

Министерство образования и науки Украины
Донбасская государственная машиностроительная академия (ДГМА)

**РАЗРАБОТКА ИСАПР С ПРИМЕНЕНИЕМ
МЕТОДОВ ИНЖЕНЕРИИ ЗНАНИЙ**

РЕШЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Монография

Утверждено
на заседании ученого совета
Протокол № 3 от 01.12.2016

Краматорск
ЦТРИ «Печатный дом»
2017

УДК 004.9+004.896+004.652.5

Р 17

Авторы:

Тарасов А. Ф., д-р техн. наук, проф.; зав. каф. КИТ;

Винников М. А., ст. преп. каф. КИТ;

Короткий С. А., канд. техн. наук, ст. преп. каф. КИТ;

Лябик О. А., асс. каф. КИТ;

Таран С. В., асс. каф. КИТ;

Тарасов С. А., магистр спец. «ИТП».

Рецензенты:

Дядичев В. В., д-р техн. наук, проф., зав. каф. компьютерных наук Восточноевропейского национального университета им. В. Даля;

Рей Р. И., д-р техн. наук, проф., зав. каф. обработки металлов давлением и сварки Восточноевропейского национального университета им. В. Даля.

Издание осуществлено при поддержке международного проекта «Разработка курсов по встроенным системам с применением инновационных виртуальных подходов для интеграции науки, образования и промышленности в Украине, Грузии и Армении DesIRE» (544091-TEMPUS-1-2013-1-BE-TEMPUS-JPCR) по программе TEMPUS Европейской комиссии.

Представленный материал отражает мнение авторов. Европейская комиссия не несет ответственности за использование информации, содержащейся в монографии.

Виконано аналіз процесу автоматизації системи технічної підготовки виробництва в машинобудуванні на основі розроблення ІСАПР та інтеграції програмного забезпечення з САД/САМ/САЕ/РДМ-системами. Розглянуто питання підвищення інтелектуальності САПР з використанням методів інженерії знань, зокрема застосування онтологій.

Разработка ИСАПР с применением методов инженерии знаний.
Р 17 Решение практических задач : монография / А. Ф. Тарасов, М. А. Винников, С. А. Короткий, О. А. Лябик, С. В. Таран, С. А. Тарасов. – Краматорск : ЦТРИ «Печатный дом», 2017. – 211 с.
ISBN 978-617-7415-22-9

Выполнен анализ процесса автоматизации системы технической подготовки производства в машиностроении на основе разработки ИСАПР и интеграции программного обеспечения с САД/САМ/САЕ/РДМ-системами. Рассмотрены вопросы повышения интеллектуальности САПР с использованием методов инженерии знаний, в частности применения онтологий.

УДК 004.9+004.896+004.652.5

© А. Ф. Тарасов, М. А. Винников,
С. А. Короткий, О. А. Лябик,
С. В. Таран, С. А. Тарасов, 2017

ISBN 978-617-7415-22-9

© ДГМА, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА.....	11
1.1 Состав и структура современной ИСАПР	11
1.2 Место ИСАПР в структуре автоматизации деятельности промышленных предприятий.....	12
1.3 Структура и принципы организации систем технической подготовки производства.....	14
1.3.1 Конструкторская подготовка производства	17
1.3.2 Технологическая подготовка производства.....	18
1.4 Принципы построения, структура и характеристика компонентов комплексной ИСАПР	20
1.4.1 Программное обеспечение для создания геометрической модели изделия (САД-системы)	21
1.4.2 Прикладные системы для моделирования и расчета параметров изделия (САЕ-системы).....	25
1.4.3 Системы разработки программ для станков с числовым программным управлением (САМ-системы).....	27
1.5 Анализ способов интеграции программных продуктов с САД-системами	28
Выводы по разделу 1	34
РАЗДЕЛ 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ С САД/САМ/САЕ-СИСТЕМАМИ.....	35
2.1 Разработка и реализация алгоритмов построения сложных поверхностей для анализа возможностей САД-систем	35
2.2 Разработка и реализация технологии визуального структурного проектирования для построения объемных моделей изделий в САД-системе	46
2.2.1 Характеристика технология визуального структурного проектирования изделий машиностроения.....	46
2.2.2 Функциональная модель программной системы для построения изделий в САД-системах на основе ВСП.....	51
2.2.3 Логическая модель ПС для визуального структурного проектирования объектов в САД-системе	54
2.2.4 Реализация САПР для визуального структурного проектирования изделий. Пример построения штампа в САД-системе PowerSHAPE	63
2.2.5 Результаты исследования скорости построения визуальных моделей в САД-системе.....	68

2.3	Разработка и реализация САПР технологических процессов и штамповой оснастки для листовой штамповки.....	71
2.3.1	Совершенствование информационного обеспечения САПР штамповой оснастки на основе использования методов повышения ее надежности.....	71
2.3.2	Структурно–функциональная модель САПР	76
2.3.3	Влияние конструкции штампа на деформацию элементов блока и рабочего инструмента.....	82
2.3.4	Моделирование и экспериментальное исследование упругих деформаций штамповой оснастки	90
2.3.5	Расширение функциональности CAD/CAE-систем на основе интеграции с пользовательскими программными компонентами	94
2.4	Реализация ИСАПР для проектирования технологии и инструмента для вальцовки заготовок на основе интеграции с CAD/CAM/CAE-системами.....	101
2.4.1	Разработка ИСАПР технологии и инструмента для вальцовки заготовок	102
2.4.2	Разработка технологии изготовления вальцовочного сектора в PowerMILL.....	110
2.4.3	Моделирование пластического деформирования заготовки вальцовочными секторами.....	111
	Выводы по разделу 2.....	115
РАЗДЕЛ 3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР.....		116
3.1	Анализ методов хранения и поиска конструктивных решений в САПР.....	116
3.2	Повышение интеллектуальности САПР изделий машиностроения с использованием методов инженерии знаний	117
3.2.1	Объектно–ориентированный подход к построению модели предметной области проектирования изделий.....	118
3.2.2	Разработка общей структуры интеллектуальной интегрированной системы автоматизированного проектирования	119
3.2.3	Структура интеллектуальной системы автоматизации проектирования в заготовительном производстве	123
	Выводы по разделу 3.....	125
РАЗДЕЛ 4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА.....		126
4.1	Информационное обеспечение проектирования и поиска аналогов изделий в CAD-системах	126
4.2	Онтологии как основа для проектирования баз знаний	135

4.3	Разработка методики поиска аналогов элементов конструкции на основе онтологического подхода	139
4.3.1	Математическая модель онтологии	139
4.3.2	Методика отображения моделей предметных областей на основе применения онтологического подхода.....	141
4.4	Программно–методический комплекс поиска аналогов элементов конструкции на основе онтологического подхода.....	155
4.4.1	Разработка логической модели ПМК поиска аналогов элементов конструкции	155
4.4.2	Разработка физической модели ПМК поиска аналогов проектируемого узла в базе данных метаописаний САД- моделей.....	161
4.4.3	Синтаксис формирования правил для поиска аналогов изделия в базе данных метаописаний	163
4.4.4	Описание интерфейса и этапов работы ПМК.....	167
4.5	Результаты исследования поиска аналогов элементов конструкций.....	169
	Выводы по разделу 4	177
РАЗДЕЛ 5. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ		178
5.1	Использование онтологий для разработки информационного обеспечения оперативного планирования.....	178
5.2	Использование ООП и технологий визуального структурного проектирования для моделирования процессов оперативного планирования.....	184
	Выводы по разделу 5	199
	Список использованных источников.....	200

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- ВСП – технология визуального структурного проектирования изделий
ЕСКД – Единая система конструкторской документации
ЕСТД – Единая система технологической документации
ИСАПР – интегрированная система автоматизации проектирования
ИСУП – интегрированная система управления предприятием
ИТ – информационная технология
КТПП – конструкторско-технологическая подготовка производства
МКР – метод конечных разностей
МКЭ – метод конечных элементов
НДС – напряженно-деформированное состояние
ОМД – обработка металлов давлением
ООП – объектно-ориентированный подход
ООПС – объектно-ориентированная программная система
ПМК – программно-методический комплекс
ПС – программная система
САПР – система автоматизированного проектирования
ТЗ – техническое задание
ТП – технический проект
ТПП – техническая подготовка производства
ЧПУ – числовое программное управление
ЭП – эскизный проект
API (Application Programming Interface) – программный интерфейс
B2MML (Business-to-Manufacturing Markup Language) – язык разметки связи «бизнес – производство»
CAD – система автоматизированного геометрического проектирования
CAE – система численного расчета (инженерного анализа)
CALs (Continuous Acquisition and Life cycle Support) – технологии поддержки жизненного цикла изделия
CAM – система автоматизированного проектирования программ для станков с числовым программным управлением
CASE (Computer-Aided Software Engineering) – система поддержки процесса автоматизированного проектирования
DSL (Domain-specific Programming Language, Domain-specific Language) – специализированный язык предметной области
EPD (Electronic Product Definition) – система электронного описания объекта
ERP (Enterprise Resource Planning) – система управления ресурсами
MES (Manufacturing Execution System) – производственная система
PDM (Product Data Management) – система управления инженерными данными проектов и документооборотом
PLM (Product Lifecycle Management) – система автоматизированной поддержки жизненного цикла изделия
UML (Unified Modeling Language) – язык объектного моделирования

ВВЕДЕНИЕ

Успешная деятельность промышленных предприятий во многом зависит от их способности накапливать и перерабатывать информацию. В наше время в промышленности и других областях деятельности людей происходит стремительный рост объемов информации, представленной в электронном виде, что сопровождается компьютеризацией на производстве и в быту. Объемы информационных ресурсов, которые создаются, используются и хранятся для обеспечения деятельности в различных сферах жизни, уже не позволяют обходиться традиционными методами их обработки. Кроме того, информация используется и хранится во множестве различных форматов и относится к большому количеству различных предметных областей. Степень освоения современных информационных технологий (ИТ) активно влияет на развитие и повышение конкурентоспособности промышленных предприятий. Например, наличие широкого использования ИТ является обязательным условием сертификации производства, а отставание в области высоких технологий может привести к банкротству предприятия. Сегодня без автоматизации проектирования невозможно производить современную сложную наукоемкую технику.

Таким образом, прогресс в производстве новой техники и освоении новых технологий, расширение и обновление ассортимента изделий неразрывно связаны с автоматизацией проектно-конструкторских работ в соответствии с современными требованиями развития промышленности. При этом внедрение компьютерных технологий существенно повышает эффективность и производительность труда.

Одним из способов использования ИТ и компьютерной техники на предприятии является применение систем автоматизированного проектирования (САПР) для выполнения сложных или рутинных расчетов, построения моделей изделия, анализа построенных моделей и т. д. САПР широко применяются в таких отраслях, как: авиастроение, кораблестроение, автомобилестроение, тяжелое машиностроение, архитектура, строительство, нефтегазовая промышленность, а также в производстве товаров народного потребления.

САПР в машиностроении используется для проведения конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП). С помощью САПР выполняется разработка чертежей, производится трехмерное геометрическое и численное моделирование изделия и процесса сборки, проектируется вспомогательная оснастка, например штампы и пресс-формы, составляется технологическая документация и управляющие программы для станков с числовым программным управлением (ЧПУ) для обработки деталей и контроля точности, ведется электронный архив технической документации. Эффективно решаются также организационные проблемы в технической подготовке производства (ТПП).

Основной целью ТПП является обеспечение высокого технологического уровня и технико-экономических показателей создаваемых и выпускаемых изделий, сокращение сроков и затрат при подготовке и освоении новых изделий на базе применения ИТ, создание наукоемкого производства, автоматизация и механизация технологических процессов, минимизация расходов материальных, трудовых, энергетических ресурсов и денежных средств.

Организационные проблемы возникают при формировании оптимального производственного расписания для цехов, выполняющих индивидуальные заказы, что является достаточно актуальной задачей на сегодняшний день. Учитывая возможные приостановки выполнения заказов из-за влияния экономических факторов на работу производственных участков, появляется необходимость быстрой корректировки суточных планов для обеспечения бесперебойной работы оборудования с минимальными потерями времени вследствие простоя рабочих мест. Решение данного класса задач позволяет значительно сократить время составления эффективного плана работы цеха, а также получить оптимальную загрузку рабочих мест, что способствует увеличению прибыли и повышению конкурентоспособности предприятия.

Для эффективного выполнения работ по ТПП решается комплекс взаимосвязанных задач, предназначенных для автоматизации конструкторских, технологических и других видов работ, а также формирование данных для задач обеспечения работы промышленного предприятия. В связи с многообразием и сложностью работ по ТПП особое значение приобретает проблема автоматизации планирования и управления этими работами. Эта проблема решается путем внедрения автоматизированной системы информационного обеспечения ТПП.

Для успешного решения задач планирования, связанных с обработкой большого объема информации, необходимо использовать сложные методы расчета. Прогресс информационных технологий позволяет разрабатывать соответствующий инструментарий для эффективного решения производственных задач.

Улучшение системы информационного обеспечения связано в первую очередь с совершенствованием поиска нужных данных в информационном пространстве предприятия. Это в свою очередь требует моделирования предметных областей и перехода от накопления и каталогизации информации к ее универсализации и извлечению знаний. Для выполнения этих работ необходимо использование методов решения задач информационного обеспечения деятельности специалистов без жесткой привязки к определенным видам задач на основе использования методов инженерии знаний.

Актуальность применения онтологий для моделирования предметных областей обеспечивается их потенциальными возможностями при решении таких задач, как: формализация, интеграция, обмен знаниями и их повторное использование. В частности, в данной работе рассмотрено применение онтологий для поиска данных в архивах САД-проектов машиностроительных предприятий, для информационного обеспечения оперативного планирования.

Онтология представляет собой формализованное описание понятий предметной области и отношений между ними, а также правил для составления новых понятий и отношений. Онтологии могут быть применены для решения задач накопления и повторного использования знаний, для создания моделей, специализированных языков (DSL) и программ, оперирующих понятиями любой предметной области, для формализации языка взаимодействия между программными агентами и между людьми.

На данный момент ведутся активные исследования по применению онтологий в различных областях, в том числе и в промышленности, в программной инженерии. В искусственном интеллекте онтологии применяются для описания баз знаний и правил, успешные результаты получены в области обработки естественного языка, где онтологии были применены для описания понятий и значений. Онтологии наилучшим образом подходят для выполнения метаописаний различных объектов и последующего поиска требуемой информации, что в целом позволит производить более эффективную обработку информации, устранить такие проблемы, как несоответствие форматов данных, неоднозначность терминов и понятий. Онтологии применяются в библиотечном деле для унификации описаний, планируется их использование для поддержки функционирования и нового вида цифровых библиотек, реализованных как распределенные интеллектуальные системы. На основе онтологий разрабатывается среда Semantic Web, в которой онтологии будут применены для индексирования имеющихся данных, что позволит производить более эффективный и релевантный поиск информации.

Ранее коллективом кафедры были выполнены работы в области САПР в машиностроении, направленные на разработку методик синтеза с помощью ЭВМ новых конструктивных схем машин и их элементов, технологической оснастки на основе объектно-ориентированного подхода (ООП):

- разработана технология визуального структурного проектирования применительно к гидроцилиндрам машин различного назначения и штамповой оснастки;

- разработана объектно-ориентированная программная система (ООПС) для моделирования динамических режимов работы машин и имитационного моделирования работы оборудования с учетом стохастичности технологического процесса;

- параллельно с развитием ООП к проектированию оснастки исследовано напряженно-деформированное состояние в элементах штампов с использованием пакета конечно-элементного анализа COSMOS/Works. Для применения разработок требуется продолжение исследований моделирования технологических процессов в условиях, при которых применение существующих универсальных программных систем, в частности реализующих МКЭ (Abacus, Ansys и др.), ограничено.

Выполнение этих работ показало, что для эффективной поддержки принятия решений, как в области машиностроения, так и в других областях, а также в области разработки ООПС различного назначения требуется интеграция с методами инженерии знаний. Это позволит более качественно решать задачи информационной поддержки процесса проектирования. Одной из таких

задач является поиск аналогов в базах данных машиностроительных предприятий. Вместе с тем следует развивать и существующие математические модели в различных предметных областях.

Задачи поиска аналогов узлов конструкций постоянно возникают в процессе проектирования изделий. Автоматизация поиска особенно важна для крупных машиностроительных предприятий, где имеются большие конструкторские отделы, занимающиеся разработкой изделий и накоплен большой объем информации о выполненных проектах. Проектирование ведется в среде CAD-систем, проекты хранятся в электронном виде в архиве, что позволяет автоматизировать поиск необходимой информации.

Задачи, решаемые в данной работе:

1 Анализ процессов конструкторско-технологической подготовки производства и информационных технологий, применяемых для информационной поддержки деятельности конструкторов и технологов.

2 Разработка ПО для решения задач создания прикладных ИСАПР на основе интеграции с CAD/CAM/CAE/PDM-системами.

3 Функциональный анализ методов поиска требуемой информации в базах данных CAD-проектов и применения онтологий для метаописаний CAD-проектов. Разработать онтологии и методику их применения для классификации CAD-моделей.

4 Повышение интеллектуальности проектирования изделий машиностроения в CAD-системах с использованием онтологического подхода.

5 Исследование поиска изделий (сборок) на основе их онтологического описания для повышения релевантности результатов поиска аналогов изделий в базах данных CAD-проектов на основе использования метаданных о CAD-проектах изделий.

6 Реализация программно-методических комплексов (ПМК) для моделирования задач КТПП, связанных с решением задач автоматизации проектирования, а также повышения качества информационного обеспечения оперативного планирования в машиностроении.

7 Разработка онтологической модели планирования производства машиностроительных изделий и планирования загрузки оборудования.

8 Разработка программного модуля формирования сменно-суточных планов, обеспечивающих оптимальную загрузку рабочих мест.

9 Разработка имитационной модели отображения и исследования работы цеха по реализации оперативных производственных планов.

Объект исследования – программные системы автоматизации КТПП, в частности, реализованные на основе онтологий.

Предмет исследования – улучшение информационного обеспечения КТПП на основе интеграции систем автоматизированного проектирования различного назначения и онтологического подхода.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

1.1 Состав и структура современной ИСАПР

Современное предприятие невозможно представить без средств автоматизации проектных работ, организационной деятельности по управлению ресурсами, производства изделий [1–3]. Современная корпоративная система промышленного предприятия формируется в рамках многоуровневой архитектуры, в которой системы конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП) занимают слой между системами автоматизированного контроля и управления производственными процессами и системами управления ресурсами – ERP-системами (Enterprise Resource Planning). Системы среднего уровня, обеспечивающие процессы проектирования, расчетов и др. носят название MES-систем (Manufacturing Execution System) и обеспечивают автоматизацию разработки и изготовления изделий, необходимой оснастки, а также решение организационных вопросов, связанных с информационной поддержкой проектирования, вводом и выводом информации, её хранением, архивированием, поиском как в архивах конструкторско-технологической документации, так и во внешних для предприятия источниках. Современные MES-системы предоставляют программные интерфейсы, на основе которых формируются прикладные системы в различных предметных областях [4]. В частности для связи с ERP-системами используется язык разметки связи бизнес – производство B2MML (Business-to-Manufacturing Markup Language), который поддерживается крупнейшими производителями ERP-систем (SAP, Baan, Oracle, JD Edwards, Microsoft).

Информационные технологии обеспечивают поддержку бизнес-процессов предприятия на всех стадиях жизненного цикла выпускаемой продукции и решают задачи его автоматизации. Совокупность таких ИТ, активно внедряемых в современных отраслях машиностроения, получила специальное название CALS-технологий [1–3].

В области КТПП уже сформирован комплекс программных продуктов, направленных на автоматизацию проектирования изделий, технологических процессов, инструмента, штамповой и другой оснастки, оборудования. Совокупность используемых для этого программных систем автоматизированного проектирования давно вышла за пределы базовой функциональности САПР. В настоящее время стандартный набор средств проектирования составляют CAD/CAM/CAE/PDM-системы, обеспечивающие полную функциональность, необходимую для проектирования и изготовления изделий [5; 6]. Проблемой для универсальных CAD, CAE и др. систем

является сложность интеграции, ограниченность API-интерфейса для доступа к их возможностям, неполная поддержка стандартизованных форматов файлов. В настоящее время наблюдается определенный разрыв между возможностями универсальных систем для расчета (CAE) и потребностями в прикладных областях.

1.2 Место ИСАПР в структуре автоматизации деятельности промышленных предприятий

Крупное современное промышленное предприятие включает в себя целый ряд подразделений различного назначения: основные и вспомогательные производственные цехи, склады, транспортную службу, органы управления, снабжения и контроля, инженерные и другие подразделения, образующие в совокупности сложную систему [1; 7].

Автоматизация деятельности промышленных предприятий осуществляется на основе автоматизированных интегрированных подсистем управления. Основные направления автоматизации:

- 1) автоматизация проектных работ и конструкторской подготовки производства – САПР;
- 2) автоматизация проектирования и управления технологическими процессами;
- 3) автоматизация научных исследований, опытно-конструкторских работ;
- 4) автоматизация оперативного управления процессами проектирования и изготовления изделий;
- 5) автоматизация планирования затрат ресурсов, материально-технического снабжения, административной деятельности и др.

Информационное обеспечение деятельности необходимо во всех случаях, а объединение компонентов перечисленных подсистем в корпоративную интегрированную систему управления предприятием (ИСУП) сопровождается и объединением информационных ресурсов на основе единого информационного пространства предприятия. Таким образом, создание корпоративной информационной системы на основе интегрированной системы автоматизированного проектирования – ИСАПР, системы управления данными проектов (PDM-системы) и интегрированной системы планирования и управления производством (ERP-системы) является базой для автоматизации КТПП.

Перед системами автоматизации деятельности в данном случае стоят следующие задачи:

- 1) создание единого информационного пространства предприятия;
- 2) снижение сроков разработки изделий с одновременным улучшением качества разработки и процессов их изготовления;

3) организация информационного обеспечения процесса проектирования и изготовления изделий, хранения и поиска необходимой для этого информации;

4) оценка материальных затрат, затрат других ресурсов и себестоимости на стадии разработки;

5) автоматизация системы планирования и оперативного управления производством для достижения полной загрузки производственных мощностей и обеспечения выполнения заказов точно в срок;

6) обеспечение прозрачности системы учета трудовых, энергетических и материальных ресурсов;

7) минимизация затрат на производство изделий путем постоянного контроля ключевых производственных показателей, затрат на поставку и хранение материальных запасов на складах;

8) контроль и анализ отклонений фактических показателей от планируемых для принятия управленческих решений.

Степень интеграции компонентов корпоративной системы может быть различной, функциональность и подчиненность определяется назначением системы. Выделение уровней позволяет лучше обеспечить различные требования к средствам автоматизации, например по быстродействию. В частности, в ИСУП выделяют: высшее административное управление, планирование ресурсов и управление производством, оперативное управление производством, управление и контроль за технологическими процессами и операциями.

Общими требованиями к ИСУП являются:

1) открытость архитектуры, возможность развивать систему, в том числе на основе использования программного обеспечения сторонних производителей;

2) совместимость со стандартами организации производства и программного обеспечения;

3) обеспечение интеграции отдельных подсистем в единую систему;

4) адаптация и согласованность с принципами организации производства;

5) обеспечение требований по динамике работы отдельных подсистем и производственных процессов;

6) независимость представления информации для пользователей от способа ее организации, хранения и обработки;

7) гибкость системы, возможность изменения общей структуры и конфигурации подсистем ИСУП в зависимости от требований к системе и подсистемам;

8) защита данных, производительность системы, устойчивость к отказам;

9) обеспечение экономической эффективности ИСУП.

Улучшение ряда показателей приводит к противоречиям, например: гибкость требует перехода к универсализации производства, а повышение производительности обеспечивается специализацией и требует повышения затрат на аппаратное и программное обеспечение ИСУП.

В целом, ИСУП обеспечивает значительное повышение конкурентоспособности предприятий, расширение возможностей его адаптации к изменениям внешних условий функционирования. Благодаря своевременной передаче информации, на всех этапах работы ликвидируются потери, возникающие из-за ошибок, дублирования, неполноты передаваемых данных в процессе проектирования и производства изделий. ИСУП повышает гибкость производственного процесса, сокращает запасы материалов, снижает производственный цикл и общие затраты.

Работы по совершенствованию ИСУП ведутся по следующим основным направлениям:

- 1) развитие функциональности ИСУП, обеспечение новых системных функций на всех уровнях управления производственным процессом, совершенствование отдельных подсистем ИСУП;
- 2) совершенствование методов информационного обеспечения деятельности, в том числе на основе методов инженерии знаний;
- 3) внедрение новых информационных технологий и достижений в области разработки ПС;
- 4) разработка и применение методов системного анализа к организации деятельности промышленного предприятия с учетом возможностей ИСУП;
- 5) разработка ПС для моделирования работы ИСУП.

1.3 Структура и принципы организации систем технической подготовки производства

Решение задачи повышения конкурентоспособности предприятия непосредственно связано с техническим прогрессом всех компонентов организации производства и использования его достижений. Одна из важнейших подсистем управления промышленным предприятием – это подсистема технической подготовки производства [8; 9].

Техническая подготовка производства – это комплекс конструкторских и технологических работ, обеспечивающих разработку и освоение производства новых видов продукции, совершенствование выпускаемых изделий, а также мероприятия по техническому перевооружению производства, повышению качества и надежности выпускаемых изделий [8].

Уровень информационной поддержки ТПП, особенно проектирования изделий, определяет эффективность изготовления продукции основными цехами, обеспечивает ритмичность ее выпуска с заданными техническими и экономическими показателями качества и потребительскими свойствами.

Системы автоматизированного проектирования являются составной частью ТПП. Проектирование новых, более эффективных конструктивных решений является важным условием развития любой организации, связанной с машиностроением. Нередко новые технические решения предназначены для модернизации существующих моделей продукции с учетом недостатков, выявленных в ходе эксплуатации изделий. Таким образом, прежде чем проектировать новое изделие, целесообразно провести анализ предыдущих проектов, чтобы учесть недостатки, а также получить возможность изучить опыт практического применения того или иного прототипа (аналога). Проектирование изделия регламентируется существующей методологией автоматизированного проектирования в САД/САЕ-системах, ГОСТами, стандартами Единой системы конструкторской (ЕСКД) и технологической документации (ЕСТД) [10; 11].

