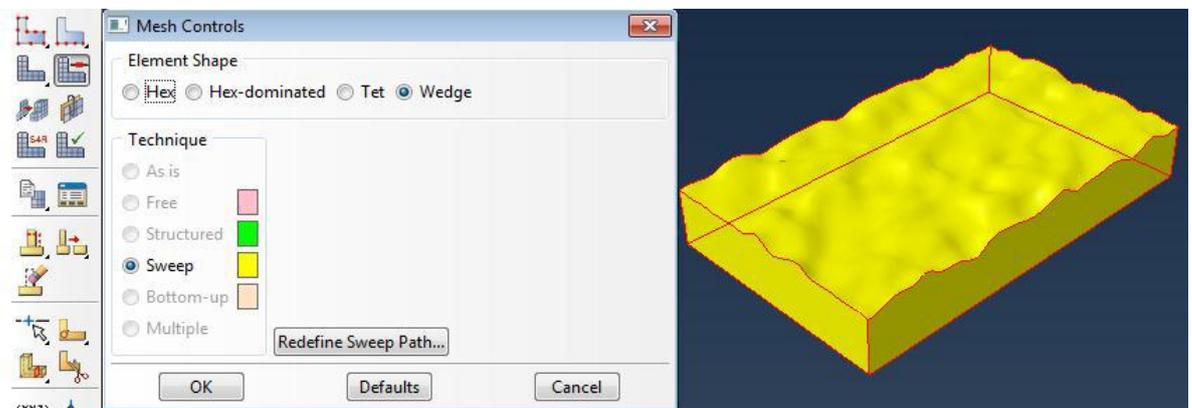


Рисунок 3.16 - Управление формой элемента.

Запускаем функцию mesh-process, для получения результата показанного на рисунке 3.17.

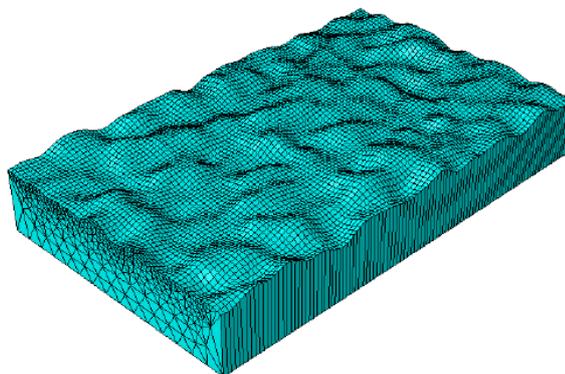


Рисунок 3.17 - Поверхность в виде сетки.

Функция Job используется для итерации или вычисления нескольких шагов, которые были установлены ранее. Определение объема памяти и количества процессоров необходимо для оптимизации времени, необходимого для итерации (Рисунок 3.17).