Процесс проектирования можно разделить на несколько этапов [2; 11]. Первым этапом проектирования является составление технического задания (ТЗ) на проект. Главной целью технического задания является документирование требований к изделию на основе проведения анализа состояния проблемы: выполняется изучение предметной области (если необходимо), анализ существующих и бывших в эксплуатации аналогов проектируемого объекта для выявления преимуществ и недостатков. Это позволяет учитывать недостатки существующих технических решений при создании новой продукции, не повторять ошибки и максимально развить разработки в тех областях, где получены положительные результаты. Важную роль при этом играет информационное обеспечение поиска требуемых аналогов в архивах инженерных решений предприятия.

После составления технического задания следует разработка эскизного проекта (ЭП), который включает в себя создание моделей проектируемых узлов, основной структуры изделия, макета, выполнение расчётов. Также создаётся техническая документация в соответствии с методологией проектирования и общепринятыми стандартами (ЕСКД, ЕСТД) [12]. Технический проект (ТП) включает в себя создание САД-проекта проектируемого изделия, разработку сборочных чертежей, спецификаций, численные расчёты проектируемого изделия. Задача рабочего проекта (РП) состоит в проектировании рабочих чертежей деталей изделия, формировании текстовой, графической и сопровождающей технической документации в электронном виде, окончание проектирования и документирования САД-модели изделия. Затем следует стадия технологической подготовки производства, которая предполагает разработку документации для изготовления деталей, контроля и сборки, испытаний изделия после сборки, а также мероприятий по внедрению, испытаниям изделия в реальных условиях. Жизненный цикл изделия включает также этапы эксплуатации у заказчика, анализ результатов эксплуатации и утилизацию изделия.

Автоматизация процесса проектирования изделий является ключевым звеном повышения эффективности деятельности конструкторских отделов машиностроительных предприятий, она основана на внедрении САД/САЕ/САМ/РДМ-систем [13; 14]. Важной составляющей процесса

проектирования является его информационное обеспечение, которое основано не только на системах стандартов ЕСКД и ЕСТД, но и на использовании базы существующих проектов изделий. Автоматизация поиска аналогов узлов конструкций позволяет сократить время и трудозатраты на проектирование новых изделий и повысить эффективность производства в целом. Общая структура современного процесса автоматизированного проектирования представлена на рисунке 1.1 [15], также показана схема системы информационного обеспечения процесса проектирования.

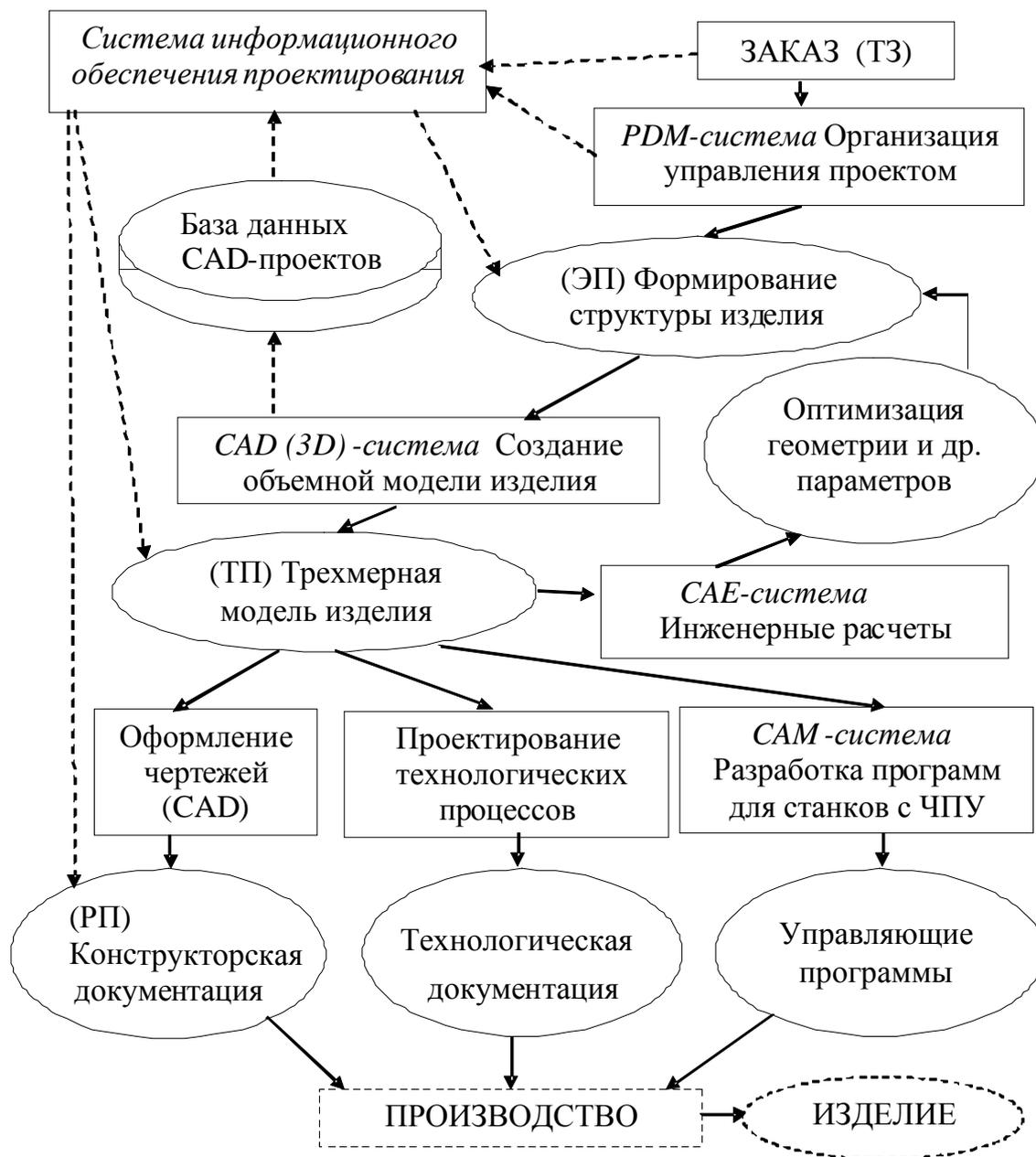


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема построения сквозного автоматизированного проектирования изделий с использованием CAD/CAE/CAM/PDM-систем, системы автоматизированного информационного обеспечения и базы данных CAD-проектов

Информационная поддержка проектирования осуществляется на всех этапах разработки изделий. В процессе проектирования ряд функций выполняются автоматизированными системами расчёта (САЕ-системами) и системой организации управления данными в процессе проектирования (PDM-системой) [16].

1.3.1 Конструкторская подготовка производства

Конструкторская подготовка производства – совокупность взаимосвязанных процессов проектирования с целью создания новых или модернизации конструкций действующих изделий [8]. Конструкторский этап технической подготовки производства выполняется отделом главного конструктора предприятия, в распоряжении которого имеется техническая база для производства опытного образца изделия и его испытания.

Выполняется конструкторская подготовка с соблюдением требований Единой системы конструкторской документации – ЕСКД. Состав работ в рамках конструкторской подготовки производства зависит от вида изделия, длительности его жизненного цикла, сложности, серийности, сроков выпуска и других факторов. В процессе выполнения конструкторской части ТПП производится создание электронной модели изделия:

- 1) выполнение проекторочных и проверочных расчетов изделия и его компонентов на основе инженерных методик;
- 2) разработка геометрической 2D- или 3D-модели изделия с применением САД-систем;
- 3) выполнение численных расчетов на статическую и динамическую прочность, податливость, разрушение и другие специализированные виды расчетов с применением САЕ-систем;
- 4) разработка чертежей (2D-моделей) деталей;
- 5) разработка состава изделия в виде спецификаций на основе базы данных материалов и покупных изделий;
- 6) подготовка комплекта конструкторской документации.

При проектировании сложных изделий несомненными преимуществами обладают 3D-модели, получаемые с помощью технологий трехмерного проектирования в САД-системах. Эти технологии позволяют смоделировать будущее изделие в САД-системе, получить 3D-модель и использовать ее для автоматизированного проведения численных прочностных и специальных инженерных расчетов с целью оптимизации конструкции, для создания фотореалистических изображений, моделирования процессов сборки, получения чертежей и генерации текстовых документов в соответствии с ЕСКД. Комплект конструкторской документации является основой для последующей технологической подготовки производства и разработки управляющих программ для оборудования с ЧПУ [2; 9].

1.3.2 Технологическая подготовка производства

Технологическая подготовка производства – это совокупность работ, определяющих последовательность выполнения производственного процесса изготовления нового изделия наиболее рациональными ресурсосберегающими способами с учетом конкретных условий производства данного предприятия [8; 12; 17; 18].

Технологическая подготовка производства обеспечивает готовность предприятия к выпуску новой продукции с заданным качеством, которое может быть реализовано в существующих условиях на современном технологическом оборудовании при минимизации трудовых и материальных затрат.

Основной задачей технологической подготовки производства является обеспечение высокого качества изготавливаемых изделий, соблюдения принципов рациональной организации процессов производства, эффективного использования производственного оборудования, роста производительности труда, снижения расхода материалов и энергоресурсов.

Технологическая подготовка производства проводится согласно требований Единой системы технологической документации (ЕСТД) и включает следующие стадии:

- технологический анализ рабочих чертежей и их контроль на предмет технологичности конструкции деталей и сборочных единиц;
- разработку прогрессивных или типовых технологических процессов, операционных карт;
- проектирование технологий изготовления специальных и унифицированных инструментов, технологической оснастки и оборудования для изготовления нового изделия;
- проектирование технологических и расцеховочных маршрутов, определение норм времени, назначение исполнителей в соответствии с требуемой квалификацией;
- разработку документации по сборке изделия;
- разработка управляющих программ для оборудования с ЧПУ для изготовления деталей, их контроля и сборки изделия;
- планирование использования станков и материалов, управление качеством;
- подготовку комплекта технологической документации, обеспечивающей изготовление изделий в соответствии с требованиями конструкторов и технологов.

Все рабочие чертежи деталей подвергаются технологическому анализу в соответствии с требованиями стандартов, который включает проверку на технологичность. Для его проведения и сокращения сроков проектирования технологи участвуют в проектировании изделий совместно с конструкторами.

При анализе рассматриваются технологические возможности имеющегося оборудования, возможности использования типовых технологических процессов, стандартной оснастки, средств механизации и автоматизации, имеющиеся на предприятия.

В процессе разработки технологических процессов определяются технологические маршруты движения деталей и сборочных единиц на участках цеха, а также между цехами при их изготовлении и сборке. На основе анализа технологических возможностей производства разрабатываются технологические процессы получения заготовок, их обработки, сборки узлов, изделия в целом и контроля на всех этапах производства.

На каждую деталь составляется технологическая карта, в которой указываются операции обработки, технологическая оснастка, режущий и измерительный инструмент, модели применяемого на каждой операции оборудования, режимы обработки. Одновременно решаются вопросы организационной подготовки производства.

После разработки технологических процессов проектируются специальные инструменты, оснастка и оборудование, разрабатывается технология их изготовления на предприятии. При этом рассматриваются возможности максимального использования имеющегося оборудования с необходимой модернизацией, оснастки и инструмента.

По каждому технологическому процессу на все операции назначается разряд работы, рассчитываются нормы времени, нормативы расхода материальных, энергетических и трудовых ресурсов, затем формируется комплект технологической документации.

Все этапы технологической подготовки производства могут быть автоматизированы с использованием специализированных технологических модулей в составе ИСАПР. Внедрение программного обеспечения для автоматизации создания новых изделий в рамках ИСАПР позволяет снизить сроки разработки и улучшить качество проектирования изделий на всех этапах технической подготовки производства.

Быстро развиваются и другие подсистемы автоматизации ТПП:

- системы управления инженерными данными и документооборотом (PDM-системы), которые обеспечивают организацию работ, электронный документооборот, контроль версий и др. по каждому проекту;
- EPD-системы (Electronic Product Definition), поддерживающие концепцию полного электронного описания объекта;
- электронные архивы, обеспечивающие структуризацию хранимой информации, быстрый поиск требуемых проектов, защиту от несанкционированного доступа к данным;
- организационные системы обеспечения производства для выполнения транспортных операций, управления технологическим оборудованием, работой автоматических складов, измерительными устройствами;
- системы планирования работ и оперативного управления процессами проектирования и производства.

1.4 Принципы построения, структура и характеристика компонентов комплексной ИСАПР

Рассмотрим общие принципы построения ИСАПР. В соответствии с выделенными задачами ТПП представим функции программного обеспечения ИСАПР (рис. 1.2). Программное обеспечение автоматизирует ряд этапов создания нового изделия в соответствии с ЕСКД и ЕСТД, а также реализует информационное обеспечение как процесса проектирования, так и решения ряда организационных вопросов.



Рисунок 1.2 – Функциональное назначение программного обеспечения ИСАПР

Основную работу конструкторов и технологов автоматизируют с помощью CAD/CAM/CAE-систем. В настоящее время уже сложилась их общепринятая классификация [19]:

- чертежно-ориентированные системы, которые появились первыми и успешно применяются до сих пор;
- системы создания трехмерной (3D) визуальной модели объекта;
- универсальные и специализированные прикладные программные системы для численных расчетов;
- программные системы для обработки заготовок на станках с ЧПУ, сборки изделий, автоматизированного хранения и транспортировки;
- системы поддержки электронной модели изделия, ведения электронного технического документооборота и моделирования изделия.

Современные технологии поддержки жизненного цикла изделия (CALS-технологии) обеспечивают разработку и поддержку электронной информационной модели изделия на протяжении всего его жизненного цикла, включая маркетинг, концептуальное и рабочее проектирование, технологическую подготовку, производство, эксплуатацию, ремонт и утилизацию [3]. Применение CALS-технологий является базой для превращения автономных CAD-, CAM- и CAE-систем в интегрированные САПР.

1.4.1 Программное обеспечение для создания геометрической модели изделия (CAD-системы)

Современные CAD-системы позволяют создавать трехмерную (3D) визуальную модель объекта проектирования для последующего использования на всех этапах жизненного цикла (рис. 1.3).

Все функции CAD-системы в процессе создания геометрической модели изделия можно разделить на четыре основных типа:

- функции построения, позиционирования и связи визуальных элементов геометрической модели;
- функции редактирования построенных элементов и связей;
- функции получения различной информации о визуальных элементах с целью анализа, специфицирования и др.;
- системные функции работы с моделями изделий (запись на диск и чтение, изменение формата представления информации и др.).

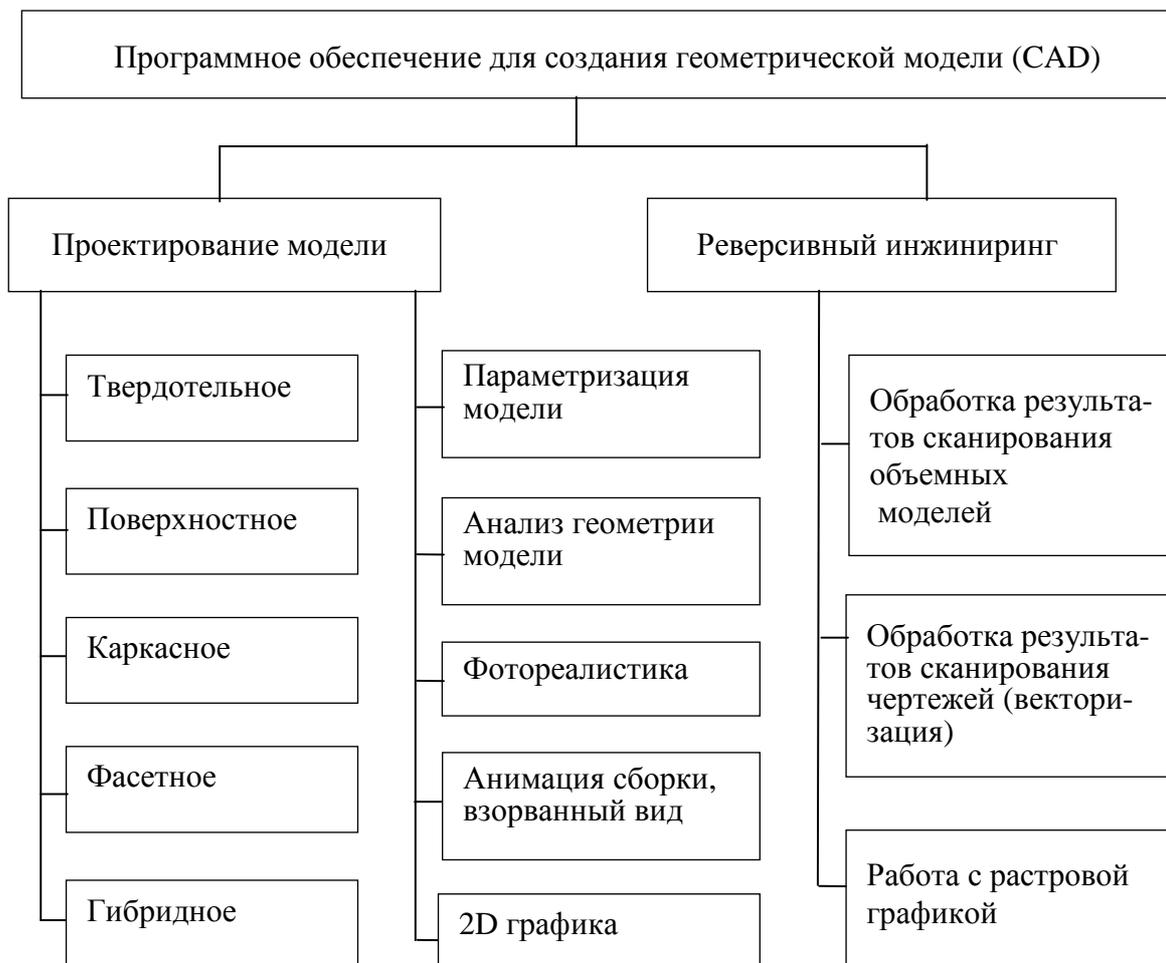


Рисунок 1.3 – Функции программного обеспечения в процессе создания геометрической модели (CAD-системы)

Классификация функций, необходимых для полноценной реализации САПР, приведена на рисунке 1.4. Функции построения бывают двух видов – построение новых элементов и преобразование уже построенных.

Функции построения новых элементов позволяют строить элементы следующих видов: плоские фигуры, объемные тела, поверхности и сборки. Каждый набор функций предоставляет возможность создания различных элементов визуальной модели согласно своему типу.

Функции редактирования используют для изменения формы и параметров уже созданных элементов. Их можно разделить на два основных типа: функции редактирования непосредственно визуальных моделей и функции, управляющие способом отображения визуальных моделей. Применяют и функции изменения положения элементов в пространстве.

Таким образом, современные САД-системы предоставляют конструктору следующие возможности:

- возможность построения сквозных систем проектирования;
- возможности многократного использования моделей спроектированных деталей и узлов при проектировании аналогов или вариантов существующих изделий;
- функции гибридного 3D-моделирования для проектирования изделий сложных форм и инструменты твердотельного, каркасного и поверхностного моделирования с возможностью работы с рельефами и триангулированными моделями;
- возможность проверки сборочных единиц на собираемость, автоматизированного анализа размерных цепей, проверки на соответствие электронного документа выбранным стандартам и проверки на технологичность детали с точки зрения механообработки и обеспечение за счет этого контроля сокращения числа ошибок при проектировании.
- возможность конвертации форматов данных, экспорт в JPEG, PDF, BMP, ACIS, и т. д., возможность работать с данными из других САД-систем;
- возможность интеграции с другими ПС на основе API-функций.

Кроме того, выделяют следующие функциональные возможности проектирования в САД-системах, которые реально уже вышли за пределы непосредственно процесса проектирования:

- автоматизированное получение видов, разрезов, сечений, проекций, динамических сечений;
- облегченная модификация поверхностей и тел;
- возможность выполнять Булевы операции между телами и поверхностями;
- поддержка истории создания твердотельных элементов, возможность откатов при построениях;
- наличие встроенных языков, DSL, возможность использования макросов;
- генерация чертежей по 3D-моделям, полностью интегрированное создание чертежей с поддержкой заданного стандарта;

- возможность редактирования нескольких чертежей, режим «Найти и заменить», проверка орфографии;
- диспетчер слоев, блоков и типов линий;
- встроенный калькулятор;
- поддержка ассоциативности. При внесении изменений в 3D-модель детали автоматически изменяется чертеж (перестраиваются виды, разрезы, сечения, проставляются размеры) [10], что снижает трудоемкость процесса проектирования;
- вставка растровых изображений и операции с ними;
- анализ моделей (гладкости сопряжений, анализ кривизны, анализ толщины тел);
- интерактивные измерения и расчеты разных величин;
- автоматическое восстановление моделей, проверка правильности построений деталей и сборок;
- выбор типа визуализации, наличие видовых экранов. Рендеринг, использование 3D-модели для создания фотореалистических изображений изделия, которые могут быть использованы для маркетинга, презентаций;
- быстрое изменение дизайна для проработки внешнего вида изделий, декорирование изделий текстурами. Возможность формировать сцену, располагать источники света, искать цветовые комбинации.
- интеллектуальный курсор для упрощения геометрических построений, объектная привязка, быстрая простановка размеров;
- настройка интерфейса пользователя (настройка меню, алиасов и панелей инструментов и т. д.);
- установка дополнительных инструментов;
- наличие информационного обеспечения, библиотек готовых компонентов, большой набор материалов со свойствами и др.;
- поддержка различных чертежных стандартов: ГОСТ, BSI, ANSI, DIN, и др., а также возможность их выбора;
- простота и легкость в изучении и освоении, наличие учебных материалов, встроенной помощи.

Важным направлением повышения производительности труда конструктора является автоматизация документооборота, формирования состава изделия и комплекта конструкторской документации с учетом требований ЕСКД и стандартов предприятия, оптимизация вывода на печать текстовых конструкторских и технологических документов:

- спецификаций (конструкторские);
- ведомостей покупных изделий, спецификаций;
- сводной спецификации;
- ведомостей эксплуатационных документов;
- извещений на изменение конструкторских документов.

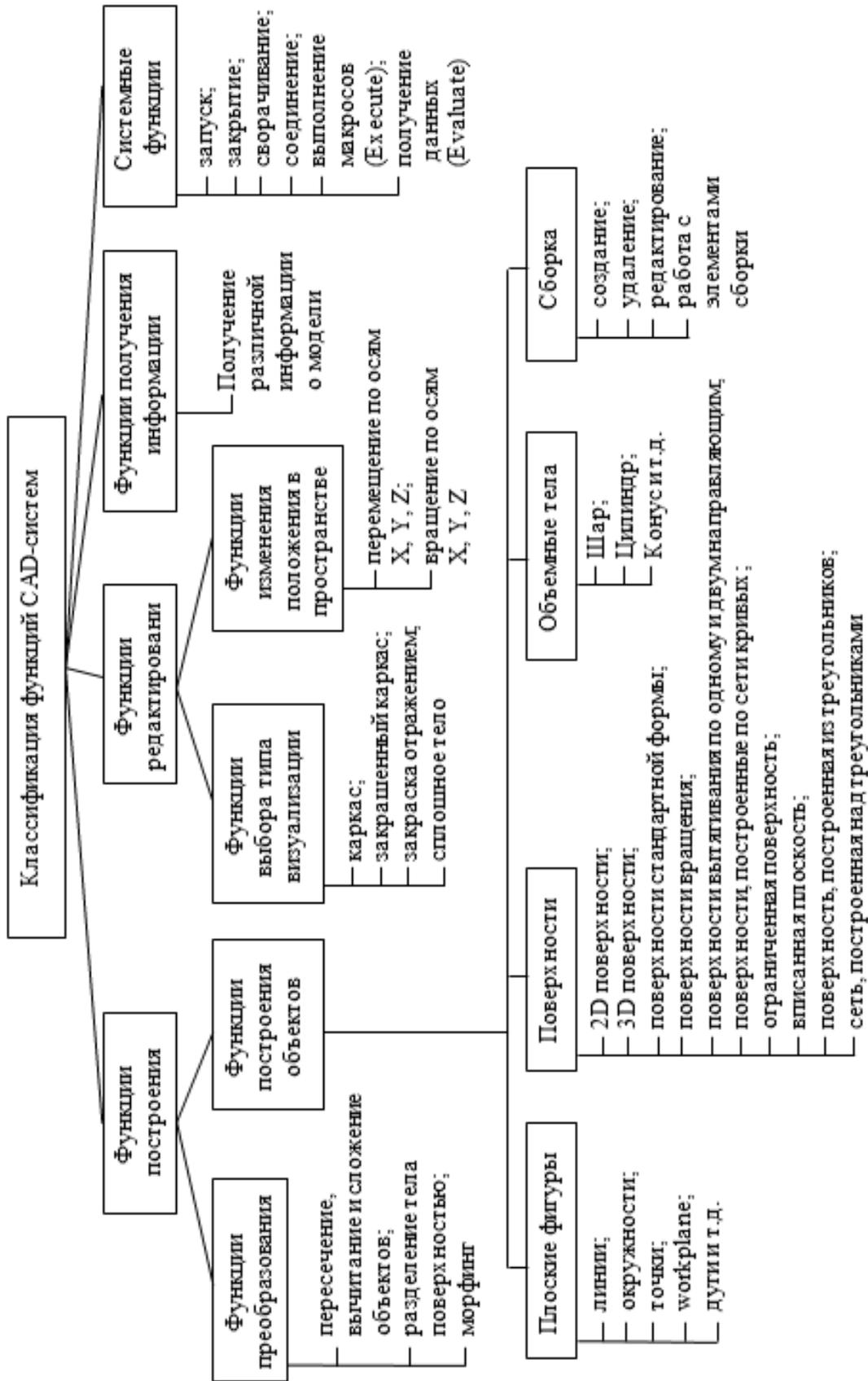


Рисунок 1.4 – Классификация функций, необходимых для использования САD-систем в ИСАПР

Уровень компьютеризации проектно-конструкторских и проектно-технологических работ на предприятии напрямую влияет на возможность быстрого и качественного создания современных изделий.

1.4.2 Прикладные системы для моделирования и расчета параметров изделия (CAE-системы)

Важную роль в ходе конструкторской подготовки производства изделий играют инженерные расчеты, которые включают решение задач следующих видов (рис. 1.5):

- вычисление массово-инерционных характеристик, объема;
- определение напряжений (расчеты на прочность);
- определение деформаций;
- расчет кинематики;
- расчет динамики, колебательных процессов, резонансных явлений, устойчивости и частотных характеристик объектов [20];
- определение служебных свойств (тепловые расчеты, расчеты процессов пластического деформирования, газо- и гидродинамики);
- оптимизация геометрии изделия;
- имитационное моделирование.

Для решения этих задач при проектировании изделий широко используют системы автоматизированного расчета конструкций (CAE-системы), которые позволяют оценить проекты на каждом этапе процесса разработки. ПС CAE позволяют анализировать не только прочность, но и кинематику, и динамику поведения проектируемого изделия. К таким системам можно отнести программы конечно-элементного анализа: ANSYS, ABAQUS, COSMOS, NASTRAN и др. [22].

К преимуществам метода конечных элементов следует отнести возможность работы с телами, которые имеют сложную геометрию, под действием сложной системы нагрузок. Метод конечных элементов позволяет определить поля деформаций, напряжений, температур, сопротивление деформации [6]. CAE-системы позволяют, например, определить распределение напряжений и температур в механических объектах, испытывающих дополнительную к статической тепловую нагрузку, провести вибрационный анализ детали под действием динамических нагрузок и др.

Таким образом, использование CAE-систем упрощает моделирование и дает возможность работать с более сложными геометрическими объектами, видами и системами нагрузок. При постановке задач они обеспечивают обмен данными с системами геометрического моделирования (CAD-системами).



Рисунок 1.5 – Прикладные программные системы для численных расчетов (CAE)

Основные вопросы, решаемые с помощью специализированных программных систем:

- разработка новых технологических процессов;
- оптимизация существующей технологии;
- прогнозирование возникновения дефектов, прогнозирование свойств материалов при изготовлении деталей.

Кроме инженерных расчетов, которые выполняются на основе 3D-модели, с помощью специализированных CAE-систем исследуются реальные технологические процессы литья, холодной, теплой и горячей объемной штамповки,ковки, сварки, выполняется анализ изделий на соответствие функциональным требованиям, на прочность и долговечность, технологичность и т. д. В CAE-системах можно использовать значительное число инструментов, деформируемых сред, анализировать практически любой технологический процесс деформирования, включая разделительные операции (вырубка, пробивка, механообработка).

Специализированные ПС позволяют получать в процессе моделирования пластического деформирования данные напряженно-деформированного состояния, изменения полей температуры, степени и скорости деформации по объёму заготовки, сопротивления деформации

в зависимости от условий деформирования, изучить влияние нагрева инструмента на распределение деформаций при горячей штамповке в продольном и поперечном сечениях заготовки. В частности, высокая точность расчета течения металла позволяет предсказывать возникновение различных штамповочных дефектов. Это в целом дает возможность оптимизировать конструкцию детали и процесс деформирования с учетом различных требований к изделию до принятия окончательных решений по последовательности операций и технологической оснастке. После проектирования технологической оснастки проводится моделирование технологического процесса и производится корректировка геометрии штампов до исключения дефектов деформирования.

Совместно с деформационными процессами можно анализировать процессы термической обработки (закалка, отпуск и др.), рассчитывать процессы изменения размера зерен при рекристаллизации, предсказывать свойства материала деталей после обработки (твердость, ударную вязкость, остаточные напряжения).

Таким образом, численное моделирование значительно уменьшает стоимость проектирования, снижает затраты или полностью исключает физическое моделирование и трудоемкость экспериментов по отладке технологии изготовления деталей.

Для решения технологических задач пластического формоизменения заготовок предлагаются специализированные системы DEFORM, QForm 2D/3D, LS-DYNA3D, системы MSC.Superforge, MSC.Marc AutoForge и др. [23]. В ряде случаев для проектирования различных схем достаточно 2D-модели, например, при концептуальном проектировании, разработке компоновочных схем, электрических, пневматических, гидравлических, некоторых кинематических схем и др. [6; 21].

1.4.3 Системы разработки программ для станков с числовым программным управлением (САМ-системы)

Специфика машиностроительного производства предусматривает изготовление широкой номенклатуры деталей высокого качества с заданными механическими характеристиками [2; 24]. Поэтому кроме процесса обработки резанием проектируются и автоматизируются технологические процессы заготовительного производства. В частности, САПР применяются при получении заготовок сложной формы методами литья, пластического деформирования, сварки, разрабатываются также вспомогательные процессы (рис. 1.6). Эти технологии позволяют приблизить форму заготовки к форме готового изделия и снизить затраты на материал, инструмент и время обработки на станках с ЧПУ, обеспечить контроль качества на каждой технологической операции [25; 26].

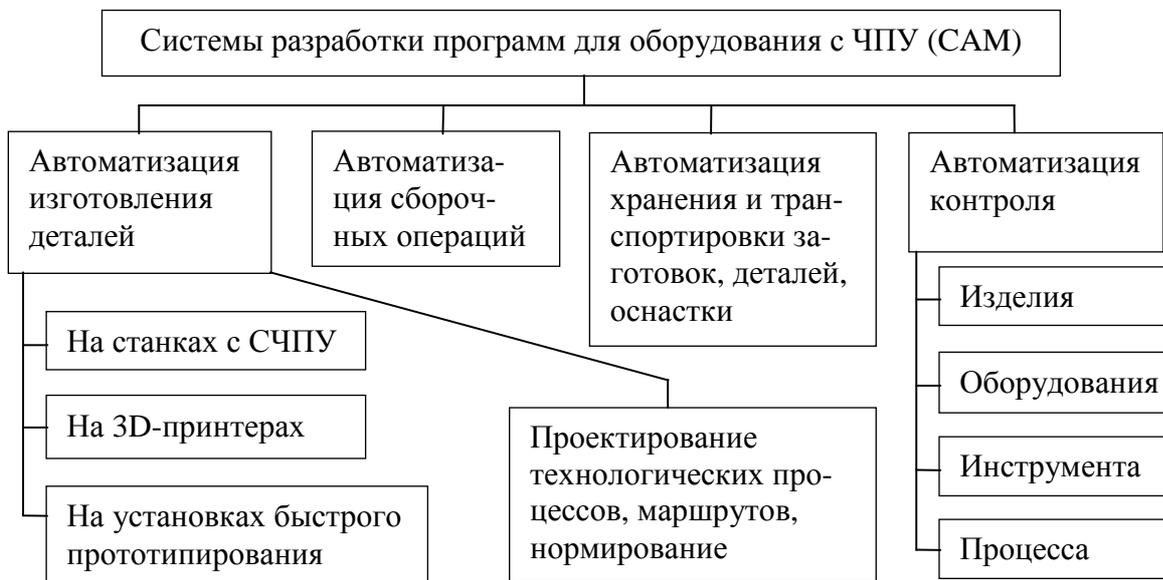


Рисунок 1.6 – Автоматизация изготовления и контроля деталей на станках с ЧПУ

Оборудование с ЧПУ выполняет не только обработку заготовок, но сборку изделий, обеспечивает автоматизированный учет, хранение, транспортировку заготовок, деталей, оснастки, инструмента и другие вспомогательные операции. Системы ЧПУ автоматизируют также средства контроля оборудования и процесса на всех этапах получения изделий.

1.5 Анализ способов интеграции программных продуктов с САД-системами

С помощью САПР выполняется не только трехмерное моделирование изделия, но проектируется и необходимая вспомогательная оснастка, штампы, специальный формообразующий, режущий и другой инструмент, форма которого связана с геометрией изделия и его деталей. Объемная модель изделия используется для его визуализации, выполнения расчетов с помощью САЕ-систем, проектирования технологических процессов автоматизированного изготовления и контроля на обрабатывающих центрах с ЧПУ с помощью САМ-систем. Поэтому вопросы интеграции с САД-системами играют важную роль при организации ИСАПР в составе корпоративной информационной системы предприятия.

Архитектура корпоративных систем большинства современных предприятий характеризуется фактической изолированностью ряда программных систем друг от друга даже при наличии развитой сетевой инфраструктуры. Поэтому проблема интеграции приложений для обеспечения совместной работы является одной из самых актуальных проблем для автоматизации деятельности крупных предприятий [1; 5; 9; 27; 28].

Одним из решением данной проблемы является интеграция существующих приложений в единую среду обмена функционалом, информацией и данными [1; 10; 28] на основе различных видов транспортной системы, предоставляющая механизм соединения приложений друг с другом [29–31]. Виды топологий для решения интеграционных задач приведены на рисунке 1.7 [32–34].

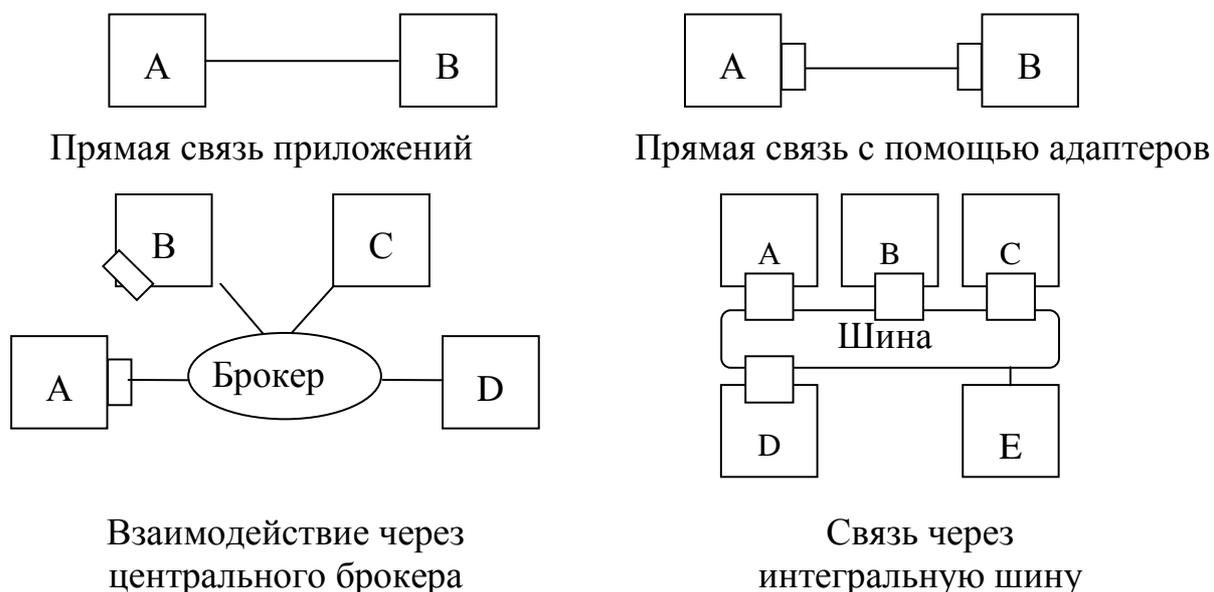


Рисунок 1.7 – Способы взаимодействия программных систем при работе в сети

Интеграция на основе прямых связей приложений друг с другом требует разработки для них дополнительного программного обеспечения.

Адаптеры и брокеры – специализированные программные компоненты, которые обеспечивают преобразование интерфейсов и данных конкретного приложения в интерфейсы и данные интеграционной среды. Адаптеры применяют для таких программных систем, как: корпоративные системы, базы данных, электронная почта, специализированные системы передачи информации [30; 35]. Через брокер или шлюз, к которому обращаются интегрируемые системы и приложения, направляются потоки сообщений и данных между этими системами [30]. Топология шины, обеспечивает подключение приложений к единой среде обмена информацией и является более гибкой, чем централизованный брокер.

Для интеграции приложений на базе предоставления одними программными продуктами функционала другим существует несколько наиболее развитых технологий: COM, CORBA и JavaBeans [36–43].

Принцип интеграции с САД-системами очень важен и определяет одно из приоритетных направлений их развития и совершенствования. Интеграция с САД-системами в рамках всего жизненного цикла продукта необходима для повышения качества изделия и снижения его стоимости. От возможностей интеграции зависит, например, применение САЕ-систем

для различных видов анализа изделий, САМ-систем для их изготовления. Поэтому возможности интеграции являются ограничением для разработки ИСАПР, включающих различные системы проектирования [1; 10; 17]. Возможность интеграции с САД-системами нужна также для решения сложных задач при проектировании, в частности для реализации логики построения визуальных объектов в САД-системах. Так же программные продукты должны уметь интегрироваться и с САД/САМ/САЕ-системами для полной автоматизации работы инженеров и конструкторов [5; 8].

В силу того, что на данный момент существует большое количество различных САД/САМ/САЕ-систем (различных по типу и сложности объекта проектирования и т. д.), существует несколько способов интеграции с такими системами. Выполним классификацию САПР по функциональным возможностям и способу обмена данными. На рисунке 1.8 приведена классификация способов интеграции прикладных САПР с различными САД/САМ/САЕ-системами.

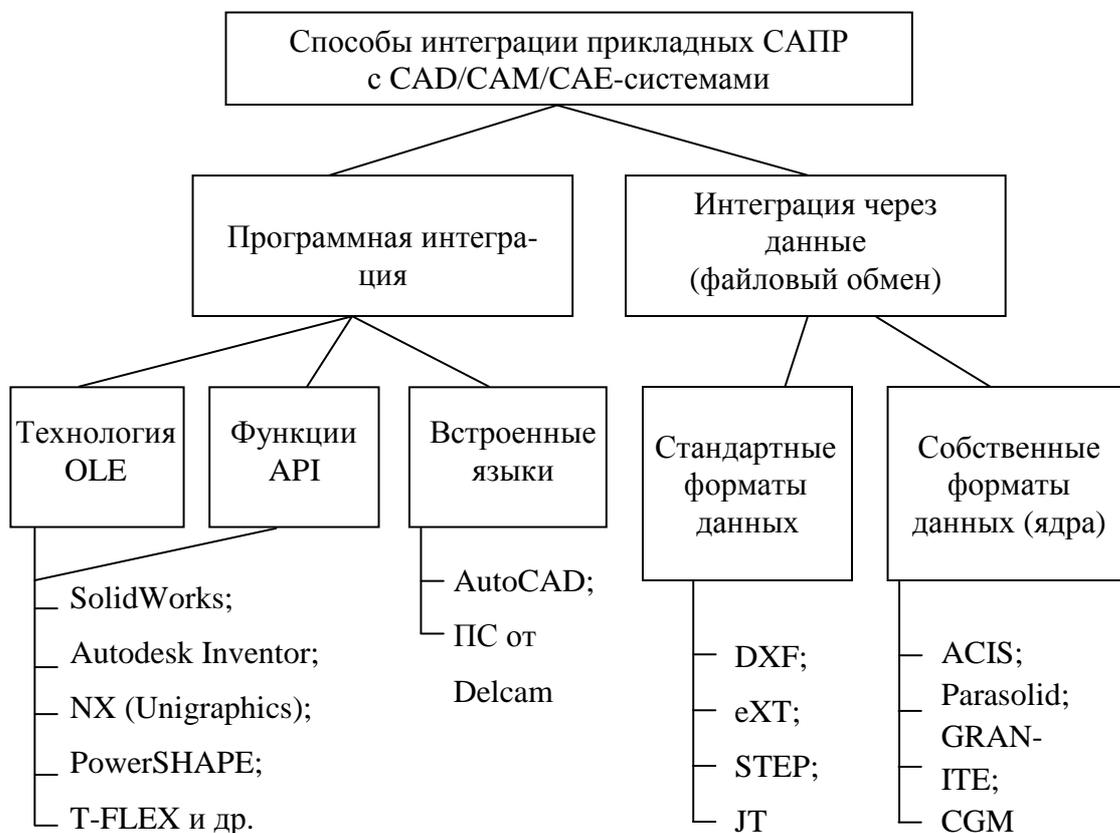


Рисунок 1.8 – Классификация способов интеграции прикладных САПР с САД/САМ/САЕ-системами

Современные САД/САМ/САЕ-системы включают практически весь набор средств индивидуальной настройки, расширения систем пользователем, интеграции со сторонними приложениями в ИСАПР [5; 16; 19; 44]. Расширенная классификация ИСАПР по возможностям функционального расширения и обмена данными представлена на рисунке 1.9.

Для обмена данными между различными CAD/CAM/CAE-системами используют стандартные форматы данных, например открытые форматы DXF, eXТ. Общий формат предоставления информации о геометрических моделях, в частности STEP, обеспечивает единство проектных данных. Модель данных JT используется для обмена данными при разработке изделий в различных CAD/CAM/CAE-системах и позволяет выполнить [51]:

- фасетное (мозаичное) представление моделей поверхностей;
- модели освещения, текстурные карты;
- точное граничное представление геометрии (NURBS);
- передачу структуры изделия;
- передачу атрибутов (цвет, слой, шрифт);
- передачу информации для производства изделия;
- передачу других метаданных из системы проектирования или управления данными об изделии (PDM).

Ряд ведущих CAD/CAM/CAE-систем основаны на одном ядре, которое является базовой платформой для геометрического моделирования. Например, на ядре Parasolid работают такие системы, как: ANSYS, MicroStation, MSC.Patran, NX (Unigraphics), Solid Edge, SolidWorks, PowerSHAPE, T-FLEX CAD, MasterCAM, Moldflow и др.

Приведенная классификация показывает, что можно непосредственно интегрироваться с CAD/CAM/CAE-системами или создавать модели в стандартном формате и открывать их в системах, поддерживающих данный формат.

Недостатком первого подхода является то, что некоторые системы предоставляют доступ не ко всем своим возможностям или то, что выполнение некоторых операций практически невозможно в силу сложности задания исходных данных для этого.

Недостатком второго подхода является большая трудоемкость работы программистов, т. к. необходимо полностью поддерживать стандартный формат и реализовать модули, позволяющие создавать модели такого формата, например, путем конвертации из внутреннего представления в САD-системе. Кроме того, внутренний формат хранения данных может иметь более широкие возможности для представления информации, чем формат обмена данными, что приводит к потере части информации при её передаче.

Таким образом, уровень САD-системы определяется не только возможностями построения геометрии, но и способами интеграции в комплексные САПР [19]. Рассмотрим методы интеграции с некоторыми наиболее распространенными САD-системами.

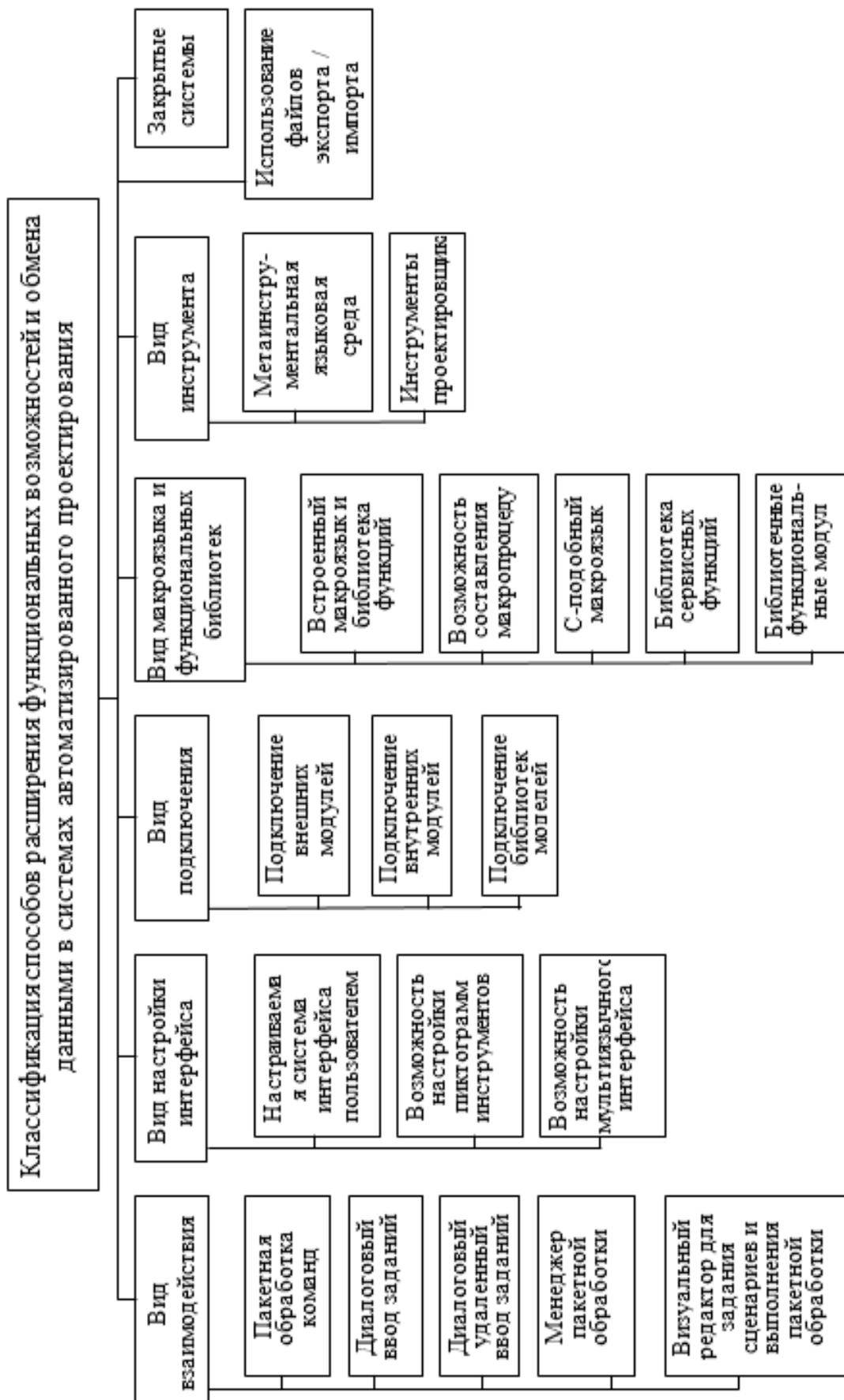


Рисунок 1.9 – Способы настройки, расширения функциональных возможностей и обмена данными в ИСАПР

Для интеграции с САD-системой SolidWorks используют API – это программный интерфейс, позволяющий получить прямой доступ к функциональным возможностям SolidWorks [6; 21; 44; 45]. Приложения можно разрабатывать с использованием VBA (Microsoft Visual Basic), C++ и других языков программирования.

Функции API предоставляют программисту возможности:

- автоматизировать процесс построения модели;
- выполнять интеграцию SolidWorks с другими САD/САМ/САЕ-системами, Microsoft Office;
- разрабатывать специализированные модули .

В САD-системе Autodesk Inventor используется программный интерфейс спецификаций BOM (Bill of Materials) API, который обеспечивает доступ к составу сборки, данным модели, возможность производить выборки и экспортировать данные, дает возможность отображать эту информацию в табличном формате на чертежах, в спецификациях [46; 47]. Кроме того, с помощью API в Autodesk Inventor можно решать следующие задачи:

- создание пользовательских панелей инструментов и команд;
- формирование моделей сборок (из ранее спроектированных деталей и узлов);
- редактирование параметров моделей деталей;
- создание сборочных зависимостей и настройка их параметров.

Для интеграции с программными продуктами PowerSolution от Delcam используется DLL библиотека «PowerSolutionDOTNetOLE», которая предоставляет функционал для разработки .NET приложений на VB.NET и Visual Studio .NET [48].

Подсистемы программного комплекса T-FLEX САD/ САМ/ САЕ/ САPP/ PDM также имеют открытый API-интерфейс, основанный на технологии .NET, и позволяют использовать языки программирования (C++, Visual Basic, C# и др.) [49]. Аналогичные возможности имеют и другие системы проектирования, например, Компас [50].

Таким образом, практически все имеющиеся на данный момент САD-системы имеют несколько механизмов автоматизации работы и взаимодействия с приложениями:

- макросы;
- встроенные среды программирования;
- API-интерфейс;
- обмен файлами моделей в согласованном формате.

Наибольшей гибкостью обладает API-интерфейс, так как он позволяет разрабатывать пользовательские программы на платформе САD-системы и содержит множество функций, которые можно вызывать из программ на различных языках программирования. В частности, API эффективно применяется для решения таких задач:

- интеграция САD-систем с различными Windows-приложениями, подразумевающая создание интерфейсов передачи данных, вызова сервисных утилит, преобразования данных и т. п.;
- разработка прикладных модулей, добавляющих при создании ИСАПР дополнительную функциональность в специальной предметной области к базовым возможностям САD-систем.

Выводы по разделу 1

1 Для эффективной поддержки принятия решений, как в области машиностроения, так и в других областях, требуется интеграция средств автоматизации с методами инженерии знаний, что позволит более качественно решать задачи информационной поддержки процесса проектирования.

2 Одной из актуальных задач автоматизации КТПП является поиск аналогов в базах данных машиностроительных предприятий. Особенности реализации поисковых механизмов для САD-проектов преимущественно связаны с графическим форматом хранимой информации. Распознавание аналогов конструкций усложняется еще и тем, что для описания их геометрических моделей используются различные виды представления информации.

3 Повышение релевантности поиска аналогов изделий в хранилищах САD-проектов может решаться различными методами. Один из наиболее перспективных методов основан на использовании инструментария инженерии знаний – онтологий, представляющих собой базы знаний специального типа, которые состоят из конечных подмножеств концептов, отношений между ними и заданных на концептах функций интерпретации.