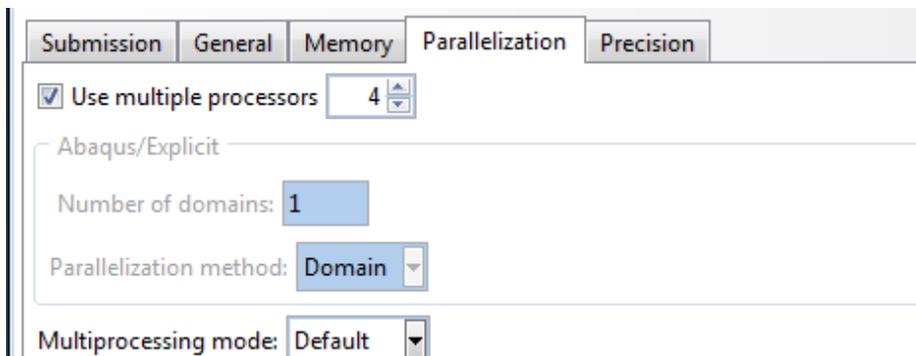
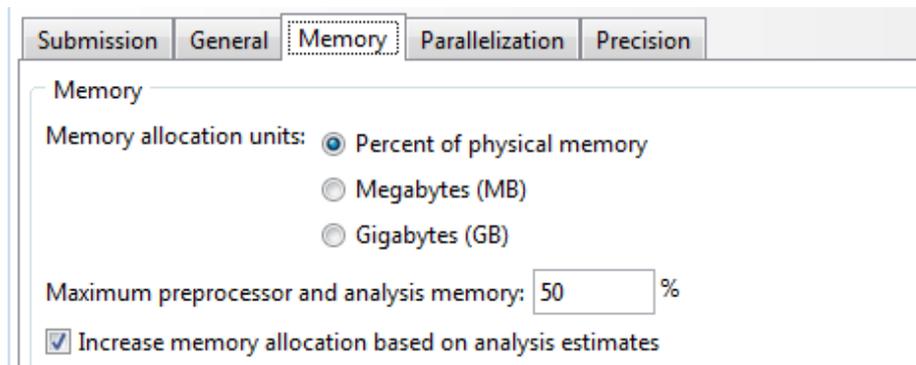
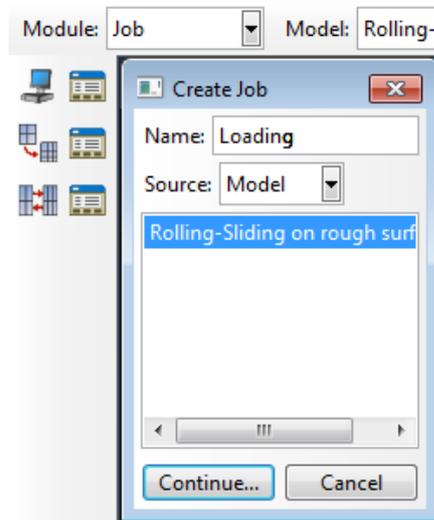


Рисунок 3.18 - Порядок работы.

Визуализация используется для оценки результатов моделирования. Результатами визуализации могут быть контуры напряжения и деформация.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По мере выполнения поставленных передо мной задач по выпускной квалификационной работе мной были сделаны выводы, выстроенные на основе изученных материалов и проведённых исследований.

Для подготовки диссертационной работы мной был проведён патентный и библиографический поиск на тему современных методов и оснастки для проведения упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием. Впоследствии я изучил вопросы, касающиеся проблем и тенденций развития методов построения моделей трехмерных объектов посредством математических алгоритмов.

Актуальность развития методик моделирования объектов заключается в возможности применения современных математических теорий в решении прикладных задачах, что даёт нам широчайшие возможности в осуществление эффективной и надёжной автоматизации извлечения, обработки и представления информации. Так же мотивирует нас на формирование и развитие новых исследовательских методик. Данная тенденция оправдывается тем, что работа с цифровыми моделями существенно экономит время, обеспечивает меньшие затраты материальных ресурсов, даёт большую гибкость, многократно увеличивает варианты использования и достигается быстрым вычислением критических характеристик.

В ходе выполнения диссертационной работы мной были сделаны следующие выводы и результаты:

1. Бала спроектирована математическая модель микрорельефа поверхностного слоя, отвечающая всем требованиям для проведения симуляции. Стоит отметить, что был применён новый, малоизученный метод моделирования.

2. Получена модель с относительно скромными требованиями к вычислительным ресурсам. Этого удалось добиться за счёт снижения суммарного значения элементарных операций во время алгоритмической обработки данных, прежде всего благодаря сведению к минимуму задействованных параметров на этапе моделирования. Так же к сильным сторонам предложенного метода можно отнести простоту реализации. Благодаря выстроенному алгоритму проектирования. Даже неопытный пользователь со скромными навыками в программировании и проведении математических исследований может развивать тему.

Библиографические разыскания, описанные во второй главе выстраивают, чёткую картину того в каком направлении должна развиваться тема. Благодаря приведению полученных результатов к общему, нейтральному формату среди всех САД систем к модели может применяться наработки прошлых лет и программные возможности сегодняшнего дня.