4 Уровень САD/CAM/CAE/PDM–системы определяется не только возможностями построения геометрии, но и способами интеграции в комплексные ИСАПР для поддержки сквозного процесса проектирования и изготовления изделий.

РАЗДЕЛ 2

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ С CAD/CAM/CAE-СИСТЕМАМИ

2.1 Разработка и реализация алгоритмов построения сложных поверхностей для анализа возможностей CAD-систем

Одной из наиболее эффективных областей применения CAD-систем является машиностроительная промышленность, что связано с проектированием различных изделий, инструментов сложной геометрической формы.

На всех этапах сквозного автоматизированного проектирования используется [2; 10; 13; 14]:

- моделирование и визуализация геометрии проектируемого изделия в различных формах (3D-, 2D-модели);
- последующая генерация конструкторской и технологической документации;
- проектирование средств технологического оснащения и инструмента для получения деталей изделия, сборки и др.;
- преобразование информации об изделии для интеграции с другими системами автоматизированного проектирования (CAD/CAE) и производства (CAM).

К системам автоматизированного построения сложнопрофильных инструментов можно отнести CAD-системы: Delcam PowerSHAPE, SolidWorks, Cimatron и ряд других. В данной работе проведена разработка программного обеспечения для выполнения проектных расчетов и проектирования сложнопрофильных инструментов с использованием систем твердотельного и поверхностного проектирования Delcam PowerSHAPE и SolidWorks, что позволяет изучить их функциональные возможности при аппроксимации сложных поверхностей для последующего рационального применения при создании ИСАПР.

Поверхностное моделирование в большинстве случаев более трудоемко, чем твердотельное, но обладает более широкими возможностями и позволяет строить сложные пространственные конструкции. Поэтому для проектирования технологической оснастки необходимо выбрать CAD-систему с возможностями твердотельного и поверхностного 3D-моделирования.

В данной работе для автоматизации проектирования технологических процессов обработки металлов давлением и сложнопрофильных инструментов разработана методика, которая включает этапы [16; 53; 54]:

1 Расчет основных параметров процесса и инструмента. Например, в случае тангенциальной обкатки необходимо сформировать массив точек, по которому будет строиться рабочая поверхность инструмента. Необходимо также, чтобы система проектирования по загруженному массиву точек сумела в автоматическом режиме создать качественную модель поверхности.

2 Передача параметров рабочей поверхности инструмента в САД-систему и создание пространственной модели сложной поверхности инструмента по облаку точек или по предварительно сформированным сплайнам.

Таким образом, для исследования возможностей и сравнения САД-систем при проектировании сложнопрофильных инструментов необходимо предварительно сформировать массив координат точек сложной трехмерной поверхности, а затем построить ее с помощью средств, предложенных САД-системой.

Рассмотрим пример программной системы, позволяющей строить сложные поверхности на основе интеграции с САД-системами с использованием встроенных функций их аппроксимации. Данная задача важна, в частности, при использовании технологии и измерительного оборудования для реинжиниринга. В результате измерений получаем множество координат точек на поверхности изделия, которые необходимо передать в САД-систему, чтобы получить объемную модель изделия. Аналогично решается задача генерации рельефа на основе анализа цветовой гаммы плоского изображения, например в ArtCAM [26].

Решение задачи построения сложной поверхности в САД-системе может быть использовано для исследования возможностей различных систем проектирования. Например, можно предварительно вычислить по определенному алгоритму и сформировать массив координат точек некоторой поверхности. Этот массив координат точек будет храниться в файле и служить эталоном для аппроксимации сложной поверхности в САД-системе.

Построение сложных трехмерных поверхностей выполним на основе двумерных графических файлов, получаемых по плоскому изображению различных фигур. Разработаем программную систему «Генератор ландшафта», которая будет создавать поверхность по отдельным полигонам с использованием средств OpenGL [55].

Для создания пространственной поверхности необходимо выполнить расчет нормалей для полигонов, составляющих эту поверхность. Нахождение нормали к плоскости полигона производилось по заданным точкам на поверхности. В качестве нормали к вершине принято среднее значение нормалей окружающих ее граней. Нормаль определяли как результат векторного произведения пересекающихся векторов, принадлежащих граням. По данному алгоритму осуществлялся расчёт трехмерной геометрии поверхности для последующего построения.

Методика исследования возможностей выбранных систем проектирования состояла в выборе и обработке изображений для построения, предварительном вычислении по данному алгоритму и формировании массива координат точек некоторой трехмерной поверхности ландшафта. Далее в систему проектирования загружали этот массив и выполняли аппроксимацию поверхности средствами САД-системы. САД-системы используют собственные аппроксимационные алгоритмы, о результате работы которых можно судить, используя данную методику.

Таким образом, для создания рельефа и автоматизации построения 3D-поверхностей по облаку точек и сплайнам в CAD-системах PowerSHAPE и SolidWorks выполнена разработка двух программных систем:

1 Создание рельефа выполняется программной системой «Генератор ландшафта» с использованием OpenGL. Она имеет средства дополнительной обработки исходной информации об изображении для ее фильтрации и сглаживания.

2 С использованием программной системы «Интегратор» построение 3D-поверхности в Delcam PowerSHAPE и SolidWorks.

Для построения массива координат точек и сложной поверхности ландшафта выбрали несколько изображений в формате bmp. На рисунке 2.1 представлено первое изображение («Лоток») для получения поверхности. Особенности рисунка в том, что закрашенные области разделены на несколько участков и отсутствует четко выраженная внешняя граница.

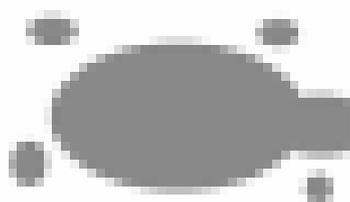


Рисунок 2.1 – Исходное изображение рисунка «Лоток» в формате bmp

На рисунке 2.2 представлена трехмерная поверхность для этого изображения, полученная при помощи ПС «Генератор ландшафта». Представлены различные виды этой поверхности с возможностью поворота в пространстве, увеличения размеров. Затем с ее помощью получали и сохраняли массив координат точек поверхности в файл, чтобы потом строить по этим точкам поверхность с использованием возможностей, предоставляемых CAD-системами: Delcam PowerSHAPE 2010 и SolidWorks.

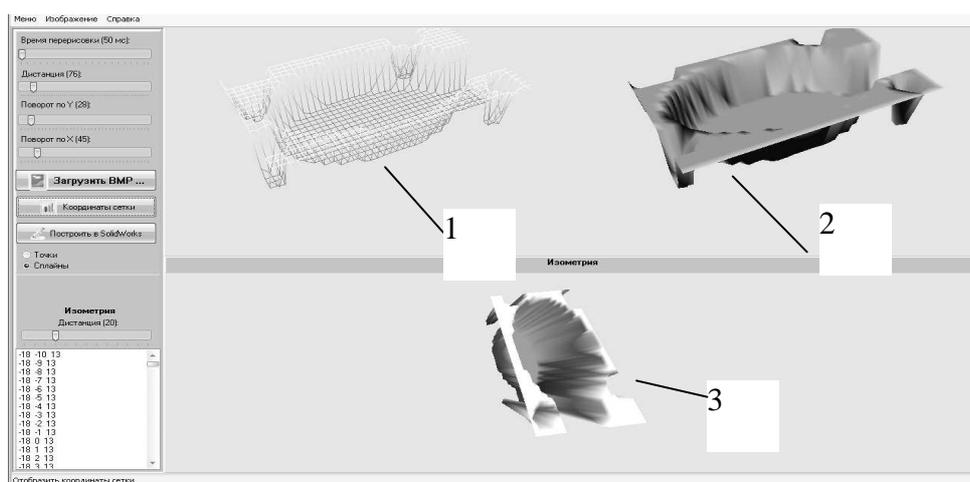


Рисунок 2.2 – Трехмерная поверхность, полученная по плоскому изображению с помощью разработанной программной системы «Генератор ландшафта» (с использованием OpenGL)

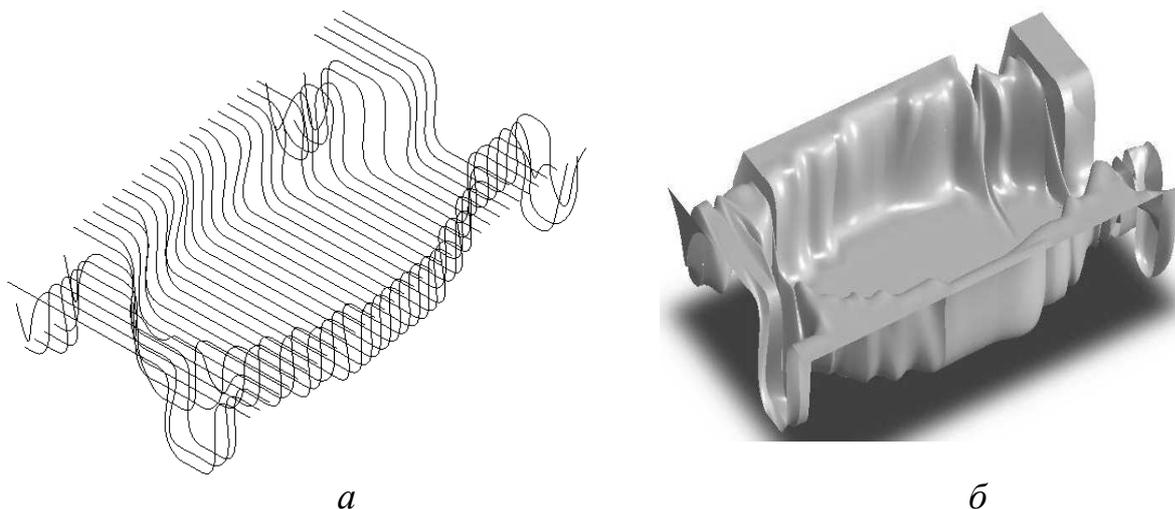
На рисунке 2.3 представлены координаты полученной трехмерной поверхности для первого изображения («Лоток»), сохраненные в файле. Количество точек – 814.

	points.txt
1	-22.00 -22.00 13.50
2	-22.00 -21.00 13.50
3	-22.00 -20.00 13.50
4	-22.00 -19.00 13.50

Рисунок 2.3 – Формат хранения координат поверхности

Затем с помощью программной системы «Интегратор» строили 3D-поверхности. Критериями качества аппроксимации заданных поверхностей в САД-системах может выступать степень соответствия геометрии полученной и заданной поверхностей, минимальное или полное отсутствие областей с самопересекающейся геометрией, отсутствие «ряби» на плоских поверхностях.

В PowerSHAPE поверхность строили непосредственно по массиву (облаку) точек и по сплайнам, которые предварительно строили с шагом по одной из осей координат. В SolidWorks поверхность строили по сплайнам, так как возможность построения по массиву точек отсутствует. Из рисунка 2.4 видно, что сплайны образуют незамкнутый контур поверхности, поэтому поверхность на краях получается искаженной, имеет самопересекающуюся геометрию.



*а – сплайны, построенные по точкам рисунка «Лоток»;
б – поверхность, построенная в SolidWorks*

Рисунок 2.4 – Построение трехмерной поверхности в SolidWorks

Для повышения точности аппроксимации при построении поверхностей средствами PowerSHAPE было принято решение создать сложную поверхность по предварительно замкнутому контуру сплайнов. На рисунке 2.5 показаны результаты различных вариантов использования возможностей PowerSHAPE для повышения качества аппроксимации сложных поверхностей.

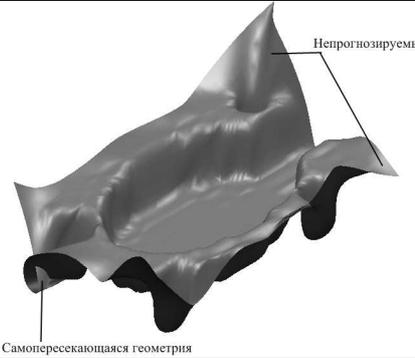
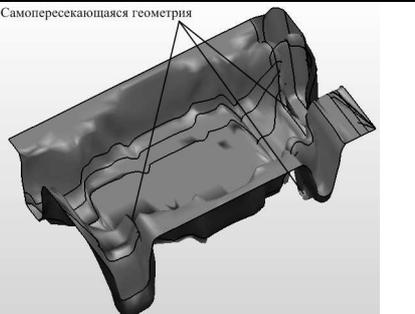
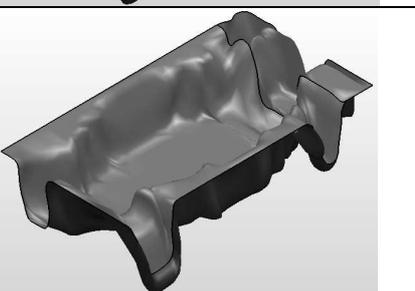
<p>Поверхность, построенная по массиву точек, имеет непрогнозируемые отклонения по контуру исходного рисунка и самопересекающуюся геометрию, соответствие изображению в центральной части достаточно высокое</p>	
<p>Поверхность, построенная с использованием сплайнов при наличии замкнутого контура, имеет только области с самопересекающейся геометрией, соответствие изображению снижается</p>	
<p>Поверхность, построенная при наличии замкнутого контура с использованием NURBS: практически отсутствуют области с самопересекающейся геометрией, качество поверхности и соответствие изображению заметно выше предыдущего варианта</p>	

Рисунок 2.5 – Результаты использования инструментов PowerSHAPE для повышения качества построения сложных поверхностей

Таким образом, для создания качественных поверхностей по облаку точек или сплайнам необходимо предусматривать построение замкнутого контура по периметру поверхности. Наличие замкнутого контура за счет более жесткого задания граничных условий позволяет избежать ошибок при аппроксимации поверхности на границах, уменьшается количество областей с самопересекающейся геометрией.

При использовании сплайнов соответствие полученных отображений заданной (исходной) поверхности снижается, что связано с «последовательным» алгоритмом аппроксимации при проходе по ним. Построение замкнутого контура по крайним точкам сплайнов недостаточно для исключения недостатков этого алгоритма. PowerSHAPE предоставляет больше

возможностей для управления и повышения качества аппроксимации сложных поверхностей. Можно варьировать настройками аппроксимации поверхности: «Из сети кривых» или другими методами интерполяции точек, кривых, угла наклона и использованием NURBS-поверхностей, степенью аппроксимации. При наличии замкнутого контура в PowerSHAPE доступны несколько вариантов построения сложной поверхности, что расширяет возможности выбора лучшего варианта аппроксимации. Для повышения качества моделирования поверхности следует аппроксимировать отдельные элементы рисунка по частям.

На рисунках 2.6...2.8 представлен еще один пример создания сложной поверхности «Вулкан» с помощью разработанных программных систем и построение этой поверхности в САД-системах. Стоит отметить, что построенная поверхность имеет 1756 точек, то есть в 2 раза больше, чем в предыдущем примере. Принципиальным отличием рисунка 2.6 от рисунка 2.1 являются тоновые переходы, а граница изображения выделена от фона цветом.

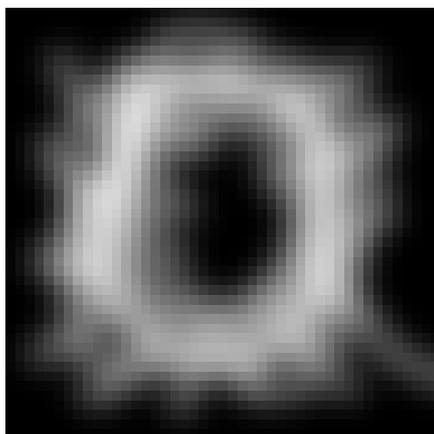


Рисунок 2.6 – Исходное изображение рисунка «Вулкан» для построения рельефа

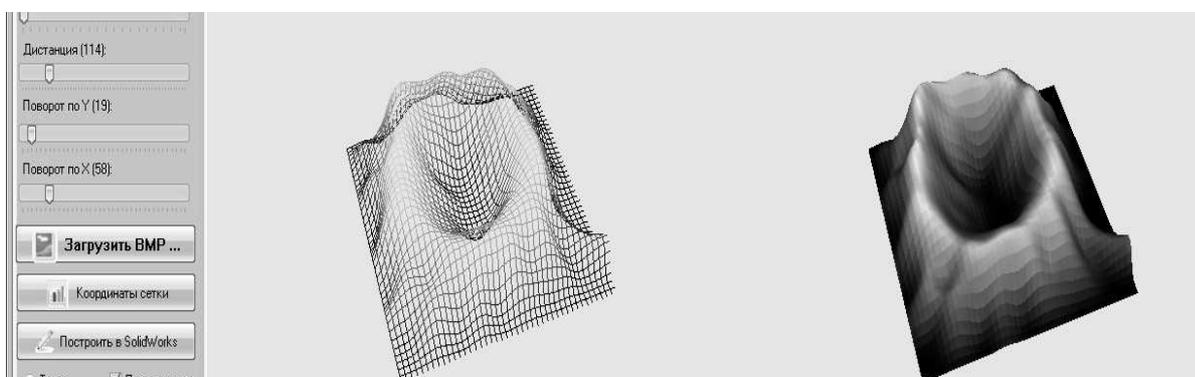
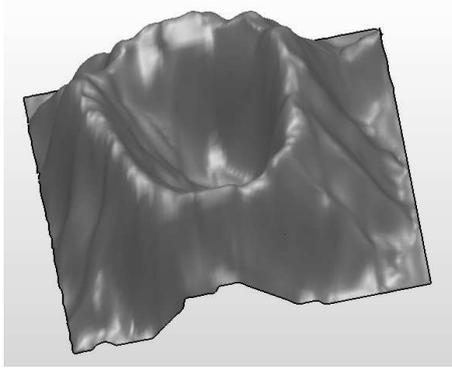
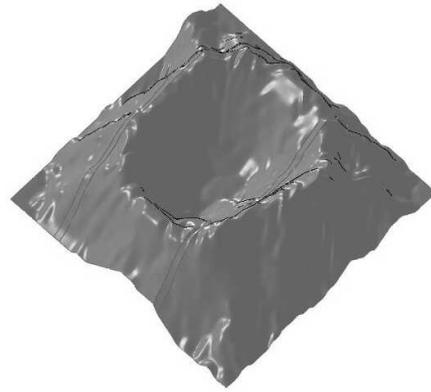


Рисунок 2.7 – Трехмерная поверхность, полученная с помощью программной системы «Генератор ландшафта» (с использованием OpenGL)



a



б

a – поверхность, построенная в PowerSHAPE;

б – поверхность, построенная в SolidWorks

Рисунок 2.8 – Вид трехмерной поверхности

В PowerSHAPE создание поверхности занимает несколько секунд, но при последовательном чтении координат точек из файла много времени тратится на операции отрисовки облака точек или сплайнов (примерно 3 минуты на данном компьютере). Поверхность создается автоматически без ошибок. При построении изображения данной поверхности в SolidWorks время последовательного построения сплайнов – в пределах 1 минуты, но имеются ошибки аппроксимации и достраивать поверхность приходится вручную, выделяя сплайны и сшивая полученные контуры. Общее время построения существенно возрастает (примерно 7 минут). Поэтому можно сделать вывод, что при большом количестве точек исходной поверхности целесообразно строить поверхность в PowerSHAPE. В этом случае поверхность будет построена в любом случае, даже если имеется самопересекающаяся геометрия.

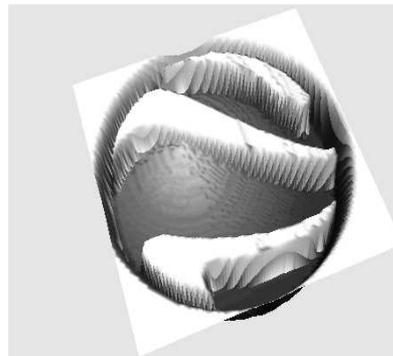
Также важно отметить, что размер получаемого файла модели данной сложной поверхности в PowerSHAPE (2.8 Мб) несколько меньше, чем в SolidWorks – 3 Мб. Этот параметр также должен учитываться при выборе САД-системы для проектирования сложнопрофильных инструментов.

На рисунке 2.9 представлен пример аналогичного создания сложной поверхности на основе изображения, которое имеет 7656 точек. Изображение включает однотонные участки (как «Лоток» – см. рис. 2.1) и тоновые (как «Вулкан» – см. рис. 2.6). Однотонные светлые участки создают резкие переходы по высоте сложной поверхности, что усложняет ее аппроксимацию. Контур поверхности выделен цветом, поэтому не требуется контроль периферийных областей при построении, так как внешние части поверхности за пределами контура проще обрезать.

В процессе построения в САД-системе фиксировали время и размер получаемого файла модели данной сложной поверхности. Стоит отметить, что при прямом импорте облака точек из файла в PowerSHAPE время снижается примерно на два порядка, но ограничиваются возможности управления аппроксимацией поверхности.



а



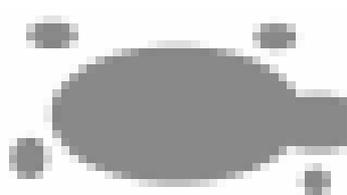
б

а – иконка GoogleEarth (плоский рисунок);

б – трехмерная поверхность

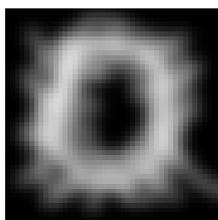
Рисунок 2.9 – Изображение исходного рисунка и трехмерная поверхность, полученная с помощью программной системы «Генератор ландшафта»

Результатом исследований построения сложнопрофильных поверхностей (рис. 2.10) в Delcam PowerSHAPE и SolidWorks с использованием предложенной методики является их сравнительная характеристика по нескольким параметрам. Данные получены на основании построения сложных поверхностей по облаку точек и сплайнам (табл. 2.1). В этой таблице 2.1 приведена также модель инструмента для тангенциальной обкатки трубчатых заготовок. Координаты сложной пространственной рабочей поверхности инструмента рассчитаны на основе анализа процесса получения сферических днищ на трубах [56].



А

814 точек



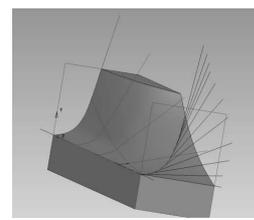
Б

1756 точек



В

7656 точек

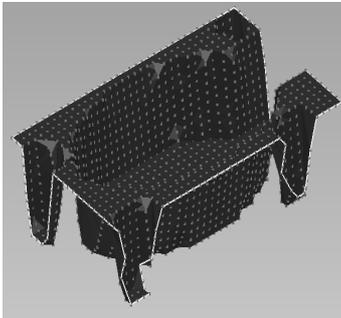
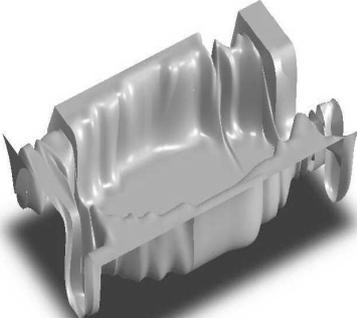
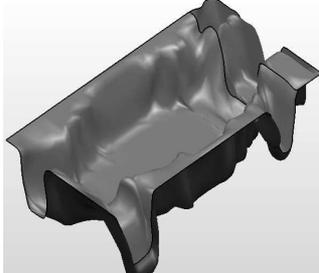


Г

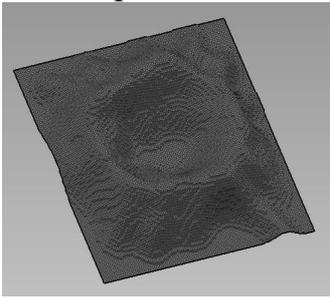
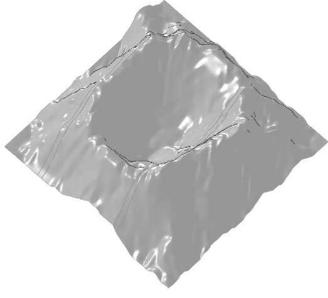
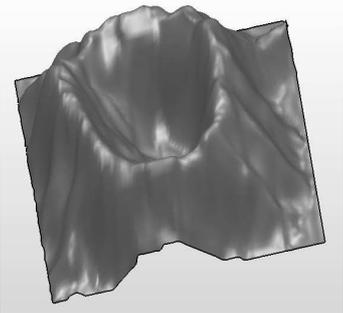
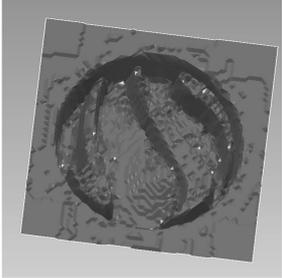
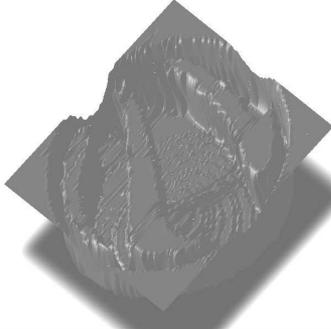
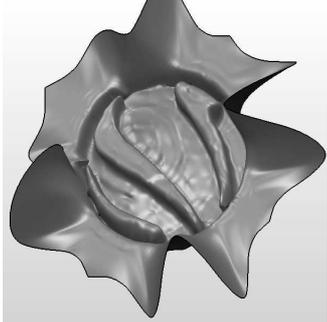
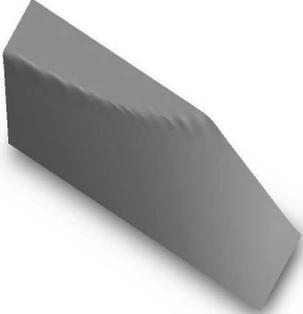
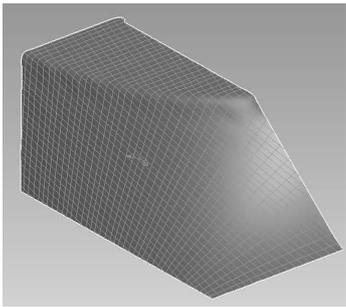
650 точек

Рисунок 2.10 – Исходные изображения для построения поверхностей (А, Б, В), модель инструмента (Г)