Результаты выпускной квалификационной работы могут иметь практическую ценность для решения широкого класса задач, для которых необходимо аппроксимация функций плотности распределений.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. A Brief History of Neuronal Reconstruction [Text] / S. L. Senft // Neuroinformatics. – 2011. – Vol.9. с.119-128.
2. Three-dimensional reconstruction of light microscopy image sections: present and future [Text] / W. Yuzhen, R. Xu, G. Luo, J. Wu // Frontiers of Medicine. – 2015. – Vol.9. с.30-45.
3. New Approaches to Diagnosing Male Infertility, Part II: The Role of Confocal Microscopy and Three-Dimensional Reconstruction in Visualization of Reinke's Crystals [Text] / V. Kozina, Ježek D. // Atlas on the Human Testis. – 2013. с.261-263.
4. Евсеев О. В. Разработка и исследование моделей и алгоритмов реконструкции трехмерной плотности облака точек, заданного серией параллельных сечений: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. [Место защиты: ФГАОУВО Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева], 2016.- 124 с.
5. Лисицин Е., Конушин А. Подгонка параметрических моделей к облакам трехмерных точек. Институт прикладной математики РАН, МГУ им. Ломоносова. 2006. с.371-374.
6. Сазонов М.Б. Повышение долговечности и надежности лопаток компрессора ГТД путем регулирования состояния поверхностного слоя комбинированной упрочняюще-отделочной обработкой. – Автореферат диссертации, 1990.
7. Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей. Изд.2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1974 -136с.
8. Петросов В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента. – М.: Машиностроение, 1977. – 166с.

9. Рыжев Э.В. Повышение надежности деталей машин методом комбинированной деформирующе-легирующей обработки с введением электрического тока. – Научн.конференция: Надежность механических систем, 1995, с.215.
10. Бабичев А.П., Лапуни А. // Сб.научн.тр.межвуз.научн.-техн.програм. Ресурсосберегательные технологии машиностроения. – 1995 / Москва,М,1995
11. Мухин В.С. и др. Модифицирование поверхности деталей ГТД по условиям эксплуатации. – М.: Машиностроение , 1995. – 256с.:ил.
12. Гафаров А.М., Шихсеидов А.И. Известия вузов машиностроения, 1995, №4-5
13. Папшев Д.Д., Чихняев Н.В. Применение упрочняющей и отделочной обработки механическими щетками крупногабаритных изделий. – Научн.техн.конференция: Интенсификация производства и повышение качества изделий поверхностным пластическим деформированием., 1989, с.7.
14. Рыковский Б.П. и др. Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом. – М.: Машиностроение, 1985. – 151с.
15. Петросов В.В. Основы теории обработки дробью. – Областная научн.техн.конференция: интенсификация производства и повышения качества изделий ППД., 1989, с.28-29.
16. Пислегин В.В., Воробьев А.В. Гидродробеструйное упрочнение штампов. – Областная научн.техн.конференция: интенсификация производства и повышения качества изделий ППД., 1989, с.29-30.
17. Жасимова С.М. Экспериментальные исследования процесса силового виброударного выглаживания. – Областная научн.техн.конференция: интенсификация производства и повышения качества изделий ППД., 1989, с.41-42.

18. Проскуряков Ю.Г., Осколков А.И. и др. Чистовая обработка деталей пластическим деформированием.
19. Корсаков В.С., Таурит Г.Э., Василюк Г.Д. и др. Повышение долговечности машин технологическими методами. – К.:техніка, 1986. – 158с.
20. Forschungen uberden Einflub der Arbeitsweise bei der kalten, oberflachen plastischen verformungdurch Walzen aufdie Rauheit der bearbieteten Oberflache / Lupescu Octavian, Nagit Gh., Picos Sabina // Bul. Lnst. politehn. Lasi. Sec.5. – 1995 – 41,№-2. – с.121-128.
21. Герасимов А.А. Технологическое обеспечение качества деталей при бесцентровой обработки ППД. – Областная научн.техн.конференция: интенсификация производства и повышения качества изделий ППД., 1989, с.49-50.
22. Смелянский В.М., Блюменштейн В.Ю. Качество поверхностного слоя деталей после обработки размерным совмещенным обкатыванием. – Автомобильная промышленность, 1982, №4, с.25-27.
23. Зарубицкий Е.У., Покинтелица Н.И., Костьин А.В. Упрочнение поверхностей деталей – Машиностроитель, 1997, №2
24. Харчин В.Л. Восстановление размеров сопрягаемых поверхностей деталей цилиндрических посадок повышенной точности – Междунар.научн.-техн.конф.: Проблемы эксплуатации и ремонта автомобильных транспортных средств, 1977, с.32-33.
25. Аскинази Б.М. Упрочнение восстановление деталей электромеханической обработкой. – Л.: Машиностроение, 1977.- с.184
26. А.с.358136. Способ комбинированной упрочняющей- чистовой обработки. / В.М.Смелянский. Оpubл.в Б.И., 1972, №34.

27. А.с.671925. Способ комбинированной упрочняюще-чистой обработки. / В.М.Смелянский, В.А.Васильев и др. Оpubл.в Б.И., 1979, №25.
28. Синдеев В.И. Исследование влияния упрочняюще-чистой обработки лучом лазера и ультразвуковым инструментом на качество поверхностного слоя стальных деталей. – Автореферат диссертации, 1981.
29. Нежинский А.М. Повышение качества и производительности изготовления деталей машин. – Курган, 1995.
30. Исаев В.А. Пластическое деформирование с предварительным микрорельефом. – Машиностроитель, 1985, №8, с.12-13.
31. Марков М.А., Озерова М.А., Устинов И.Д. и др. Применение ультразвука при алмазном выглаживании деталей. – Вестник машиностроения, 1973, №9, с.58-61.
32. Ан Г.Д. Исследование процесса ультразвукового упрочнения высокопрочных авиационных материалов. Автореферат диссертации, 1970.
33. Александров М.К. Исследование процесса ультразвукового упрочнения титановых сплавов. Автореферат диссертации, 1975.
34. Николаев В.А., Шапошников С.Д., Штриков Б.Л. Исследование процесса ультразвукового упрочнения деталей подшипника. – Сб.научн.трудов: Поверхностное упрочнение деталей машин и инструментов., 1985, с.12-19.
35. Турич В.В. Качество поверхностей деталей, обработанных деформирующим протягиванием с наложением ультразвука. – Сб.научн.трудов: Повышение эффективности протягивания., 1986, с.131-135.

36. Сергеев Ю.А., Щебров О.М., Ипполитов С.К. Выглаживание деталей из сплава меди. – Областная научн.техн.конференция: интенсификация производства и повышения качества изделий ППД., 1989, с.63-64
37. Резников А.Н. Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969, 288с.
38. Николаев В.А., Ершов А.А., Михайлов А.А., Лисин В.А Исследование эффективности различных видов отделочно-упрочняющей обработки для повышения долговечности работы сопряженных деталей цилиндропоршневой группы. Отчет о НИР, Москва, 1986.
39. Одинцов Л.Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием. – М.: Машиностроение, 1981. – 160с.
40. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства с регулярным микрорельефом. – М.: Машиностроение., 1982.
41. Кудрявцев И.В., Наумченко Н.Е., Саввина Н.М. Усталость крупных деталей машин. – М.: Машиностроение, 1981,- 240с.
42. А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. / Основы трибологии (трение, износ, смазка). 2-е изд. переработ, и доп. - М.: Машиностроение, 2001.
43. Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов Качество поверхности и контакт деталей машин.-М.: Машиностроение, 1981 г. с.184-196.
44. Дунин-Барковский И.В. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И.В. Дунин-Барковский, А.Н. Карташова. - Москва: Машиностроение, 1978 г. с.121-130
45. Thompson, M. K., 2007, A Multi-scale Iterative Approach for Finite Element Modeling of Thermal Contact Resistance, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering.