Таблица 2.1 – Сравнительная характеристика SolidWorks и PowerSHAPE при построении сложных поверхностей по массиву точек и сплайнам

Критерий	SolidWorks		PowerSHAPE
1	2		3
Полное время построения геометрии, минуты	А	5	2
	Б	7	3
	В	15 (при импорте сплайнов – в пределах 1 минуты)	36 (при импорте облака точек – несколько секунд)
	Г	2	2
Размер файла, Мб	А	2.1	3.8
	Б	3.03	2.8
	В	23.5	3.6
	Г	486 Кб	1.4
Построение поверхности по точкам / сплайнам	Нет / Да		Да / Да
Ошибки при построении	Да		Нет
Количество методов для построения поверхности	1 (поверхность границы)		6
Документация API функций CAD-системы	Хорошо документирована		Недостаточно полная
Возможность выбора порядка поверхности	Нет		Да (от 3 до 8)
Качество сложной поверхности А * 	Среднее – построение возможно только с учетом ручной правки по контуру детали 		Более высокое, есть возможность выбора варианта построения 

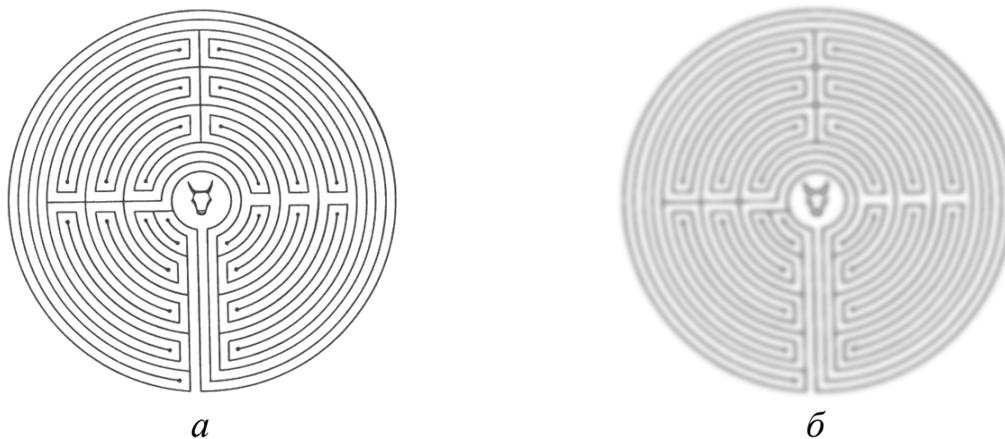
Продолжение таблицы 2.1

1	2	3
<p>Качество сложной поверхности Б *</p> 		
<p>– поверхности В *</p> 		
<p>– поверхности Г *</p> <p>* – Изображения фигур в данной колонке приведены по результатам аппроксимации полигонами из облака точек в PowerSHAPE.</p>		

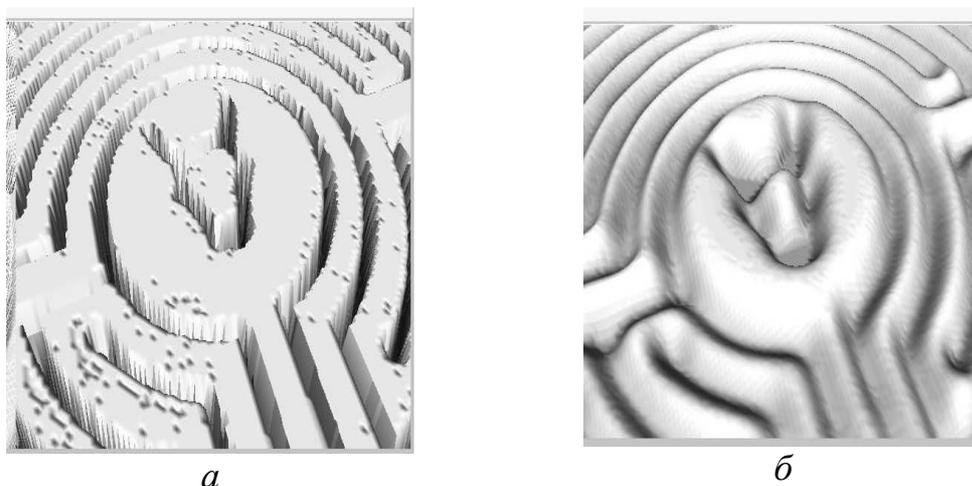
Одной из проблем при построении поверхностей являются резкие переходы по высоте, что приводит к дефектам при аппроксимации, поэтому желательна обработка получаемых поверхностей до построения в CAD-системе (фильтрация, сглаживание), чтобы исключить дефекты поверхности.

Выполним построение изображения «Лабиринт Минотавра» с использованием сглаживания поверхности в программной системе «Генератор ландшафта». Следует отметить, что такая обработка не может быть проведена, если требуется точное соответствие поверхностей. Исходное и сглаженное плоские изображения приведены на рисунке 2.11. Соответствующие объемные изображения данного изображения приведены на рисунке 2.12.

Таким образом, для получения более «гладких» поверхностей и упрощения их аппроксимации предложено использовать сглаживание исходных изображений в программной системе «Генератор ландшафта» до построения в CAD-системе.



а – исходное изображение; б – сглаженное изображение
 Рисунок 2.11 – Исходное и сглаженное плоские изображения рисунка
 «Лабиринт Минотавра»



а – изображение с дефектами поверхности; б – сглаженное изображение
 Рисунок 2.12 – Объемные изображения рисунка «Лабиринт Минотавра»

Следует отметить, что основной задачей данной работы являлась разработка методики и программного обеспечения для исследований, а результаты экспериментов получены в рамках знаний авторов о возможностях данных САД-систем. В частности, для более полного анализа необходимо проведение исследований с импортом и операциями, производимыми с облаком точек, которые реализованы в PowerSHAPE 11. В этом случае время импорта точек из файла составляет несколько секунд, что существенно расширяет возможности обработки массива точек.

2.2 Разработка и реализация технологии визуального структурного проектирования для построения объемных моделей изделий в САД-системе

В разделе выполнен анализ состава автоматизированных систем проектирования, определены основные направления развития таких систем и требования к ним на основе объектно-ориентированного подхода. Изложены основные положения технологии визуального структурного проектирования (ВСП) изделий машиностроения.

2.2.1 Характеристика технологии визуального структурного проектирования изделий машиностроения

Автоматизация проектирования обеспечивает резкий скачок в повышении качества изделий за счет интеграции универсальных расчетных САЕ-систем, баз данных, средств геометрического моделирования и проектирования технологий. Однако, такие системы позволяют проверить прочность уже сконструированных изделий при наличии их геометрических моделей. Если прочность элементов конструкции мала, приходится менять конструкцию, корректировать её модель в САД-системе и повторять расчёт. Такой подход к проектированию требует значительных финансовых и временных затрат.

Наличие мощных универсальных систем проектирования не исключает развития прикладных программных систем для инженерных расчетов в различных предметных областях [5; 6; 57]. Прикладные программные системы для инженерных расчетов особенно необходимы на первых этапах проектирования, когда еще не сформулированы полностью принципы построения системы, не приняты конструктивные решения, а для прочностного анализа средствами САЕ-систем с применением метода конечных элементов недостаточно данных. Существующие системы для инженерных расчетов (например, WinMachine) в настоящее время слабо интегрированы с универсальными средствами конструкторской разработки.

Современные системы проектирования должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- осуществлять моделирование основных понятий предметной области на достаточно высоком уровне абстракции;
- обеспечивать универсальность в рамках задач автоматизированного рабочего места специалиста;
- выполнять информационную, методическую и интеллектуальную поддержку проектирования;
- обеспечивать интеграцию с другими универсальными системами проектирования, системами поддержки жизненного цикла изделий;

– обеспечивать качественный интуитивно-понятный интерфейс пользователя, относительную простоту освоения.

Реализация данных требований возможна на основе применения технологии визуального структурного проектирования, структурной модели предметной области, при объектно-ориентированном подходе к проектированию, параметризации элементов изделия и использовании прикладных библиотек компонентов.

Общим подходом при разработке систем является создание и исследование их структуры, анализ характеристик, режимов и параметров функционирования, именно поэтому необходимы средства для ВСП [16; 53; 58]. Программные инструменты для визуального проектирования программных систем (CASE-средства) интенсивно развиваются [59; 60]. Причиной слабого развития CASE-средств в машиностроении является необходимость участия в этом процессе специалистов в конкретных предметных областях. Имеющиеся CASE-средства в основном выполняют роль графических редакторов, которые не обеспечивают задание и анализ логики проектирования и поддержку принятия проектных решений. Для эффективного сотрудничества специалистов в прикладной области и разработчиков программных систем необходимы общие диаграммные методики, которые позволили бы совместно разрабатывать логические модели требуемых программных систем [61–62]. Такие ПС должны обеспечивать использование этих методик и непосредственный переход от выполнения инженерных расчетов и проектированию в САД-системе.

Одним из основных средств повышения эффективности моделирования и автоматизации проектирования является объектно-ориентированный подход, который позволяет отобразить свойства и функции реальных объектов в их программных моделях. Это дает возможность повысить интеллектуальность моделей, адекватно моделировать поведение более сложных технических систем. В частности, объект проектирования получает возможность контролировать свою прочность, жесткость, определять свои размеры и т. д. [63; 64].

Рассмотрим структуру интегрированных приложений для автоматизации проектирования изделий машиностроения на основе использования данных принципов (рис. 2.13). Эффективность ВСП проверена, в частности, при проектировании элементов кузнечно-прессового оборудования и штамповой оснастки [65; 66].

Гибкость и интеллектуальность таких систем повышается за счет выполнения геометрических объектов параметрическими, а также за счет расширения объема знаний объектов не только о себе (как обычно принято при ООП), но и об окружающей среде. Степень знаний о себе должна быть достаточной для оценки возможности функционирования объекта в окружающей среде. Например, объект должен обладать информацией о необходимом для него рабочем пространстве, твердости и шероховатости поверхности контактирующих с ним объектов и т. д. Роль носителя ин-

формации в этом случае выполняет специальный объект – «виртуальный инструмент», параметрически связанный с основным объектом – деталью. Тогда с помощью «инструмента» можно обеспечить необходимое рабочее пространство для установки детали путем булевских операций при создании 3D-модели сборки изделия в САД-системе [24]. В процессе разработки для каждой из параметрических моделей элементов конструкции и их «виртуальных инструментов» задается набор переменных, характеризующих их геометрию. Значения этих переменных могут быть заданы как константы или математические зависимости, что обеспечивает гибкость при параметризации конструктивных элементов изделий.

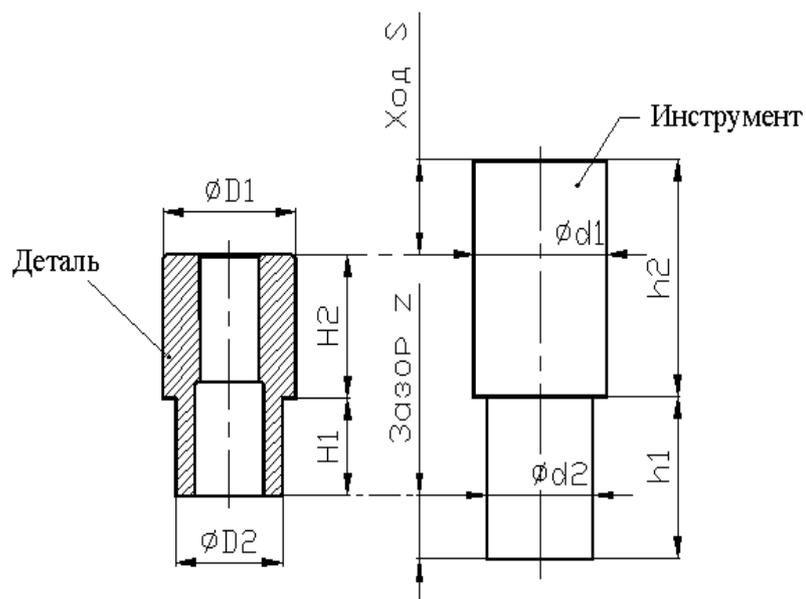
Для обеспечения корректности сборки изделия необходимо с каждой деталью связать «виртуальный инструмент», который будет обеспечивать для нее формирование рабочей зоны. «Виртуальный инструмент» представляет собой такую же параметрическую модель, как и деталь, а его геометрия определяется параметрами и условиями функционирования этой детали. Например, рассмотрим случай установки направляющей втулки в плиту блока штампа (рис. 2.14) [16].

Как видно из рисунка «виртуальный инструмент», связанный с деталью «Втулка», хранит информацию о размерах детали, зазорах, ходе верхней плиты штампа (ход S). Назначением этой информации является обеспечение возможного перемещения втулки с плитой на величину хода S . Если в области, ограниченной «виртуальным инструментом», имеются другие детали, то они могут мешать перемещению втулки и их необходимо перепроектировать. При этом система ВСП, используя «виртуальный инструмент» заданной детали и логические операции, выполняет с помощью САД-системы в смежных с ней деталях соответствующие полости, необходимые для обеспечения требуемой рабочей зоны для этой детали. Такой подход к проектированию обеспечивает не только условия для корректной начальной установки втулки, но исключает и опасность контакта с верхней плитой штампа при рабочем ходе.

Зависимости между параметрами детали и «виртуального инструмента» обеспечивают их логические связи: δ_D – гарантированный зазор между деталью «Втулка» и другими деталями штампа, $f(D2)$ обеспечивает посадку втулки в плите с натягом, z_1, z_2 – гарантированные зазоры по высоте. В частности увеличение «инструмента» на величину z_1 гарантирует, что отверстие для установки втулки в плиту будет сквозным. В процессе проектирования информация о размерах передается от детали к ее «инструменту», который создает требуемые условия для функционирования этой детали в изделии и «знает», какой реальный инструмент необходимо применить к смежным деталям изделия для формирования этих условий.



Рисунок 2.13 – Диаграмма компонентов ПС для реализации технологии визуального структурного проектирования



$$d1 = D1 + \delta_D; \quad d2 = f(D2); \quad h1 = H1 + z1; \quad h2 = H2 + S + z2.$$

Рисунок 2.14 – Эскиз втулки и ее «виртуального инструмента» для обеспечения автоматизации сборки изделия на основе ВСП

При таком подходе к проектированию в базе данных хранятся только параметрические модели заготовок деталей. Например, заготовка для детали «Втулка» не имеет внутреннего отверстия (см. рис. 2.14). При сборке конструкции в CAD-системе отверстие во втулке формируется «инструментом» детали «Колонка», которая размещается по оси втулки.

Таким образом, при использовании ВСП втулка формирует под себя рабочее пространство для установки в плиту и обеспечивает необходимое пространство для перемещения в процессе работы штампа (на ходе S). Такой подход практически исключает ошибки при автоматизированном проектировании в CAD-системе.

Структурный подход к проектированию изделий позволяет визуаль-но компоновать схему конструкции из элементов (пиктограмм) непосредственно на экране дисплея с помощью специализированного графического редактора; в котором связи между деталями задаются в виде ребер графа. Это позволяет конструктору в процессе проектирования отвлечься от конкретного решения, мыслить более общими категориями и сосредоточиться на проектировании структуры изделия в целом. Конечной целью проектирования в этом случае является создание графа сборки, в узлах которого расположены конструктивные элементы проектируемого изделия (графические образы), а ребра задают порядок и последовательность применения этими элементами своих «виртуальных инструментов». Важным аспектом технологии является возможность использования метаописания сборки, в том числе с использованием DSL [67].

Предложенная технология связывания объекта при его конструировании с «виртуальным инструментом» позволяет закрепить за параметрическим «инструментом» реальный режущий инструмент (сверла, фрезы, развертки, зенковки и т. д.). Это дает возможность при разработке дерева сборки выходить непосредственно на автоматизированное составление последовательности технологических операций, необходимых для изготовления деталей проектируемого узла, и автоматическое формирование технологического процесса изготовления изделия.

Таким образом, предложенная технология визуального структурного проектирования изделий машиностроения позволяет разрабатывать структуру проектируемого объекта и по ней строить его 3D-модель с использованием существующих CAD-систем.

Объектно-ориентированный подход, положенный в основу технологии, позволяет повысить интеллектуальность процесса проектирования на основе библиотеки параметрических моделей элементов конструкции с встроенными функциями для реализации инженерных расчетов параллельно с проектированием геометрии деталей. Правильность сборки деталей в изделии контролируется на основе использования информации о рабочих зонах этих деталей, которая хранится в связанных с ними «виртуальных инструментах». Формирование метаописаний деталей и сборки позволяет находить аналоги в базах CAD-проектов, выполненных на основе технологии ВСП.

2.2.2 Функциональная модель программной системы для построения изделий в САД-системах на основе ВСП

Рассмотрим функциональную модель ПС для реализации технологии визуального структурного проектирования. Ранее данная объектно-ориентированная технология была реализована в виде программного комплекса интегрированного с САД-системой и предназначенного для проектирования штампов для вырубки-пробивки [16].

В состав программного комплекса САПР входят:

- подсистема визуального структурного проектирования, позволяющая проектировщику создать граф сборки модели изделия из графических образов (пиктограмм) его конструктивных элементов;
- двумерный графический редактор контуров, предназначенный для задания произвольных контуров рабочего инструмента (штампов для вырубки-пробивки деталей заданной формы);
- подсистема генерации управляющего файла метаописания для сборки изделия в среде САД-системы;
- база данных, содержащая информацию о параметрических моделях элементов конструкции (деталей штампа) и их «виртуальных инструментах», а также взаимосвязях параметров деталей и «инструментов»;
- подсистема визуализации изделия, контроля логики сборки и формирования рабочего пространства для каждой детали.

В результате работы комплекса генерируется управляющий файл сборки для САД-системы. Управляющий файл занимает в несколько раз меньше дискового пространства, чем файл модели в САД-системе за счет того, что информация о параметрических моделях хранится отдельно в базе данных. Интеграция разработанного программного комплекса с универсальной САД-системой осуществлена на базе ее программного интерфейса (API), содержащего функции для выполнения построения 3D-модели изделия. Программный комплекс обеспечивает преобразование полученного управляющего файла в команды САД-системы и выполнение сборки модели изделия с предварительной параметрической настройкой размеров деталей. При этом сохраняется возможность последующего редактирования модели полученной конструкции средствами САД-системы.

На рисунке 2.15 представлены информационные связи ПС в процессе построения визуальной модели изделия в САД-системе [23]. Построение визуальной модели в САД-системе выполняет подсистема визуализации после того, как рассчитана вся необходимая информация. На входе необходимо иметь все размеры составляющих частей модели и метаописание структуры изделия. Необходимо также знать все данные для соединения с выбранной САД-системой. В ходе построения элементов визуальной модели или параметризации шаблонов этих элементов свои ограничения на выполняемые действия может накладывать интерфейс взаимодействия с САД-системой (API), которая выбрана для построения этой модели.

Все построенные элементы модели должны соответствовать ГОСТам и нормам отрасли, к которой относится данное изделие.

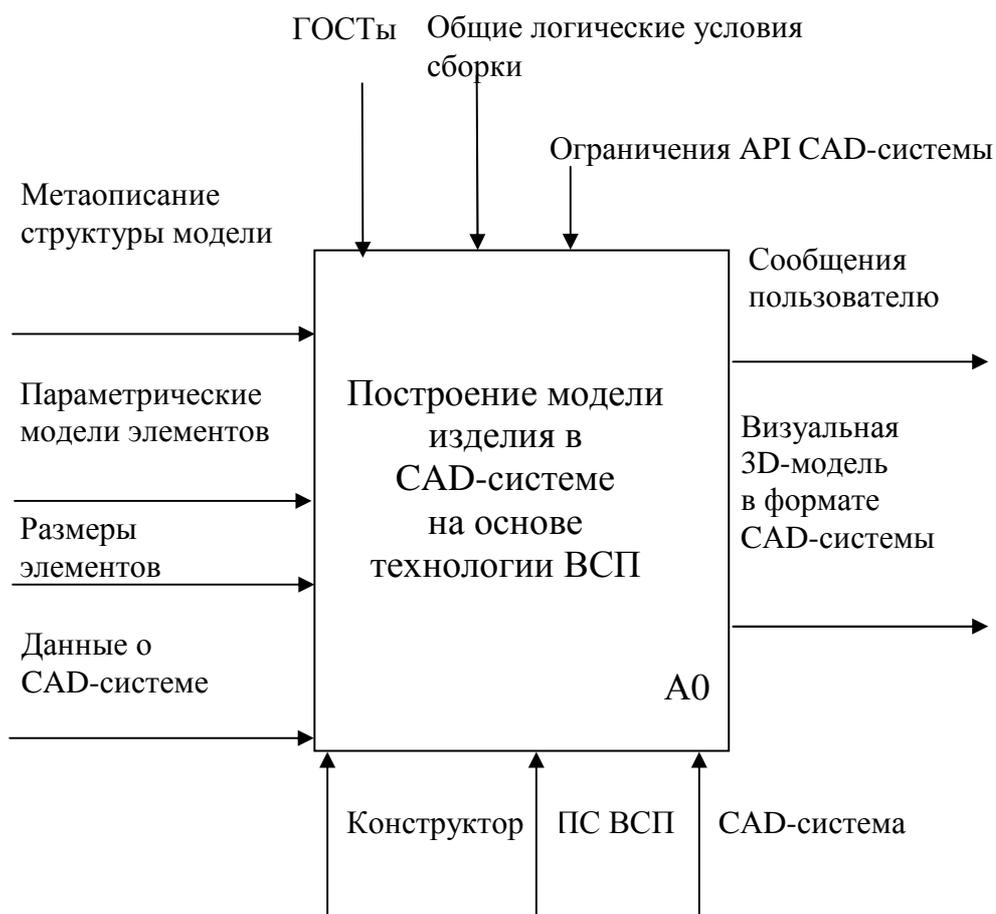


Рисунок 2.15 – Структурно-функциональная диаграмма процесса построения визуальной модели изделия в САД-системе на основе ВСП

После успешного выполнения построения на выходе получается визуальная модель проектируемой детали, узла и т. п. По мере выполнения построения визуальной модели пользователь получает от системы сообщения о ходе процесса.

Детализирующая структурно-функциональная диаграмма процесса построения визуальной модели в САД-системе приведена на рисунке 2.16. Весь процесс можно разделить на четыре основных действия: соединение с САД-системой, выполнение базовых настроек модели, построение элементов модели и связывание элементов в единую модель. Все эти действия последовательно выполняют подсистемы ПС ВСП.

Сначала происходит соединение с САД-системой (активность А1). При этом создаются все необходимые объекты взаимодействия. Исходные данные для создания соединения подаются на вход САД-системы. После установки соединения генерируется сигнал о готовности и начинается непосредственно процесс построения моделей деталей

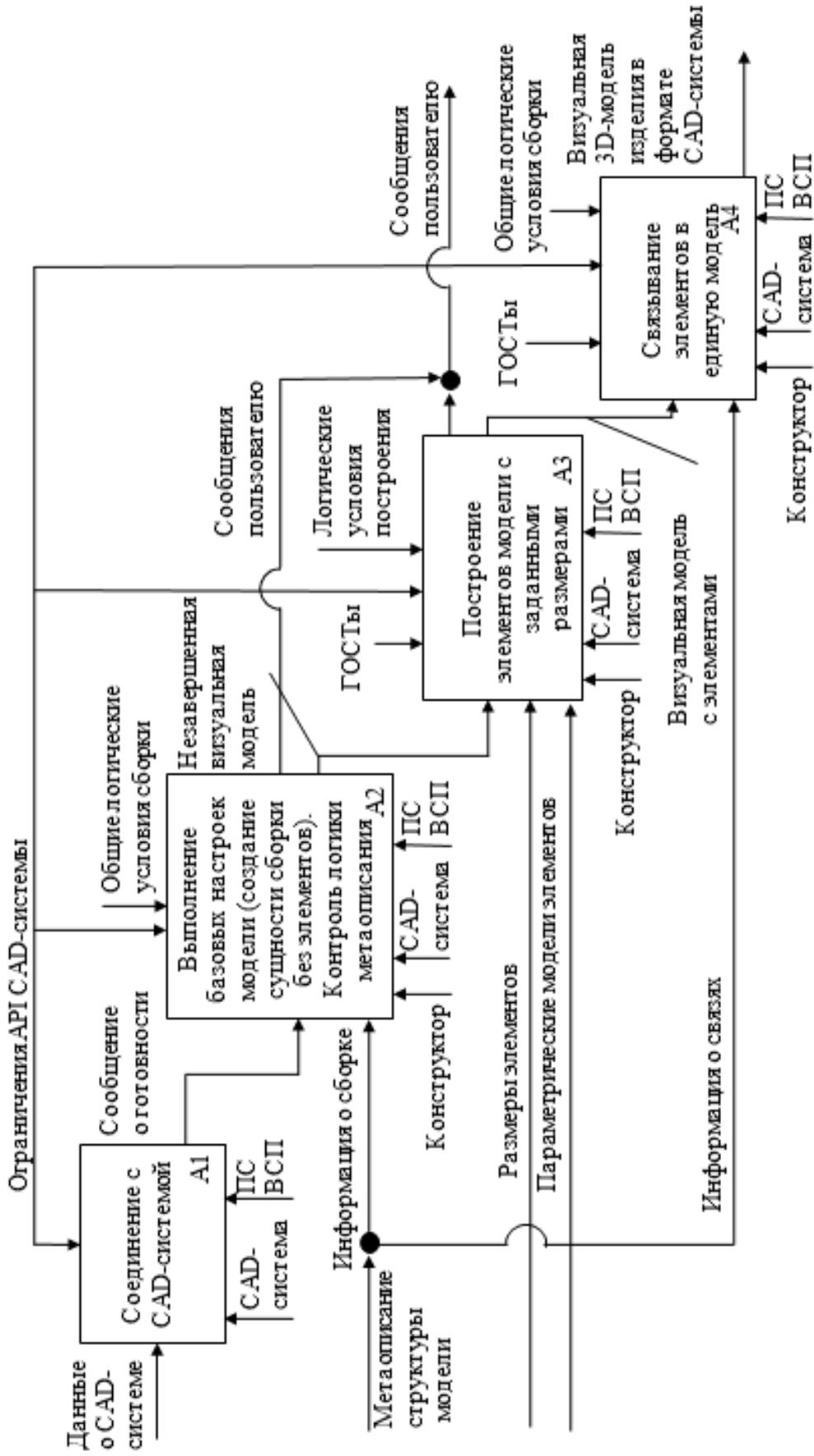


Рисунок 2.16 – Детализирующая структурно-функциональная диаграмма процесса построения визуальной модели изделия в САД-системе на основе технологии ВСП

Следующей активностью является создание сущности сборки и выполнение ее настроек (A2). Она начинается по получению сигнала о готовности соединения с САД-системой. Всю информацию для создания сборки в ходе метаописания структуры проекта активность получает как входной параметр. Если контроль логики метаописания прошёл успешно, то на выходе получается сообщение о продолжении работы и незавершённая визуальная модель. Если же сборку не удалось создать, то на выход выдается сообщение об ошибке. Ограничением для данной активности является ограничение интерфейса взаимодействия с САД-системой (API).