46. Бабин А.П., Зернин М.В. Конечноэлементное моделирование контактного взаимодействия с использованием положений механики контактной псевдосреды. 2009 г.
47. Баринов И.Н., Волков В.С. . Микромеханика вокруг нас. Rezhim dostupa:  
[http://dep\\_pribor.pnzgu.ru/files/dep\\_pribor.pnzgu.ru/mikromehanika\\_vokrug\\_nas.pdf](http://dep_pribor.pnzgu.ru/files/dep_pribor.pnzgu.ru/mikromehanika_vokrug_nas.pdf)
48. Hertz, H., 1882, *Über die berührung fester elastische körper and über die harte*, Verhandlungen des Vereins zur Beforderung des Gewerbefleisses, Leipzig.
49. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел.: Машиностроение. 1968 г.
50. Bowden, FP and Tabor, D., 1939, The area of contact between stationary and between moving surfaces, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 169(938), с.391-413.
51. Archard, J.F, 1957, Elastic deformation and the laws of friction, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 243(1233), с.190-205.
52. Greenwood, J.A., and Williamson, J.B.P., 1966, Contact of nominally flat surfaces, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, с.300-319.
53. Tabor, D., 1951, *The hardness of metals*, Oxford University Press, Oxford, UK.
54. Kogut, L., and Etsion, I., 2002, Elastic-plastic contact analysis of a sphere and a rigid flat, *ASME Journal Appl. Mech*, Vol. 69, с.657-662.
55. Zhao, Y., Maietta, D. M., and Chang, L., 2000, An asperity microcontact model incorporating the transition from elastic deformation to fully plastic flow, *ASME Journal of Tribology*, Vol. 69, с.657-662.

56. Johnson, K. L., 1985, *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
57. Bhowmik, K., 2007, *Exsperimental and Finite Element Study of Elastic-plastic Indentation of Rough Surface*, Master thesis, Departement of Mechanical Engineering, Indian Institute of Science.
58. Bhowmik, K., 2007, *Exsperimental and Finite Element Study of Elastic-plastic Indentation of Rough Surface*, Master thesis, Departement of Mechanical Engineering, Indian Institute of Science.
59. Fischer-Cripps A.C., 2000, *Introduction to Contact Mechanics*, Springer-Verlag, New York.
60. Bucher F., Knothe K., Theiler A., 2002, Normal and tangential contact problem of surfaces with measured roughness. *Wear* 253(1-2), c.204-218.
61. Jamari, J., and Schipper, D.J., 2007, Deterministic repeated contact of rough surfaces. *Wear* 264, c.349-358.
62. Walter, C., Antretter, T., 2009, 3D versus 2D finite element simulation of the effect of surface roughness on nanoindentation of hard coatings. *Surf Coatings Technol* 203, c.3286–3290.
63. Walter, C., Antretter, T., Daniel, R., Mitterer, C., 2007, Finite element simulation of the effect of surface roughness on nanoindentation of thin films with spherical indenters. *Surf Coating Technol* 202, c.1103–1107.
64. Thompson, M. K. and Thompson, J. M., 2010, Considerations for the incorporation of measured surfaces in finite element models. *Scanning* Vol. 31, c.1-16.
65. Kim, T.W., Bhushan, B., 2006, Generation of composite surfaces with bimodal distribution and contact analysis for optimum tribological performance. *Journal Tribology*, 128, pp. 851-863.

66. Jamari, J., and Schipper, D.J., 2006, Experimental investigation of fully plastic contact of a sphere against a hard plat. *Trans. ASME, Journal Tribology*, 128, pp. 230-235.
67. Vallet, C., 2008, Fuite liquide au travers d'un contact rugueux : application l'étanchéité interne d'appareils de robinetterie. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.
68. Vallet, C., Lasseux, D., Zahouani, H., Sainsot, P., 2009, Sampling effect on contact and transport properties between fractal surfaces, *Tribology International* 42, pp. 1132–1145.
69. Webster, M.N., Sayles R.S., 1986, A numerical model for the elastic frictionless contact of real rough surfaces, *ASME, Journal Tribology*, 108, Issue 3, pp. 314 – 320.
70. Poon, C.Y., Sayles, R.S., 1994, Numerical contact model of a smooth ball on anisotropic rough surface, *ASME, Journal Tribology*, 116, Issue 3, pp. 194 – 202.
71. Chang, L., Gao, Y., 1999, A simple numerical method for contact analysis of rough surfaces, *ASME Journal Tribology*, 121, pp. 425–432.
72. Karpenko, P.A., Akay, A., 2002, A numerical method for analysis of extended rough wavy surfaces in contact, *ASME, Journal Tribology*, 124, Issue 4, pp. 668 – 680.
73. Pei, L., Hyun, S., Molinari, J.F., Robbins, M.O., 2005, Finite element modeling of elasto-plastic contact between rough surfaces. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 53, pp. 2385-2409.
74. Bryant, M.J., Evans, H.P., Snidel, R.W., 2011, Plastic deformation in rough surface line contacts-a finite element study. *Journal of Tribology International*, in press.

75. Yastrebov, V.A., Durand, J., Proudhon, H., Cailletaud, G., 2011, Rough surface contact analysis by mean of the finite element method and a new reduced model, *Comptes Rendus Mecanique* 339, pp. 473-490.
76. Schwarzer, N., 2007. Modelling of contact problems of rough surfaces, publication of the Saxonian Institute of Surface Mechanics, [www.siomec.de/doc/2007/007](http://www.siomec.de/doc/2007/007).
77. Bhowmik, K., 2007, Exspermental and Finite Element Study of Elastic-plastic Indentation of Rough Surface, Master thesis, Departement of Mechanical Engineering, Indian Institute of Science.
78. David, P., et al., 2008. A new methodology for RF MEMS simulation. In *Tech*, ISBN 978-3-902613-25-7. pp. 433-452.
79. Thompson, M. K., 2007, A Multi-scale Iterative Approach for Finite Element Modeling of Thermal Contact Resistance. Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Departement of Mechanical Engineering.
80. СОРОКИН Д.В., БОРИСОВ Ю.В. СОЗДАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПО ОБЛАКУ ТОЧЕК В SOLIDWORKS. Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева 2011 г.
81. Оноприйко Марина Дмитриевна. Реконструкция поверхностей геометрических моделей, представленных дискретным множеством цифровых данных : Дис. ... канд. техн. наук : 05.01.01 : Н. Новгород, 2003 124 с
82. Баландина Е.А. Реконструкция сложных каркасных поверхностей на основе перспективно-числовой модели применительно к проектированию изделий легкой промышленности. Омск. 2006 г. с.138.

83. Конушин, Антон Сергеевич. Алгоритмы построения трехмерных компьютерных моделей реальных объектов для систем виртуальной реальности. Москва. 2005 г. с.158.
84. Jamari, J., 2006, Running-in of Rolling Contacts, Ph.D. Thesis, University of Tweente, Faculty of Engineering Technology.
85. Амелин В. В., Князь В. А. Объединение фрагментов трёхмерной модели объекта // Труды 12й международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению ГрафиКон'2002. — Нижний Новгород, 2002. — С. 99–103.
86. Гордеев Д. В., Дышкант Н. Ф. Построение модели динамики движения челюсти человека в процессе жевания по серии трёхмерных изображений // Труды 19й международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению ГрафиКон'2009. — Москва, МГУ, 2009. — С. 348–352.
87. Гордеев Д. В., Дышкант Н. Ф. Сегментация модели лица на статические и динамические области по трёхмерной видеопоследовательности // До кл. всеросс. конф. Математические методы распознавания образов-14. — М: МАКС Пресс, 2009. — С. 329–332.
88. Ахо А., Хопкрофт Дж., Ульман Дж. Построение и анализ вычислительных алгоритмов: Пер. с англ. А. О. Слисенко. — Москва: Издательство «Мир», 1979. — 536 с.
89. Дышкант Н. Ф. Операции над функциями, заданными на разных нерегулярных двумерных сетках // Сборник тезисов XV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов–2008». — М: МАКС Пресс, 2008. — С. 32.