После создания объекта сборки происходит загрузка 3D-параметрических моделей элементов визуальной модели (заготовок деталей) с настройкой параметров этих элементов (A3). Параметры элементов устанавливаются согласно размерам, полученным на входе в данную активность. Входными параметрами для построения элементов модели являются параметрические модели элементов и «виртуальных инструментов». После задания размеров деталей вычисляются и размеры «виртуальных инструментов». На выходе получается совокупность построенных в САД-системе визуальных моделей элементов изделия. При возникновении ошибок в процессе работы генерируются сообщения пользователю об их характере и причинах.

Последней активностью процесса является связывание моделей всех элементов изделия в единую визуальную 3D-модель (A4). Связывание выполняется на основании информации о связях, полученной в виде метаинформации об их типах и параметрах как входные данные. На выходе получается полностью сформированная визуальная 3D-модель изделия в САД-системе.

Из всех активностей процесса построения визуальной модели в САД-системе наибольший интерес представляет построение 3D-элементов модели. Частным случаем построения элементов модели является параметризация готового шаблона визуальной модели. Параметризацию можно разделить на несколько шагов: загрузка элемента визуальной модели в САД-систему, изменение параметров загруженного элемента, позиционирование элемента модели в пространстве.

2.2.3 Логическая модель ПС для визуального структурного проектирования объектов в САД-системе

При формализации требований к разрабатываемому программному продукту удобно применять UML диаграммы, в частности, прецедентов использования [61; 68].

Данная диаграмма позволяет четко определить границы ПС и предоставляемую функциональность. Также, она показывает всех «актеров», которые взаимодействуют с этой системой (пользователей, другие системы).

Проектируемая ПС (рис. 2.17) должна предоставлять пользователю возможность установить связь с используемой САД-системой, через которую будет происходить взаимодействие проектирующей подсистемы с САД-системой.



*А – конструктор; В – ПС ВСП интегрированная с САД-системой
Рисунок 2.17 – Диаграмма прецедентов использования для ПС ВСП*

Следующей функцией, которую должна реализовать ПС, является возможность создания сборки с указанием всех ее параметров. После создания сборки необходимо обеспечить пользователю возможность достроить при необходимости различные детали сборки изделия, в том числе и для параметрических деталей-шаблонов с целью дальнейшего использования.

Одной из немаловажных функций ПС для повторного использования, является способность выполнять различного вида сопряжения деталей сборки. Это требует позиционирования деталей в пространстве и относительно друг друга. Затем применяются «виртуальные инструменты» деталей к смежным с ними другим деталям для формирования рабочих зон и посадочных мест каждой детали.

Основными пользователями системы являются инженеры–конструкторы (А) и проектирующие подсистемы ПС ВСП (В), которые могут реализовывать основную и дополнительную функциональность ПС ВСП с последующим построением геометрической модели проектируемого изделия в САD-системе. В таблицах 2.2...2.4 приведены описания некоторых прецедентов ПС.

Таблица 2.2 – Описание прецедента «Создать параметрическую модель детали»

Наименование	Значение
Основной исполнитель	Инженер-конструктор
Заинтересованные лица (актеры) и их требования	Инженер-конструктор – необходимо создать деталь для дальнейшего построения сборки
Предусловия	Известны все геометрические размеры детали и логические условия ее проектирования и функционирования в изделии
Результаты (постусловия)	Параметрическая модель детали создана в САD-системе
Основной успешный сценарий (или основной процесс)	а) инженер-конструктор выполняет построение детали непосредственно в САD-системе; б) инженер-конструктор выполняет построение «виртуального инструмента» непосредственно в САD-системе; в) инженер-конструктор выполняет логическую привязку и определяет зависимости параметров детали и «виртуального инструмента» непосредственно в САD-системе; г) ПС выполняет сохранение информации о моделях детали и «виртуального инструмента» в базе данных
Расширения (или альтернативные потоки)	Отсутствуют
Специальные требования	API-функции САD-систем обеспечивают необходимые построения и операции с «виртуальным инструментом»
Частота использования	По каждому запросу инженера-конструктора
Регистрация событий и обработки ошибок	Отсутствует

Таблица 2.3 – Описание прецедента «Установить связь с САД-системой»

Наименование	Значение
Основной исполнитель	ПС ВСП
Заинтересованные лица (актеры) и их требования	Инженер-конструктор выбирает САД-систему для работы
Предусловия	Выбранная САД-система запущена
Результаты (постусловия)	Соединение с САД-системой установлено
Основной успешный сценарий (или основной процесс)	а) ПС проверяет, запущена ли выбранная САД-система; б) если САД-система не запущена, то ПС пытается ее запустить; в) ПС соединяется с САД-системой
Расширения (или альтернативные потоки)	При невозможности запуска САД-системы выдается сообщение пользователю
Специальные требования	Обеспечение требований САД-системы к ресурсам ПК
Частота использования	При старте ПС и при потере соединения
Регистрация событий и обработки ошибок	В файл записывается произошедшая ошибка и выводится соответствующее сообщение пользователю

Таблица 2.4 – Описание прецедента «Выполнить сборку модели изделия в САД-системе»

Наименование	Значение
1	2
Основной исполнитель	ПС ВСП
Заинтересованные лица (актеры) и их требования	ПС ВСП – необходимо создать сборку модели изделия
Предусловия	Задано имя сборки и другие параметры для доступа к метаинформации
Результаты (постусловия)	Модель сборки создана в САД-системе
Основной успешный сценарий (или основной процесс)	а) ПС проверяет данные на корректность; б) ПС выполняет создание новой сборки; в) ПС выполняет построение моделей деталей; г) ПС выполняет сопряжение деталей в сборке (для каждой детали с применением виртуального инструмента)

Продолжение таблицы 2.4

1	2
Расширения (или альтернативные потоки)	При некорректных исходных данных, нарушении логики построения выдается сообщение пользователю
Специальные требования	наличие связи с САД-системой и доступа к метаинформации в базе данных
Частота использования	По каждому запросу ПС
Регистрация событий и обработки ошибок	В файл записывается ошибка и выводится соответствующее сообщение пользователю

Выполним анализ и формализованное представление предметной области построения визуальных объектов в САД-системах на основе объектно-ориентированного подхода. Для этого используем диаграмму классов САПР для построения визуальной 3D-модели изделия в САД-системе (рис. 2.18).

Диаграмма классов (class diagram) служит для представления статической структуры модели системы в терминологии классов, которая отражает, в частности, различные взаимосвязи между отдельными сущностями предметной области, такими как: классы, интерфейсы, кооперации, и подсистемы, а также описывает их внутреннюю структуру и типы отношений [61; 67; 68]. С этой точки зрения диаграмма классов является дальнейшим развитием концептуальной модели проектируемой ПС ВСП на логическом уровне.

В данном случае можно выделить ряд основных классов (см.рис. 2.18). САПР – класс данной предметной области. Он выступает в качестве фасадного класса ПС ВСП. Класс САПР отвечает за интеграцию и использование выбранной САД-системы, позволяет строить визуальные модели (двухмерные и/или трехмерные). Таким образом, класс САПР – это сущность, выполняющая трехмерное отображение моделей деталей и узлов машин с использованием API-функций САД-системы. Задача этого класса состоит в том, чтобы на основе анализа структуры модели изделия выполнять вызовы функций САД-системы, которые необходимы для визуализации изделия. В результате, работа объекта класса САПР позволяет построить геометрическую модель изделия. Кроме того, наличие класса САПР позволяет расширять возможности ПС ВСП за счет наследования и таким образом интегрироваться с различными САД-системами.

Визуальная модель (изделия) – класс, который реализует абстрактную сущность, которая в свою очередь является визуальным представлением проектируемой детали или сборки. Если модель изделия является сборкой, то она может в себя включать под сборки и детали. Таким образом данный класс хранит структуру проектируемого изделия.

Инженер-конструктор (проектировщик) – класс, описывающий основного актера предметной области, который является автором параметрических моделей деталей, «виртуальных инструментов», визуальной геометрической модели изделия.

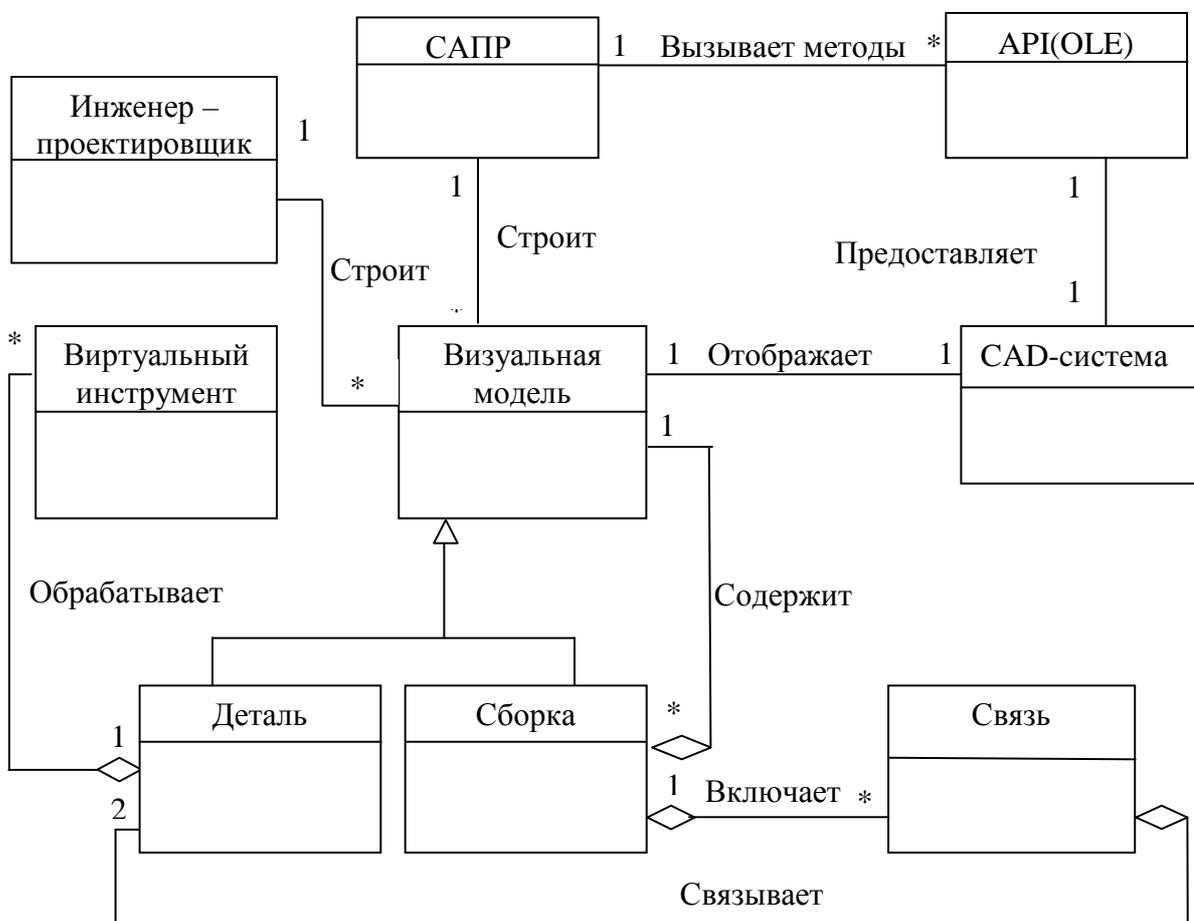


Рисунок 2.18 – Диаграмма классов САПР построения визуальной 3D-модели изделия в CAD-системе

Деталь – класс, являющийся составляющей частью сборки модели изделия. Так же он самостоятельно может выступать в роли визуальной модели. Хранит в себе всю информацию о конкретной детали, а также о «виртуальном инструменте», связанном с деталью.

Сборка – класс, описывающий структуру собранной конструкции изделия, выполняющей определенные функции в узле или всем механизме, в который она входит. Хранит необходимую информацию о деталях, входящих в сборку, и их взаимосвязях. Таким образом, объект класса Сборка содержит информацию о графе связей между деталями изделия. Класс Визуальной модели генерирует метаописание структуры проектируемого изделия для последующего сохранения в базе данных CAD-проектов.

API (OLE) – классы и библиотеки, позволяющие взаимодействовать САПР с выбранной CAD-системой. Данная сущность предоставляет инструментарий для работы с CAD-системой из других приложений.

CAD-система – класс, предоставляющий системе проектирования свой API-интерфейс и выполняющий построение визуальной геометрической модели изделия, выполняет также ряд функций по определению характеристик деталей, формирование связей между моделями деталей.

Виртуальный инструмент – класс, который параметрически связан с деталью и создает требуемые условия для функционирования детали в изделии. Хранит зависимости между параметрами детали и «инструмента» и обеспечивает их логические связи. Виртуальный инструмент создает условия, при которых деталь сама определяет необходимое для нее рабочее пространство в теле другой детали или нескольких деталей в сборке.

Связь – класс, который хранит необходимую информацию о взаимосвязях деталей, входящих в сборку, и позволяет формировать структуру изделия.

Для того чтобы отобразить поведение системы используют диаграммы коопераций или последовательностей [68]. Существование и совместную работу экземпляров классов в определенный момент времени и взаимодействие между ними, удобно показать с применением диаграммы коопераций. Такая диаграмма позволяет более полно понять процессы, протекающие в данной предметной области в конкретный момент времени. На рисунке 2.19 приведена диаграмма коопераций построения визуальных моделей в CAD-системе. Она отображает построение инженером-проектировщиком детали или сборки с деталями в CAD-системе. Если модель объекта строит САПР, то она выполняет роль проектировщика и взаимодействия классов аналогичны. Метки на диаграмме показывают последовательность передачи сообщений между объектами в процессе их совместной работы в кооперации. Можно создать и показать деталь (метка 1), можно создать сборку (метка 2) и связать деталь с ней (метка 3).

Для формализации поведенческих аспектов построения визуальных объектов в CAD-системах в ПС удобно использовать UML диаграмму последовательностей. Данная диаграмма строится для прецедентов, выделенных при формализации требований к разрабатываемой ПС. Диаграмма последовательностей строится для каждого конкретного прецедента и отображает набор и последовательность действий, которые необходимо выполнить для успешной реализации этого прецедента [68].

Построение диаграммы последовательностей выполняется с учетом разработанной диаграммы классов. В процессе построения диаграммы кооперации или диаграммы последовательности связи между классами на диаграмме классов могут уточняться.

Рассмотрим начало работы САПР, когда производится подключение к CAD-системе, затем реализуется прецедент «Построить визуальную модель детали в CAD-системе» на основе задания размеров для построенной ранее модели шаблона, которая хранится в файле модели (рис. 2.20). Данную операцию по команде выполняет САПР-система. Она загружает в

сборку нужную параметрическую деталь DownloadDetail(path) и изменяет ее параметры SetParametr(name, value) последовательно в цикле по $i = 1..n$. Значения параметров конструктор задает на основе базы данных, связанной с параметрическими моделями деталей.

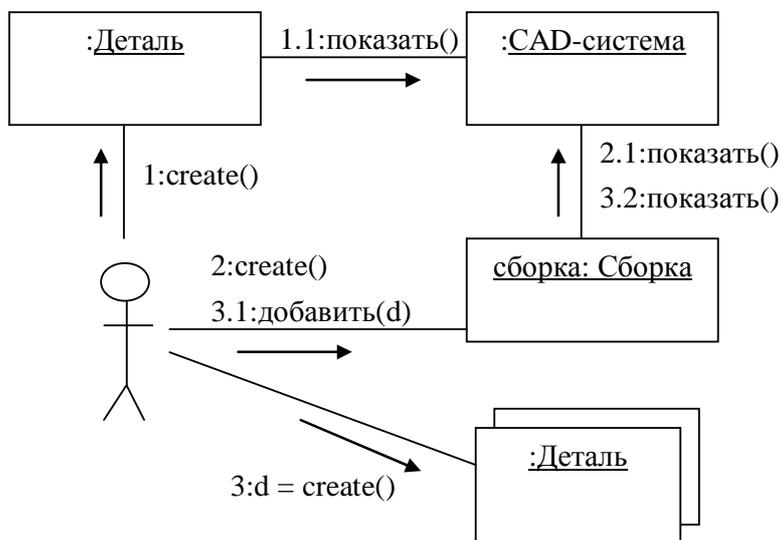


Рисунок 2.19 – Диаграмма коопераций построения визуальной модели в CAD-системе инженером-проектировщиком

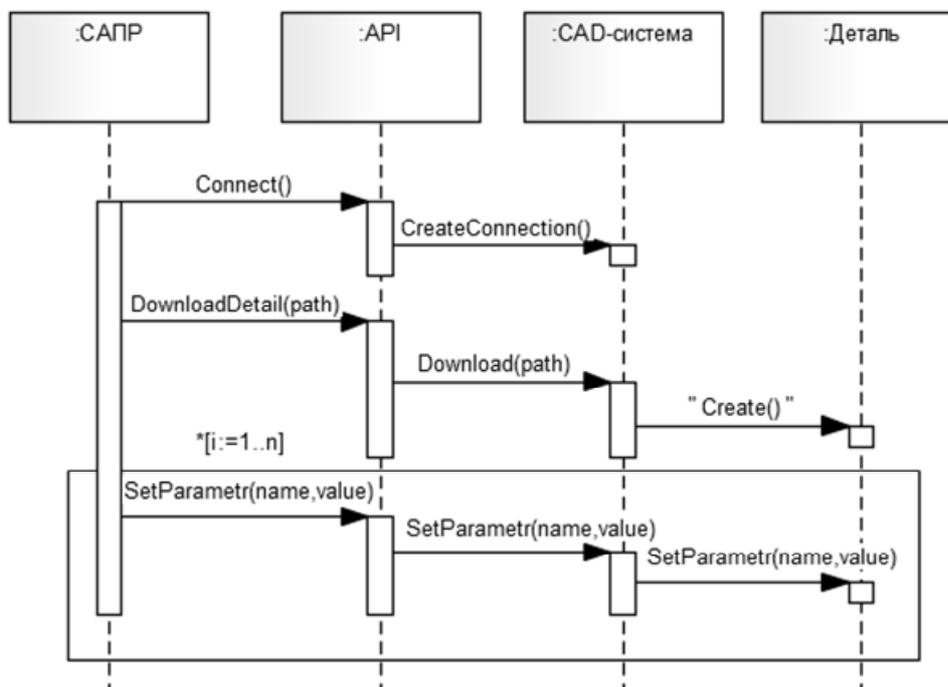


Рисунок 2.20 – Диаграмма последовательностей выполнения прецедента «Построить визуальную модель детали в CAD-системе» с предварительным подключением CAD-системы

Диаграмма последовательностей выполнения прецедента «Выполнить сопряжение деталей в сборке» представлена на рисунке 2.21 и выполняется САПР после того, как детали для сопряжения построены. Сопряжение деталей осуществляется для их позиционирования в сборке. Таким образом, структура проектируемого объекта представляется в виде графа, в узлах которого находятся модели деталей, а связи позиционируют их относительно друг друга.

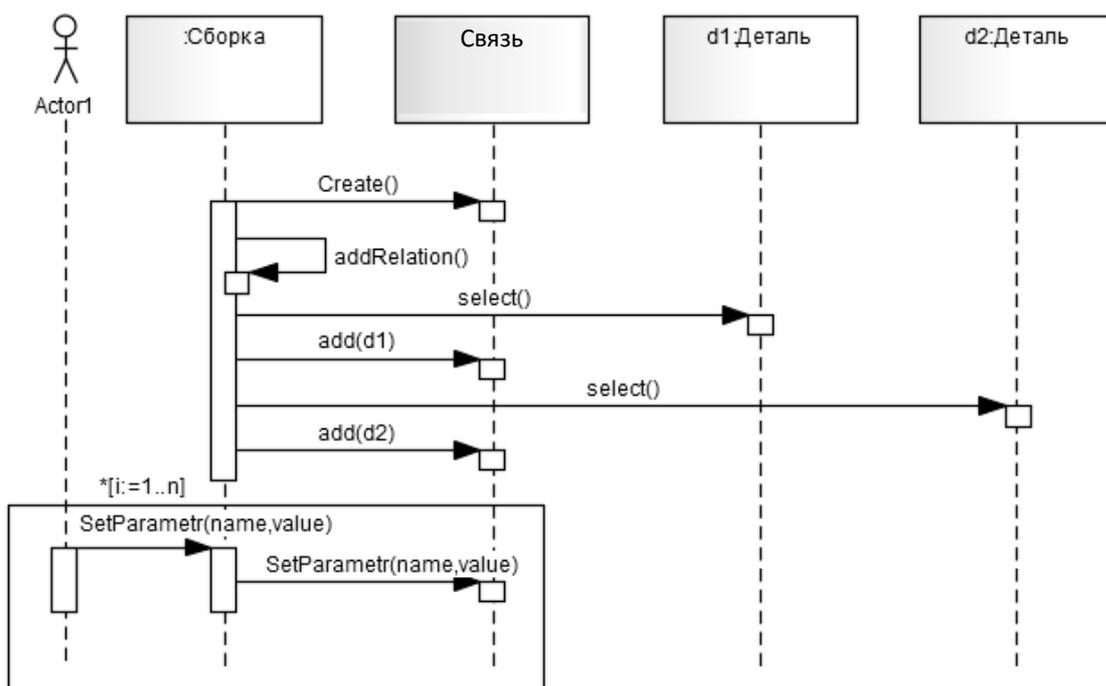


Рисунок 2.21 – Диаграмма последовательностей выполнения прецедента «Выполнить сопряжение деталей в сборке»

После позиционирования каждой детали в сборке к смежным деталям применяется ее «виртуальный инструмент». Этот «инструмент» создает посадочное место для каждой детали и определяет пространство, необходимое для её функционирования в сборке.

Для представления взаимодействия на физическом уровне между САПР, базой данных и САД-системой удобно использовать диаграмму компонентов UML [68]. Она отображает компоненты ПС и взаимодействия между ними через соответствующие интерфейсы. Данная диаграмма для ПС ВСП объектов представлена на рисунке 2.22.

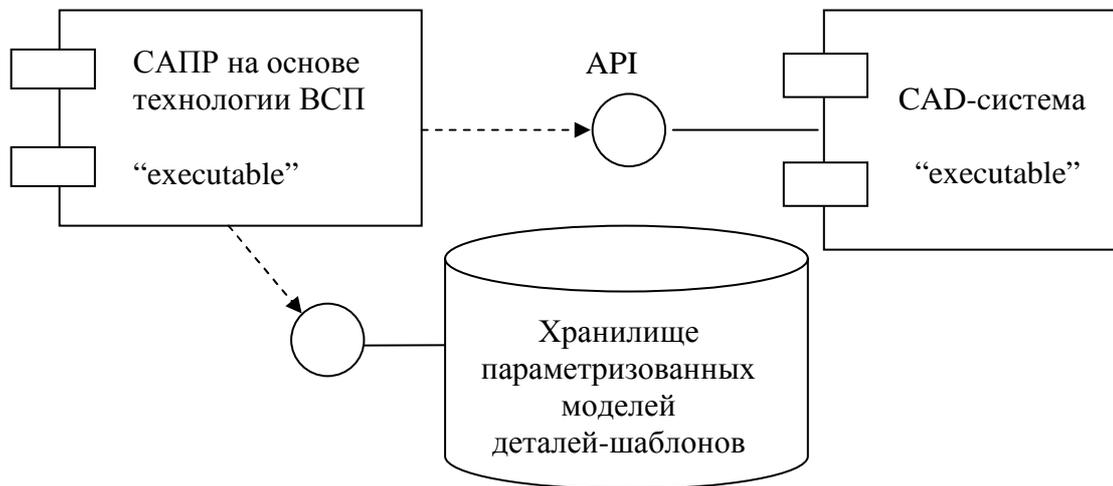


Рисунок 2.22 – Диаграмма компонентов для ПК визуального структурного проектирования объектов

2.2.4 Реализация САПР для визуального структурного проектирования изделий. Пример построения штампа в САД-системе PowerSHAPE

Рассмотрим процесс автоматизированного проектирования штампов. На данный момент существует большое количество сфер деятельности человека, в которых применяются различные штампованные детали. Штамповка позволяет изготавливать следующие изделия:

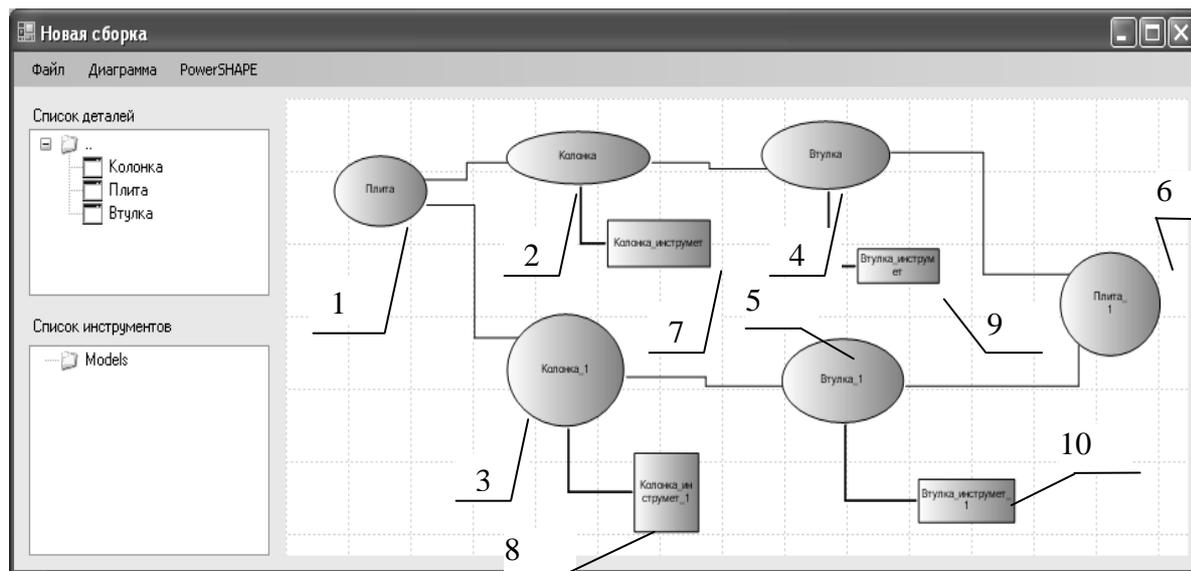
- детали из пластмасс с нагревом;
- всевозможные детали из листа для различных отраслей промышленности;
- различные изделия, получаемые чеканкой;
- различные значки с вырубкой по контуру и чеканкой;
- узоры на бумаге, коже и других материалах, получаемые тиснением.

Практически все штампы для изготовления данных изделий имеют одинаковую структуру. Отличием является только деформирующий инструмент.

Визуальная система проектирования предполагает разработку структуры изделия до ее построения в САД-системе. Это позволяет на этапе разработки концептуальной модели обсуждать принципиальные решения, рассматривать структуру аналогов, распределять обязанности по созданию элементов изделия, накапливать базу данных и знаний о принимаемых решениях.

Структура штампа может быть представлена в виде графа элементов и связей между ними. В разработанной САПР проектирование штампа сводится к визуальной разработке его структуры и дальнейшему автоматизированному построению этого штампа в САД-системе PowerSHAPE, что

было реализовано в рамках данной работы. Для пользователя она представляет собой плоский графический редактор и позволяет создавать структурную модель изделия задавая или выбирая из базы детали и определяя их связи. Для штампов это эффективно, так как большинство деталей стандартизовано и для них заранее разрабатываются параметризованные детали-шаблоны. Затем по модели сборки в автоматизированном режиме происходит построение трехмерной модели в PowerSHAPE. Данная система использует разработанную библиотеку функций для интеграции с PowerSHAPE. На рисунке 2.23 представлена визуальная структурная модель штампового блока.



*1 – плита, 2, 3 – колонки, 4, 5 – втулки, 6 – вторая плита,
7–10 – инструмент для соответствующих деталей*
Рисунок 2.23 – Интерфейс графического редактора для построения
визуальной структурной модели штампового блока

По представленной структурной модели, на основе использования параметрических моделей элементов конструкции, строится непосредственно трехмерная модель штампового блока в PowerSHAPE. Недостающие детали проектируются заново, но добавляются в базу для использования в других конструкциях.

В соответствии с общей последовательностью операций построения объекта на основе ВСП выполним создание сущности «Сборка». Метод «CreateAssembly» создает сборку с указанным именем, классом и описанием `CreateAssembly("AssemblyTest", "", "")`. Вызов данной функции создаст сборку с именем «AssemblyTest».

Затем необходимо создать и ассоциировать детали со сборкой. Для большого количества стандартных деталей штампа целесообразно не строить эти детали каждый раз заново для разных размеров, а изначально создавать их параметрическими. Потом, при необходимости использования такой детали в сборке, ее загружают в PowerSHAPE из хранилища или базы

данных и устанавливают нужные размеры. Так как каждая деталь хранится в отдельном файле, был реализован метод «AddDetailFromFileToAssembly», позволяющий загрузить деталь из файла в сборку.

Пример вызова данного метода:

```
AddDetailFromFileToAssembly("AssemblyTest", "Base", Application.StartupPath + @"Models\plita1.psmodel",  
    (new psPoint3D(0, 0, 0)));
```

В качестве параметров в функцию передается имя сборки, имя детали в сборке, путь к файлу и параметры точки пространства, в которую необходимо поместить загружаемую деталь. Выполнение данного метода производится в цикле для каждой детали (см. рис. 2.19).

После загрузки деталей производится изменение параметров каждой детали в соответствии с требованиями проектировщика. Для изменения размеров детали в автоматическом режиме реализован метод «SetParametrInAssembly». В качестве параметров он принимает имя сборки, имя детали, имя параметра и новое значение параметра (см. рис. 2.20).

Пример вызова данного метода:

```
SetParametrInAssembly("AssemblyTest", "vtulka1", "r1", "20");
```

После вызова данного метода значение параметра «r1» у детали «vtulka1» из сборки «AssemblyTest» станет равным 20 (рис. 2.24).

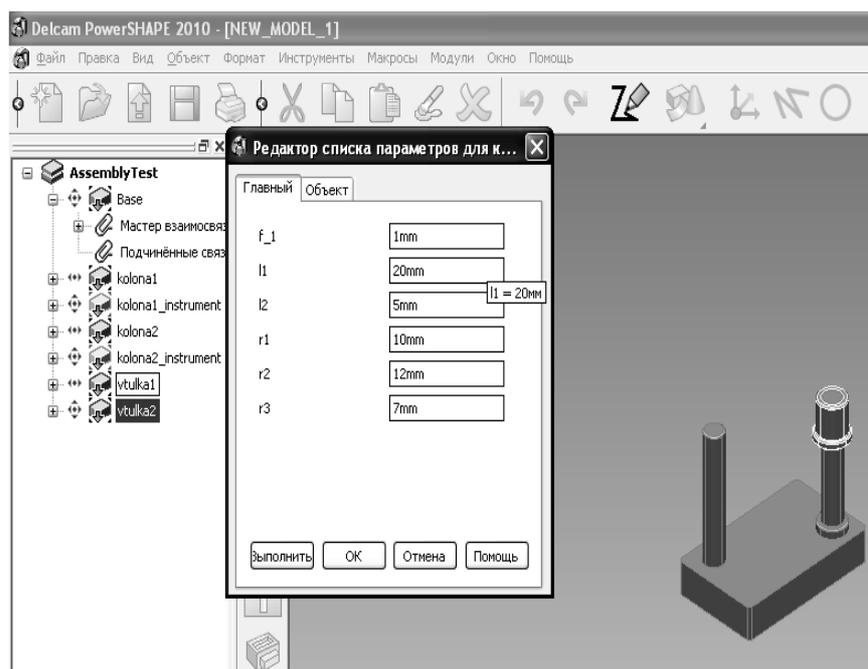


Рисунок 2.24 – Вызов метода изменения параметра детали

Для позиционирования деталей относительно друг друга удобно создавать отношения (связи) между ними, которые определяют взаимное расположение деталей в пространстве, причём при изменении положения главной детали, положение зависимой меняется автоматически.

Для создания отношений в автоматическом режиме реализован метод «CreateRelation». В качестве параметров данный метод получает тип отношения, имя сборки, название главной детали, параметр главной детали, по которому будет строиться отношение, название зависимой детали и ее параметр.

Пример вызова данного метода:

```
CreateRelation(psRelationType.PointToPoint, "AssemblyTest",  
"kolona1", (new psPoint3D(0, 0, 0)), "vtulka1", (new psPoint3D(0, 0, 0))).
```

В результате вызова данного метода будет создано отношение между двумя деталями сборки, как это показано на рисунке 2.25.

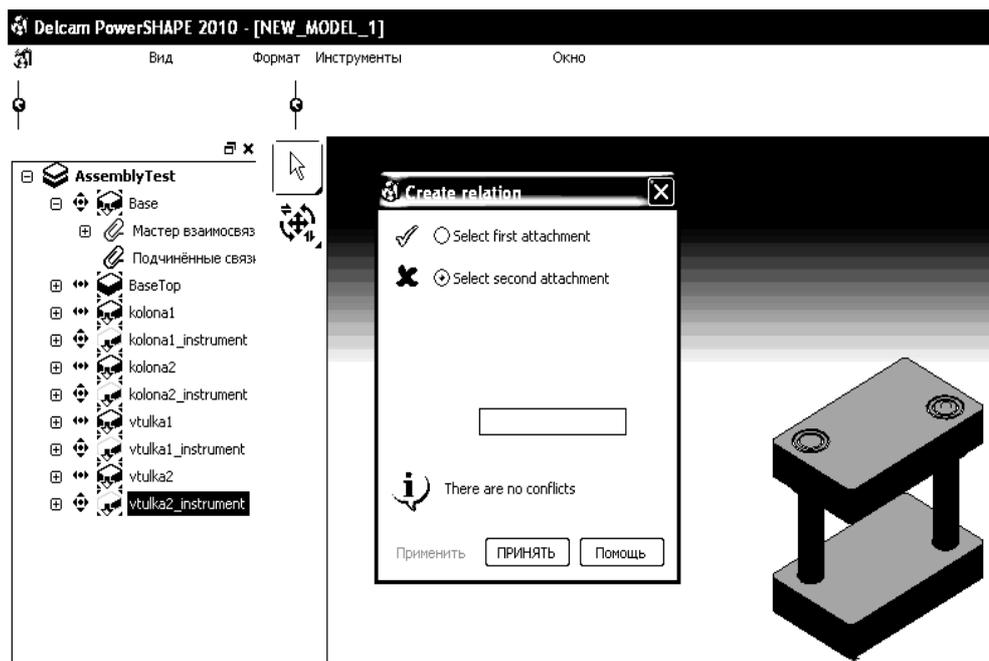


Рисунок 2.25 – Создание отношений между деталями в сборке

Трехмерная модель штампа, полученная по данной технологии проектирования представлена на рисунке 2.26.

Изменение структуры модели в графическом редакторе ПС ВСП приводит к регенерации и изменению трехмерной модели в CAD-системе PowerSHAPE.

Связующим звеном между визуальной структурной моделью и трехмерной моделью является метаописание модели в формате xml. По имеющейся структурной модели разработанная программа генерирует ее xml-описание. Далее данное описание передается подсистеме ПС ВСП, которая на основе разработанной библиотеки интеграции с PowerSHAPE, пошагово выполняет построение трехмерной модели изделия исходя из текста метаописания.

Таким образом, весь процесс построения трехмерных моделей различных штампов при наличии библиотеки параметрических элементов сводится для конструктора к построению структурной схемы штампа с указанием параметров элементов и связей между ними. Данный подход

может быть эффективным при проектировании и других изделий с большим количеством стандартизованных деталей: гидро- и пневмосистем, станочных приспособлений и др.

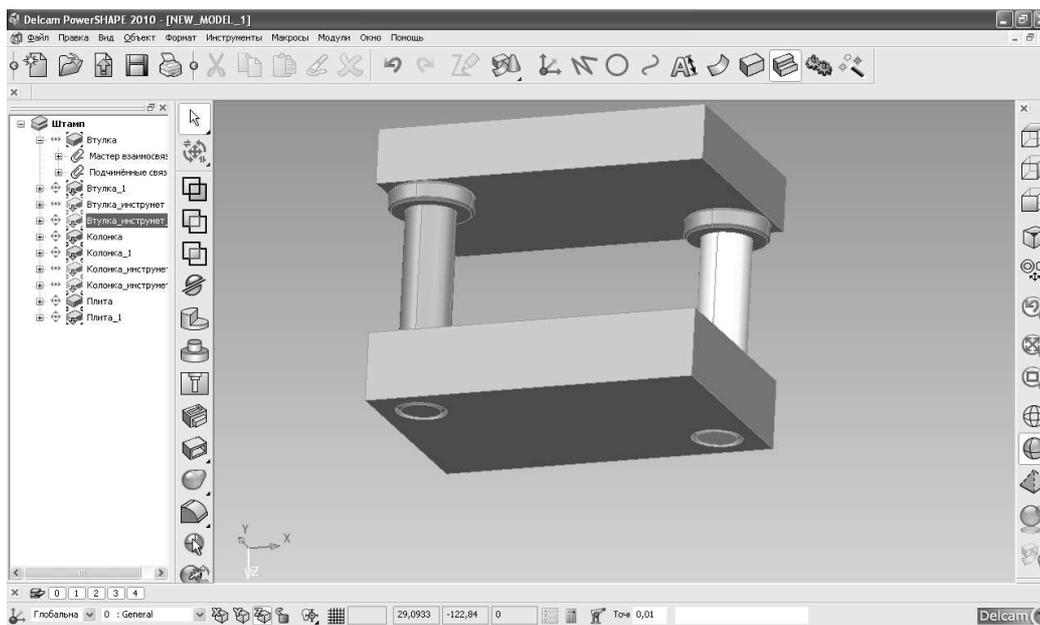
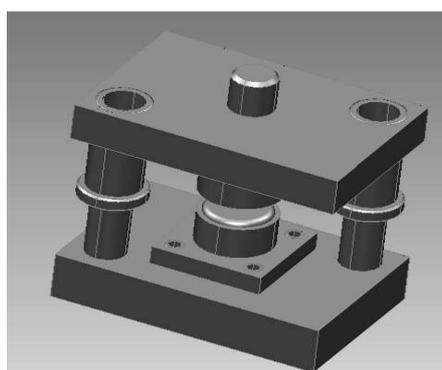


Рисунок 2.26 – Трехмерная модель штампового блока, построенная на основе разработки ее структуры и технологии ВСП

После автоматизированного визуального проектирования модели штампового блока, непосредственно в PowerSHAPE производится разработка деформирующего инструмента, который затем устанавливается в блок. В данном случае добавляется рабочий инструмент для чеканки рельефа, так как в базе он отсутствовал. На рисунке 2.27 приведена полная модель штампового блока.



а



б

а – модель штампового блока; б – модель рабочего инструмента
Рисунок 2.27 – Полная трехмерная модель штампового блока и рабочего инструмента для чеканки рельефа

При помощи спроектированного штампа и инструмента можно выполнять чеканку рельефа на плоских поверхностях изделий, которые можно разместить в рабочем пространстве штампа.

Для демонстрации возможностей разработанной библиотеки функций для динамического показа объектов в САД-системе было реализовано отдельное приложение. В качестве примера моделировалось вращение секундной стрелки модели наручных часов. Была построена трехмерная модель наручных часов, изображение которой динамически изменяется при циклической перерисовке модели в САД-системе, а секундная стрелка вращается вокруг своей оси. На рисунке 2.28 приведен общий вид этой модели.

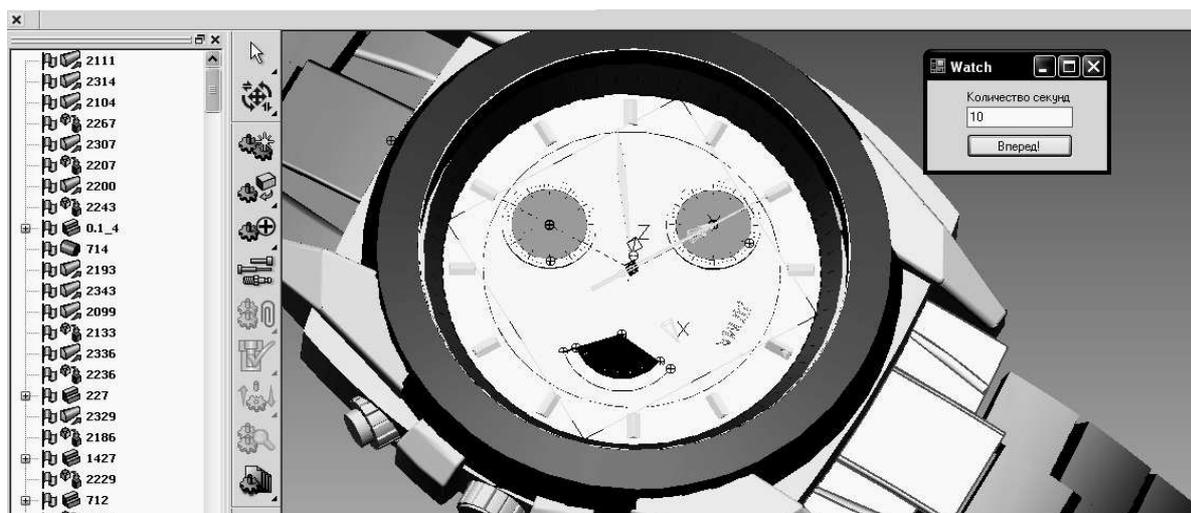


Рисунок 2.28 – Трехмерная модель наручных часов с динамическим изменением положения секундной стрелки

2.2.5 Результаты исследования скорости построения визуальных моделей в САД-системе

При построении визуальных моделей в САД-системе, одним из самых важных параметров, по которому можно оценить эффективность ее работы, является время построения этой модели. Если визуальная модель строится на основе ВСП из отдельных элементов, которые уже построены и сохранены в файл, то время построения модели состоит из времени, затраченного на загрузку составных частей из файлов и связывание их в единое целое. При выборе САД-системы для САПР с применением ВСП следует уделить внимание данной метрике. Для исследования скорости построения визуальной модели проведем несколько построений ряда тестовых моделей с измерением затраченного времени.

Выделим параметры, определяющие время построения. Одним из параметров является количество элементов, которые подгружаются из файлов. Следовательно, требуются эксперименты по загрузке разного количества элементов в сборку (10...60 элементов в данном случае).

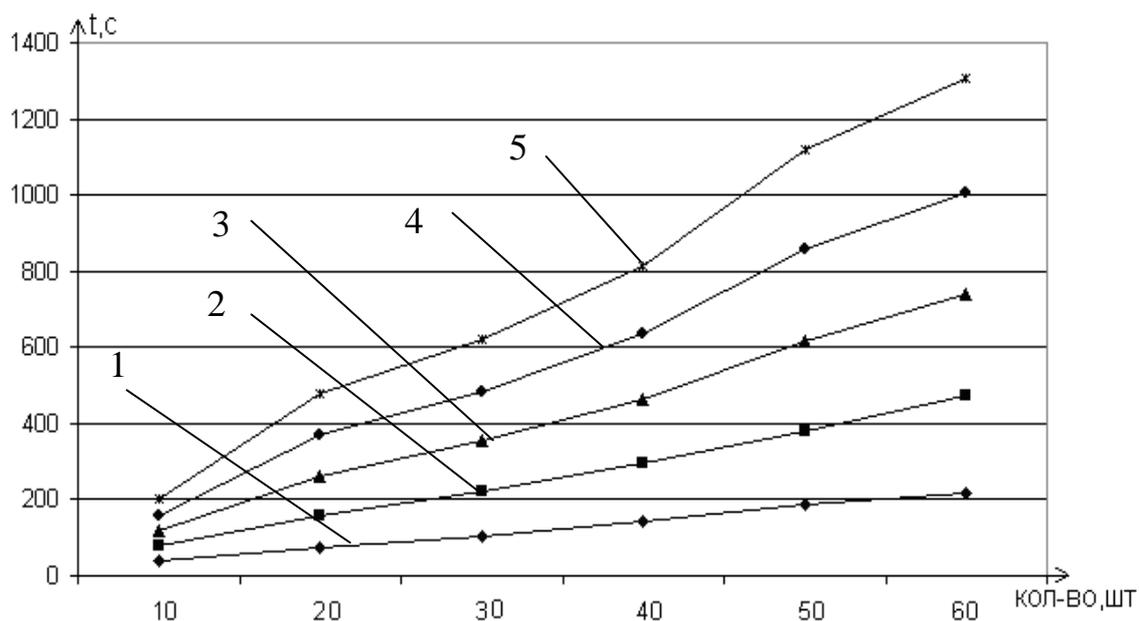
При определении скорости загрузки необходимо также учитывать размер файлов, в которых хранятся элементы модели. Это позволит построить семейство кривых, описывающих данную зависимость.

Результирующим параметром является суммарный размер файлов, из которых будут загружаться элементы для оценки скорости построения. В данной работе размеры файлов составляли 600...1 000 кБ, при этом загружали по 10 экземпляров каждого элемента.

Еще одним немаловажным параметром является скорость создания связи между двумя деталями. Для определения данного показателя определяли время построения связей между 10...60 элементами.

Исследование скорости построения визуальных моделей в САД-системе Delcam PowerSHAPE проводили на компьютере со следующими показателями: Intel Pentium Dual CPU 1.73ГГц; 2 Гб ОЗУ; Graphic: Intel Int. GMA X3100 Gfx.

На рисунке 2.29 представлены графики зависимостей времени построения визуальной модели от количества элементов в ней. Из рисунка 2.29 видно, что время построения визуальной модели пропорционально увеличению количества элементов, из которых она состоит. Причем, скорость увеличения времени растет при росте размера файла, в котором хранятся элементы модели.



1 – 600 кБ, 2 – 700 кБ, 3 – 800 кБ, 4 – 900 кБ, 5 – 1 000 кБ

Рисунок 2.29 – Графики зависимостей времени построения визуальной модели от количества элементов в ней и размера файла

Время, затраченное на построение визуальной модели, пропорционально размеру файлов и количеству элементов этой визуальной модели, а также количеству связей между элементами этой модели (рис. 2.30).

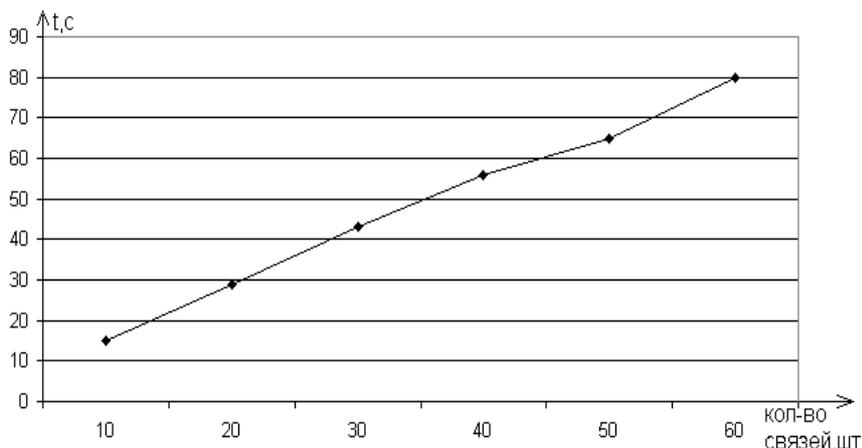


Рисунок 2.30 – График зависимости скорости построения визуальной модели от количества связей между элементами деталей

Таким образом, в ходе выполнения данной работы разработана САПР листовой штамповки на основе технологии визуального структурного проектирования, которая позволяет разрабатывать структуру разделительных штампов в виде дерева сборки и по нему строить объемную твердотельную модель штампа с использованием существующих САД-систем.

Объектно-ориентированный подход, положенный в основу технологии визуального структурного проектирования, позволяет повысить интеллектуальность процесса проектирования на основе библиотеки параметрических моделей элементов конструкции (с возможностью использовать встроенные функции для реализации инженерных расчетов параллельно с проектированием геометрии деталей). Правильность сборки деталей в изделие контролируется на основе использования информации о рабочих зонах этих деталей, которая хранится в связанных с ними «инструментах».

Интеллектуальный механизм наложения связей, основанный на накоплении знаний в процессе работы и сохранении связей в хранилище, позволяет снизить до минимума количество операций, производимых при сборке деталей и значительно ускорить процесс проектирования.

После «обработки» деталей «инструментами» сопряженных элементов конструкции в обрабатываемой детали накапливается информация, с помощью которой можно формировать: последовательность технологических операций изготовления детали; спецификации инструментов, необходимых для ее механообработки; оценивать суммарную трудоемкость и себестоимость изготовления детали и таким образом обеспечивать дополнительную информационную поддержку проектирования.

Визуальное структурное проектирование является основой для разработки и совместного применения методик оценки трудоемкости и себестоимости проектируемой системы, что позволит выполнять экономический анализ изделия на этапе компоновки его структурной схемы.

Реализована библиотека функций, основанная на API-интерфейсе PowerSolutionDOTNetOLE, которая позволяет интегрироваться с PowerSHAPE и выполнять различные действия по построению и управлению визуальными моделями из внешней программы.

Реализованы функции, позволяющие строить ряд аналитических кривых и поверхностей второго порядка, которые расширяют возможности работы конструкторов и дизайнеров.

Разработана программная система, позволяющая создавать объемные модели изделий в PowerSHAPE на основе визуального построения их структуры и базы параметрических моделей элементов конструкции.

Выделены параметры элементов модели, которые влияют на скорость построения визуальной модели сборки изделия в САД-системе, и определен характер этого влияния.

2.3 Разработка и реализация САПР технологических процессов и штамповой оснастки для листовой штамповки

2.3.1 Совершенствование информационного обеспечения САПР штамповой оснастки на основе использования методов повышения ее надежности

В разделе проанализированы способы повышения стойкости и надежности штамповой оснастки и приведена их классификация. Обоснована необходимость применения автоматизированных систем поддержки принятия решений для эффективного использования накопленных опытных данных в САПР.

Для поддержки принятия технических решений при проектировании в настоящее время используются следующие средства:

- применение методов анализа динамических явлений и моделирование работы системы для последующей оптимизации [59; 70];
- применение современных методов прочностных расчетов инструмента, базовых деталей штампа, элементов оборудования [59; 71; 72];
- изучение экономических показателей принимаемых конструктивных и технологических решений, например, с использованием функционально-стоимостного анализа;
- наличие встроенной системы контроля параметров штамповки и передачи экспериментальных данных для последующей обработки;
- наличие системы автоматизированного проектирования и базы знаний для принятия технических решений.