90. Дышкант Н. Ф. Метод сравнения формы пространственных объектов // Сборник тезисов лучших дипломных работ 2008 года. — Москва: Изд. от дел ф-та ВМК МГУ, 2008. — С. 69–70.
91. Дышкант Н. Ф. Сравнение поверхностей, заданных на неструктурированных сетках и сетках разной плотности // Доклады 8-й Между народной конференции «Интеллектуализация обработки информации» (ИОИ-2010). — М.: МАКС Пресс, 2010. — С. 339–342.
92. Костюк Ю. Л., Фукс А. Л. Визуально гладкая аппроксимация однозначной поверхности, заданной нерегулярным набором точек // Геоинформатика–2000: Труды международной научно-практической конференции. — Томск: Изд-во Томского ун-та, 2000. — С. 41–45.
93. Костюк Ю. Л. Графический поиск с использованием триангуляции и клеточного разбиения // Вестник Томского гос. ун-та. — 2002. — № 275. — С. 147–152.
94. Марков К. Н., Ширков П. Д. Алгоритмы сглаживания поверхностей, заданных на нерегулярных сетках // Матем. моделирование. — 2009. — Т. 21, № 6. — С. 69–78.
95. Местецкий Л. М., Царик Е. В. Триангуляция Делоне: рекурсия без пространственного разделения точек // Труды международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению ГрафиКон'2004. — Москва, МГУ, 2004. — С. 267–270.
96. Местецкий Л. М., Царик Е. В. Слияние неразделённых триангуляций Делоне // Сложные системы: обработка информации, моделирование и оптимизация: Сборник научных трудов. Вып. 2. — Тверь: Тверской гос. университет, 2004. — С. 216–231.
97. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: Введение: Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 478 с.

98. Скороспелов, В. А. Сплайны в инженерной геометрии. –М.: Машиностроение 1985. – 156с.
99. Декарт, Рене. Геометрия: с прил. избр. работ П. Ферма и переписки Декарта /пер., примеч. и ст. А. П. Юшкевича./Р. Декарт. М.; Л.: Гос. объедин. науч.- техн. изд-во НКТП СССР, ред. техн.-теорет. лит., 1938. 288с.
100. Дегтярев В.М. Компьютерная геометрия и графика: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / В. М. Дегтярев. — 2-е изд., стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2011. — 192 с.
101. Александрова В.В., Симонова И.В., Тарасова О.А. Компьютерное моделирование пространственных форм. В среде – 3D Studio MAX. Спб.: Издательство «Анатолия», 2003 г., 319 с.
102. Красильников Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений. Изд-во: БХВ- Петербург. Серия: Учебная литература для вузов. ISBN 978-5-9775-0700-4. 2011 г
103. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М. Изд-во: Техносфера. Пер. с англ. Л. Рубанов, П. Чочиа. 2012 г. 1104 с.
104. Евсютин О., Шелупанов А., Росошек С., Мещеряков Р. Сжатие цифровых изображений. Изд-во: Горячая Линия – Телеком. ISBN 978-5-9912-0357-9. 2013 г.
105. Аксенов А.Ю., Александрова В.В., Зайцева А.А. Метод эффективного представления 3D-данных, полученных в результате 3D-сканирования // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2014, №6. С. 20-25 (из перечня ВАК)
106. Аксенов А.Ю. Метод определения информационной избыточности в аудиоданных на основе использования стандартных психоакустических моделей // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013, т.11, №9. С.39-43 (из перечня ВАК)

107. Аксенов А.Ю., Зайцева А.А., Кулешов С.В. О критерии адекватности цифровых трактов передачи данных // Информационно-измерительные и управляющие системы, №7, т.8, 2010. С. 75-77 (из перечня ВАК)
108. Аксенов А.Ю., Зайцева А.А. Применение программируемой технологии к обработке сигналов и изображений // Информационно-измерительные и управляющие системы, №11, т.7, 2009. С.63-66. (из перечня ВАК)
109. Кулешов С. В., Зайцева А. А., Аксенов А. Ю. Ассоциативно-пирамидальное представление данных // Информационно-измерительные и управляющие системы, №4, т.6, 2008. — с. 14—17. (из перечня ВАК)
110. Кулешов С.В., Аксенов А.Ю., Зайцева А.А., Идентификация факта компрессии с потерями в процессе обработки изображений // Труды СПИИРАН. Вып. 5. СПб.: Наука, 2007. (из перечня ВАК)
111. Aksenov A., Kuleshov S., Zaytseva A. An application of computer vision systems to solve the problem of unmanned aerial vehicle control // Transport and Telecommunication, 2014, volume 15, no. 3, 209–214
112. Аксенов А.Ю., Александрова В.В., Зайцева А.А. Особенности представления пространственных данных, полученных в результате 3D-сканирования // Материалы конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ- 2014). СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. С. 440-444.
113. Аксенов А.Ю., Макаров А.Н. Цифровая технология анализа и синтеза сигналов. // По пути прогресса – к новым достижениям / ОАО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»/ Сб. материалов под редакцией Генерального директора-Генерального конструктора Г.В.Анцева. СПб.: ООО «Издательство «Логос», 2006. с.188–191.

114. Александрова В.В., Зайцева А.А. 3D-технология и когнитивное программирование. // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012, т.10, №5. – С. 61–64.
115. Александрова В.В., Зайцева А.А., Брысковский Г.В. Цифровые программируемые 3D-технологии // Материалы конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ–2012) 09–11 октября 2012. С. 547-553
116. Александрова В. В., Зайцева А. А., Тыжненко Д. А. Сканирование и редактирование 3D-объекта для прототипирования на 3D-принтере // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013, т.11, №9. — С.53–57.
117. Changsoo Je, Sang Wook Lee, and Rae-Hong Park. High-Contrast Color-Stripe Pattern for Rapid Structured-Light Range Imaging. Computer Vision – ECCV 2004, LNCS 3021 (8th European Conference on Computer Vision, Prague, Czech Republic, May 2004, Proceedings, Part I), pp. 95–107, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, May 10, 2004
118. Лысыч М.Н., Белинченко Р.А., Шкильный А.А. Оборудование и технологии 3D-сканирования // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2. № 4-3 (9-3). С. 210-214.
119. Тишкин В.О. Методика сборки и обработки данных, полученных в процессе 3D-сканирования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 1 (71). С. 87-92.
120. Юмашев А.В., Михайлова М.В., Кудерова И.Г., Кристаль Е.А. Варианты использования 3D-сканирования в ортопедической стоматологии. // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2015. № 1. С. 2-6.

121. Ившин К.С., Башарова А.Ф. Принципы современного трехмерного моделирования в промышленном дизайне. // «Архитектон: известия вузов» №39 Сентябрь 2012. [http://archvuz.ru/2012\\_3/11](http://archvuz.ru/2012_3/11)
122. Цапко И.В., Цапко С.Г. Алгоритмы и методы обработки информации в задачах трехмерного сканирования объектов // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317. № 5. С. 134-140.
123. Самусев С.В., Товмасын М.А., Хлыбов О.С., Дроздов Л.В. Применение фотограмметрии и лазерного 3D-сканирования для измерения профиля инструмента кромкогибочного прессы линии ТЭСА 1420 ОАО «Выксунский металлургический завод» // Производство проката. 2014. № 2. С. 40-42.
124. Мельникова О.Г., Олейников П.П. Информационное моделирование зданий: опыт реконструкции памятников культурного наследия // Социология города. 2013. № 4. С. 72-80.
125. Мотуз В.О., Сарычев Д.С. Применение лазерного сканирования и 3D-моделей в жизненном цикле автомобильных дорог. // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2014. № 1 (2). С. 12-15.
126. Борисенко Б., Ярошенко С. 3D-сканирование в интересах 3D-моделирования // Comprice.ru. Электронный ресурс — Доступ: <http://www.comprice.ru/articles/detail.php?ID=40134>
127. Челпанов И.Б., Балабан О.М., Аржанухина С.П., Гарибов Р.Б., Кочетков А.В., Янковский Л.В. Задачи, методы и технические средства 3D-моделирования и сканирования в дорожном хозяйстве // Современные наукоемкие технологии. 2012. № 11. С. 37-41
128. Петерсон М.В. Теоретико-информационные критерии и методы оценивания трехмерной структуры сцены и смещений камеры в мобильных системах компьютерного зрения. // Диссертация на

соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.  
Санкт-Петербург. 2013. 121 с.

129. Кулешов С.В. Метод 3D-компрессии данных рентгеновской компьютерной томографии // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 1, с.12–16