Перечисленные выше средства поддержки принятия технических решений могут быть интегрированы в систему автоматизированного проектирования, основанную на распознавании конкретной проектной ситуации и отнесении ее к определенному стереотипному решению – аналогу, что позволяет использовать программный комплекс решения задач, соответствующих такому типовому варианту. Обоснованием такого подхода служит представление о проектировании как об итеративном процессе, цикличность которого порождается уточнением и изменением целей в процессе проектирования.

В настоящее время важнейшим фактором, влияющим на экономические показатели, является разработка и применение экономически оптимальных способов и средств изготовления изделий. Значительную долю затрат при получении деталей штамповкой занимает рабочий инструмент. Вследствие постоянно растущего значения и применения обработки давлением листовых деталей необходимо более активно использовать накопленные знания о процессе, действующих усилиях и влияющих на них факторах, учет которых позволит экономически и технически правильно изготовить и эксплуатировать штамповую оснастку.

В практике разработки и эксплуатации штампов накопилось большое количество эмпирического материала, связанного с изучением влияния конструкции штамповой оснастки, а также ее технологических, эксплуатационных и других характеристик на качество получаемых в результате штамповки деталей [74–79]. Использовать в практической работе эти данные достаточно сложно вследствие того, что применяемые для таких оценок аналитические зависимости громоздки или отсутствуют. Поэтому для обработки такого значительного объема информации требуется применение современных научных методов поддержки принятия технических решений. Кроме того, значительного увеличения стойкости рабочего инструмента штамповой оснастки и ее надежности нельзя добиться применяя только конструктивные или только технологические способы. Эта проблема должна решаться в комплексе с использованием всех возможных способов повышения надежности на основе использования автоматизированных систем проектирования и обработки расчетной и экспериментальной информации.

Рассмотрим некоторые методы повышения надежности разделительных штампов и случаи их применения на производстве. В частности, повышение надежности разделительных штампов является одной из основных проблем в условиях автоматической листовой штамповки на различных видах прессового оборудования при крупносерийном и массовом характере производства [73]. В этом случае низкая надежность оснастки приводит к простоям высокопроизводительных прессов-автоматов, а также вызывает необходимость изготовления штампов-дублеров, что ведет к нерациональной загрузке инструментальных цехов и непроизводительному использованию инструментальной стали. Таким образом, учёт вопросов повышения надежности штампов и экономии дорогостоящего металла при проектировании является актуальной задачей.

Для повышения надежности штампов используется достаточно много способов. Среди них можно выделить конструктивные (направленные на изменение конструктивного решения для элементов штамповой оснастки с целью улучшения ее работоспособности) [71; 72; 80,], технологические (использование перспективных материалов, поверхностное упрочнение рабочих кромок инструмента, термообработка и т. д.) [81] и эксплуатационные (наладка оборудования, контроль за качеством поверхности заготовок, применение современных технологий ремонтных работ, использование системы постоянного контроля зазоров системы и т. д.). Классификация наиболее эффективных и часто используемых методов повышения надежности штампов приведена на рисунке 2.31.

Стойкость штампов, их эксплуатационные свойства во многом зависят от качества прессового оборудования и в первую очередь от отклонения перпендикулярности направляющих ползуна к плоскости стола пресса [71]. Для устранения этих погрешностей пресса, а также погрешностей изготовления и установки штампа применяются устройства различных типов. Например, к устройствам компенсации перекосов относят плавающий хвостовик. Он может самоустанавливаться в отверстии под хвостовик ползуна пресса, не передавая перекосы на штамп. Во время рабочего хода ползуна пресса плавающий хвостовик частично компенсирует горизонтальные перемещения верхней плиты штампа относительно матрицы. Серьезным недостатком их применения является то, что они не обеспечивают компенсации перекосов штампа при съеме полосы с пуансонов во время движения ползуна пресса вверх.

Для компенсации погрешностей применяют также промежуточный штамповый блок, который встраивается в пресс. Промышленная эксплуатация таких блоков подтвердила целесообразность их использования: стойкость твердосплавных штампов повышается в 1,9, а стальных – в 2,6 раза по сравнению со стойкостью обычных штампов [71].

Для повышения стойкости оснастки за счет компенсации погрешности штамповочного оборудования предназначены перемещающиеся узлы крепления штампа. Они значительно уменьшают боковые усилия, передаваемые на направляющие колонки штампа. Такие узлы рекомендуется применять на кривошипных прессах усилием до 630 кН преимущественно при штамповке тонколистовых материалов. Стойкостные характеристики штампов при использовании перемещающихся узлов крепления повышаются в 1,5...3 раза.

Обеспечение повышенной жесткости конструкции приводит к уменьшению деформирования и взаимного смещения рабочего инструмента штампа, поэтому использование закрытых прессов предпочтительнее, чем открытых (хотя применение открытых прессов обеспечивает лучший доступ в рабочую зону штампа). Кроме того, с точки зрения повышения стойкости и надежности штамповой оснастки выгодным считается применение дезаксиальных механизмов в приводах прессов, что исключает «опрокидывание» ползуна пресса при изменении направления его движения.

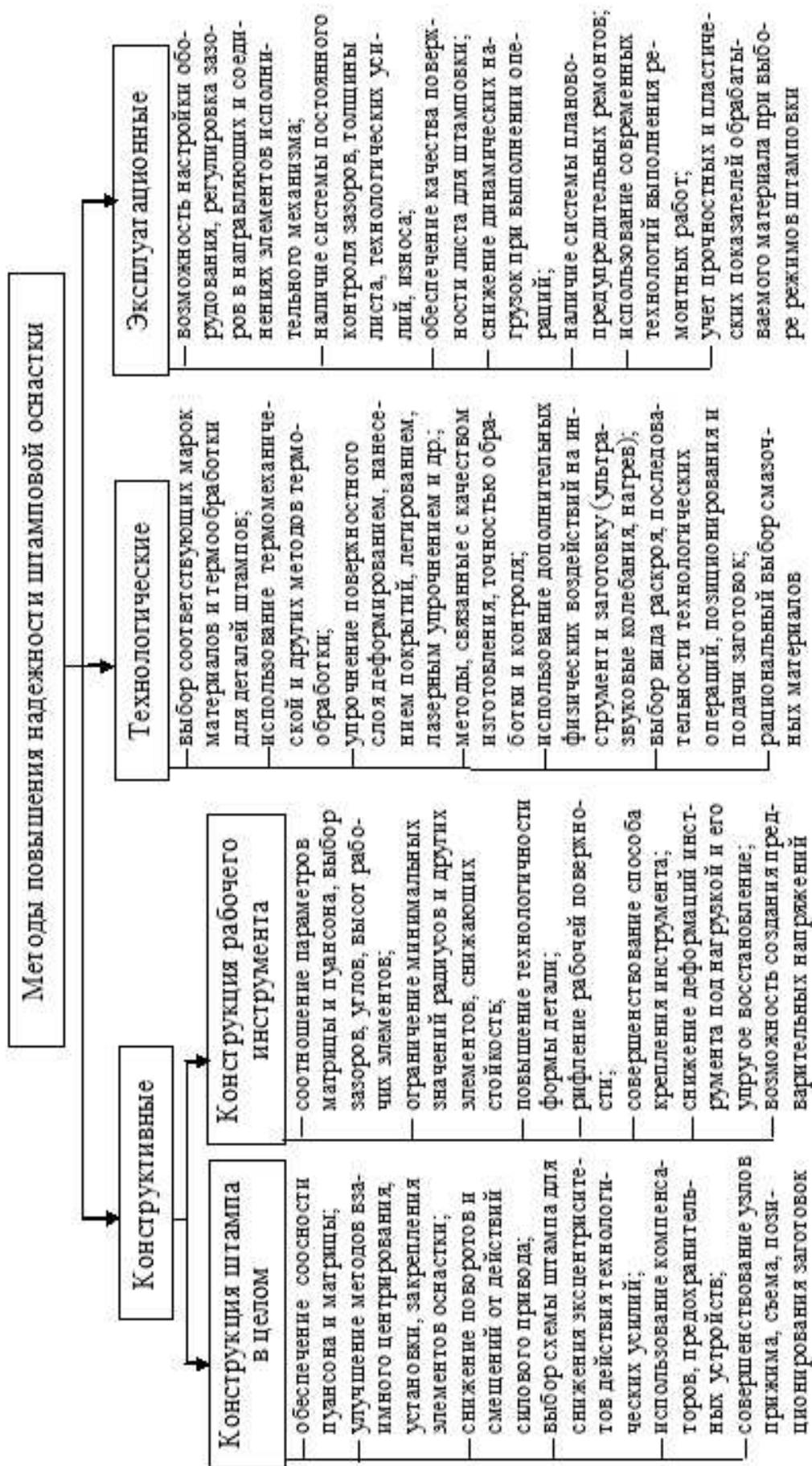


Рисунок 2.31 – Классификация методов повышения надежности штамповой оснастки для информационной поддержки проектирования в САПР

Значительное внимание уделяется также конструкции рабочего инструмента, так как матрица и пуансон во многом определяют работоспособность, надежность и долговечность штампа [69; 72]. Стойкость штампов можно также повысить путем увеличения высоты рабочих поясков и уменьшения уклона профиля рабочих окон матриц [73].

Резервы повышения стойкости оснастки заложены также в рациональном проектировании технологичной формы получаемых деталей. Существенное с точки зрения работоспособности изменение конструкции детали может значительно повысить стойкость штампа [69].

Эффективным технологическим способом решения проблемы повышения стойкости и надежности штамповой оснастки является разработка и широкое применение новых инструментальных сталей повышенной прочности. Производственные испытания штампового инструмента из таких сталей показывают повышенную в 2...3 раза стойкость (а, следовательно, и надежность) по сравнению с инструментом, выполненным из традиционных материалов.

Наибольшее распространение получили различные методы, применяемые для упрочнения рабочей поверхности штампов. Например, процесс азотирования рабочего инструмента, позволяющий повысить стойкость оснастки в 1,5...2 раза. Однако недостатком этого процесса является большая длительность технологического цикла, составляющая в среднем 30...40 часов [82].

К числу новых перспективных способов поверхностного упрочнения материалов следует отнести обработку с помощью лазеров. Процесс лазерного упрочнения имеет ряд особенностей, выгодно отличающих его от других методов упрочнения: локальность процесса упрочнения, получение заданной шероховатости поверхности, повышение коррозионной стойкости поверхностных слоев, автоматизация процесса обработки [73].

Кроме конструктивных и технологических способов большое значение имеют также эксплуатационные способы повышения надежности штамповой оснастки. Они направлены на регулирование параметров функционирования всей системы «пресс – штамповый инструмент – заготовка» и постоянный их контроль, что практически неосуществимо без использования автоматизированных систем контроля параметров штамповки, сбора и обработки экспериментальных данных и на этой основе поддержки принятия технических решений по всему процессу штамповки.

Таким образом, процесс проектирования должен обеспечивать возможность обоснованного выбора вариантов технических решений, а эффективная система автоматизированного проектирования должна обладать механизмом реализации соответствующего процесса принятия решений, т. е. она должна строиться как система искусственного интеллекта. В настоящее время известно большое количество различных методов и способов, направленных на повышение стойкости и надежности штамповой оснастки, накоплен богатый опытный материал по этой проблеме. В связи со сложностью обработки этой информации требуется использование

научных методов и автоматизированных систем поддержки принятия решений.

Дальнейшее совершенствование штамповой оснастки для разделительных операций листовой штамповки связано с повышением стойкости рабочего инструмента. К решению этой проблемы необходимо подходить комплексно: во-первых, необходимо совершенствовать методики расчета элементов штамповой оснастки, воспринимающих технологическую нагрузку; во-вторых, необходимо разрабатывать новые и оптимизировать существующие технологические процессы листовой штамповки с целью снижения нагрузок, действующих на рабочий инструмент штампа. Для информационной поддержки в САПР информация о методах повышения надёжности должна быть формализована в виде системы рекомендаций и ограничений, связанной с типовыми решениями для каждого элемента получаемой детали или штампа. В частности, геометрические ограничения при использовании ВСП можно связать с параметрами «виртуального инструмента». Другую информацию технологического, экономического характера можно разместить в соответствующих классах, производных от «виртуального инструмента».

2.3.2 Структурно-функциональная модель САПР

Для организации информационной поддержки проектирования требуется выделение типовых этапов разработки различных технологических процессов [17; 23; 53; 59; 71; 72]. Для формализации алгоритма автоматизированного проектирования технологических процессов и штамповой оснастки будем использовать структурно-функциональную модель [60; 61], которая, с одной стороны, рассматривает функциональное наполнение отдельных модулей САПР, а с другой стороны, позволяет их детализировать за счет выполнения функциональной декомпозиции.

Обобщенный алгоритм функционирования САПР технологических процессов и штамповой оснастки для получения листовых деталей приведен на рисунке 2.32. Исходные данные для проектирования штамповой оснастки приводятся в техническом задании на деталь, которую требуется получить (геометрия и размеры штампуемой детали, вид и материал заготовки). На основании этих данных конструктор выбирает вид технологического процесса (активность А1), который приводит к получению качественной детали требуемой геометрии.

Конструкция используемой штамповой оснастки зависит от геометрии деталей и вида технологического процесса. В частности, при необходимости получения методами вырубки-пробивки листовых деталей с заданным контуром и дополнительным формоизменением можно использовать традиционные конструкции штамповой оснастки (штамповые блоки, узлы

направления и т. д.), в которых дополнительно установить на матрице контурную накладку с параметрами, обеспечивающими требуемое формоизменение заготовки (например, получение бурта).

После выбора вида технологического процесса осуществляется проектирование рабочих элементов штампа (матриц, пуансонов — активность А2). При проектировании пробивных матриц следует ограничивать величину нависания их режущей кромки над провальным отверстием [71; 83; 84]. Результатом проектирования рабочих элементов штампа являются тип их конструкции (выбирается проектировщиком из имеющихся в базе данных) и исполнительные размеры, на основании которых осуществляется проектирование штампового блока (активность А3). Затем выполняется определение типа и геометрических параметров плит штампового блока, их размеров в плане, типа и исполнения направляющих узлов и т. д.

После определения параметров рабочего инструмента и штампового блока определяются значения силовых факторов, действующих на элементы штамповой оснастки при выполнении технологических операций (активность А4).

На следующем этапе на основании полученной информации осуществляется компоновка штамповой оснастки (активность А5), смысл которой заключается в контроле применимости выбранных параметров отдельных конструктивных элементов оснастки с точки зрения конструкции в целом. Кроме этого, на данном этапе (при необходимости) осуществляется дополнение конструкции штампа вспомогательными элементами (дополнительные буферы, упоры, фиксаторы, прижимные устройства, ножи и т. д.), значения параметров которых определяются по методикам, приведенным в справочной литературе или в базе данных САПР [71; 83].

Полученная компоновка штампа содержит достаточно информации о конструкции штамповой оснастки для перехода к конечно-элементному моделированию выбранного технологического процесса и штамповой оснастки. Поэтому на каждом этапе алгоритма обеспечивается возможность генерации модели технологического процесса и оснастки в среде САД-системы (активность А6). Для этой цели используются параметрические модели и таблицы значений параметров для различных случаев использования, содержащиеся в базе данных САПР.

Ядро системы несет в себе алгоритм ВСП, формализующий логические правила функционирования конструктивных элементов штампа с точки зрения оснастки в целом, что позволяет устанавливать конструктивные элементы друг относительно друга [16; 54; 64]. Таким образом, в результате генерации будет получена твердотельная модель штамповой оснастки, на основании которой может быть выполнена постановка ряда задач конечно-элементного анализа (активность А7).

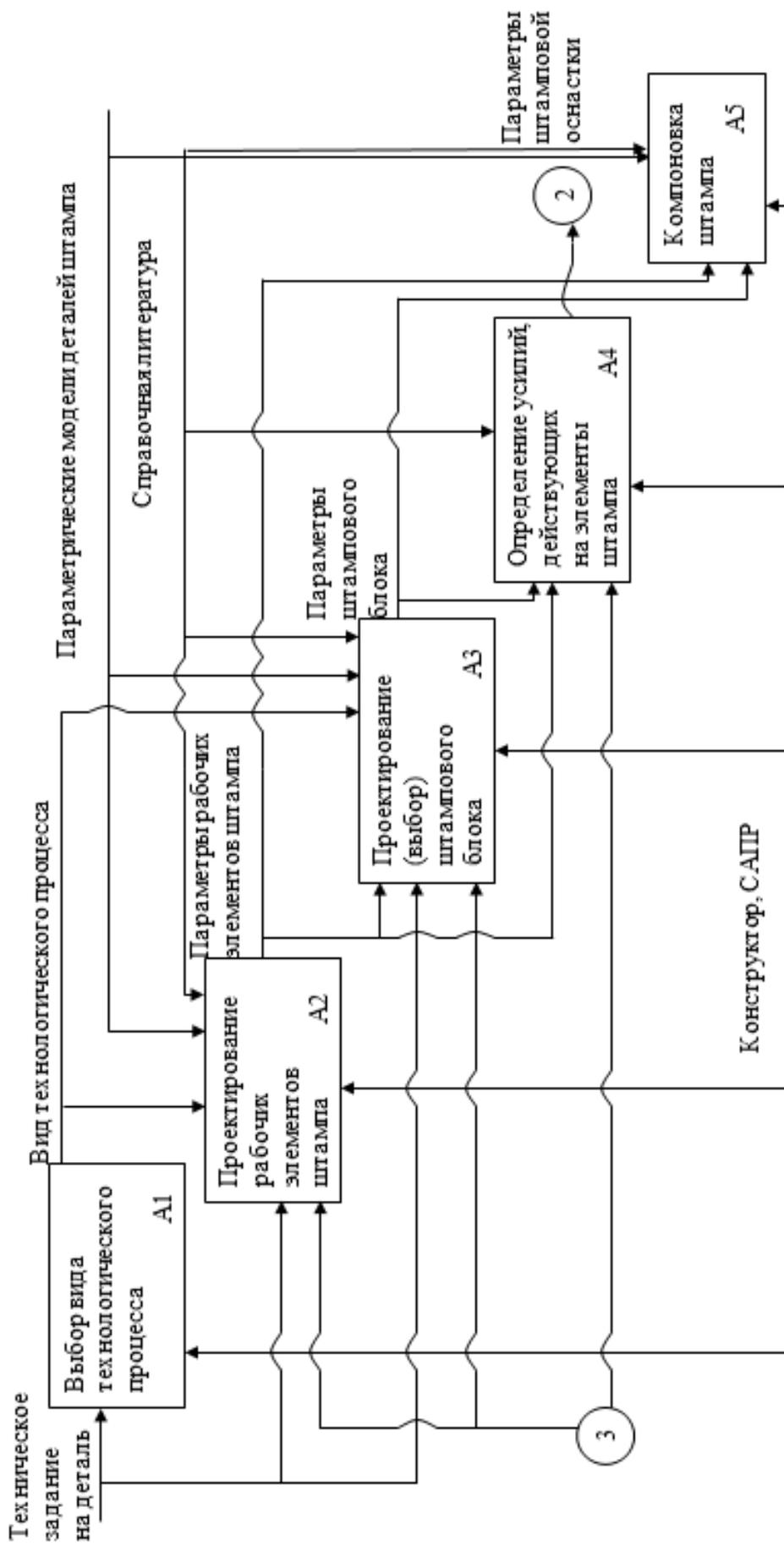


Рисунок 2.32 – Структурно-функциональная модель системы автоматизированного проектирования технологических процессов и штамповой оснастки

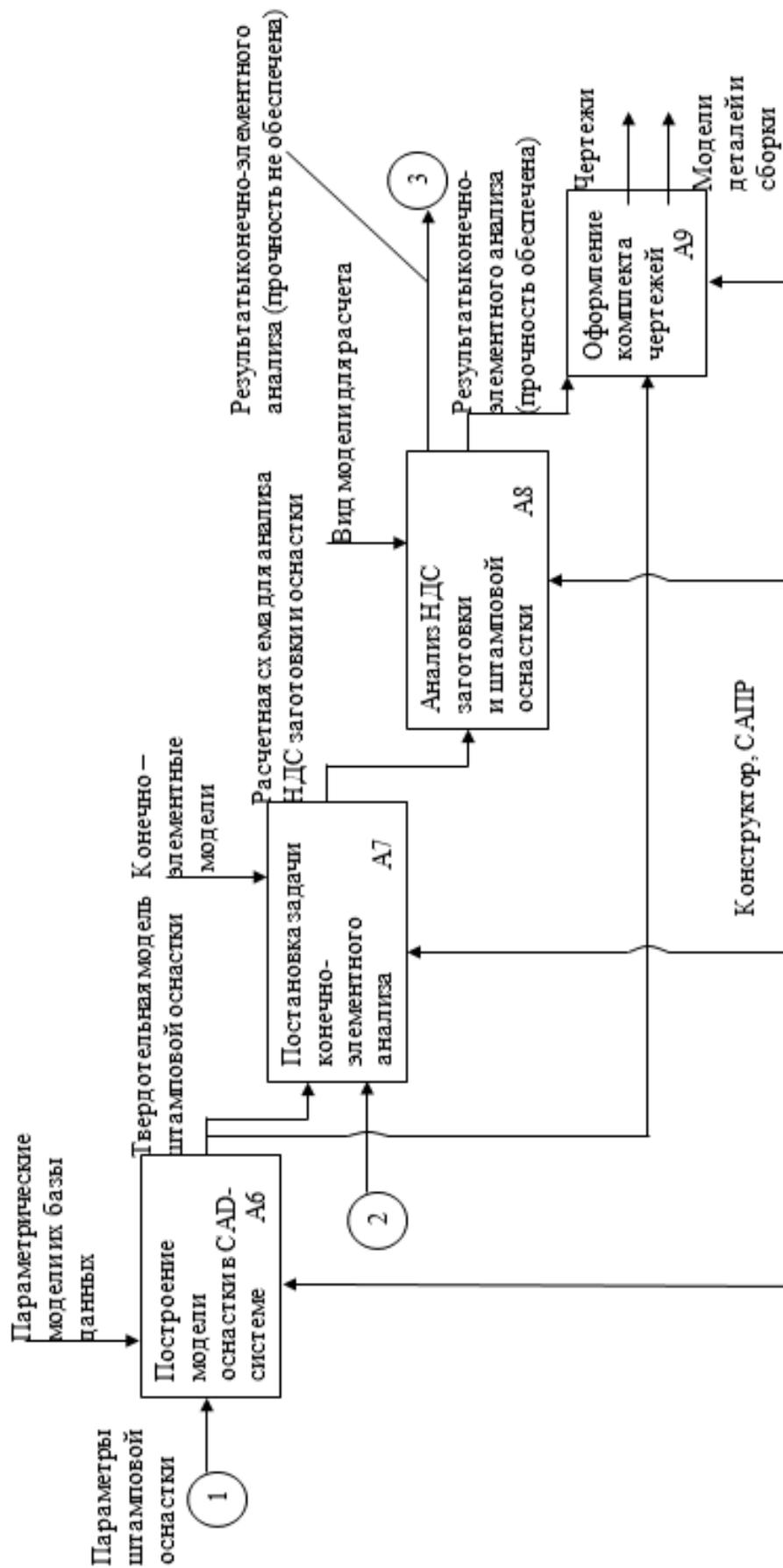


Рисунок 2.32, лист 2

В результате моделирования с использованием метода конечных элементов выполняется анализ формоизменения и напряженно-деформированного состояния металла заготовки в условиях упругопластического деформирования с возможностью контроля степени использования ресурса пластичности в течение выполнения технологического процесса или упругих деформаций, которые испытывает штамповая оснастка при выполнении технологической операции (активность А8). Следует отметить, что модуль расчета ресурса пластичности не является базовой возможностью САЕ-системы. Методика расчёта рассмотрена ниже. Модуль расчёта ресурса пластичности интегрирован с САЕ-системой.

Результаты конечно-элементного анализа позволяют еще на этапе проектирования технологического процесса штамповки и штамповой оснастки для получения детали определить наиболее напряженные места конструкции и при необходимости внести в нее определенные коррективы.

В случае, когда конструкция оснастки спроектирована удовлетворительно, по имеющейся твердотельной модели оснастки средствами САД-системы генерируется комплект конструкторской документации (активность А9).

Рассмотрим более детально отдельные этапы структурно-функциональной модели САПР и выполним описание информационного и алгоритмического обеспечения соответствующих активностей [83; 84].

Процесс проектирования рабочих элементов штампа включает определение исполнимых размеров пуансона и матрицы, значения которых определяются по зависимостям, приведенным в справочной литературе.

Как показывает опыт проектирования матриц и результаты проведенных нами исследований [85; 86], при проектировании исполнимых размеров матриц необходимо ограничивать величину нависания рабочего контура матрицы над провальным отверстием, что особенно важно при получении деталей сложной геометрической формы.

Затем в зависимости от выбранного вида технологического процесса и назначенных параметров матрицы осуществляется определение значений геометрических размеров контурной накладки, используемой для локального профилирования заготовки по периметру разделения (например, по способу [87]).

При необходимости выполняется также проектирование прижима, определение параметров буферов и других необходимых элементов на основании зависимостей и рекомендаций, приведенных в справочной литературе [83].

Дополнительным входом в предыдущие операции является поток данных «Результаты конечно-элементного анализа», который предоставляет информацию о формоизменении и параметрах напряженно-деформированного состояния металла заготовки и упругих деформациях элементов штамповой оснастки. Эта информация служит основанием для обоснованного изменения значений параметров технологического процесса и штамповой оснастки, принятых конструктором.

После выполнения перечисленных этапов формируются структуры данных, хранящие информацию о рассчитанных параметрах рабочих элементов штампа, а также осуществляется определение параметров моделей рабочих элементов штамповой оснастки, ряды значений которых извлекаются из базы данных САПР. Эта информация является результатом функционирования процесса «Проектирование рабочих элементов штампа» и используется при построении твердотельных моделей этих деталей по запросу для их визуального контроля, а затем и контроля модели всего штампа в целом в среде САД-системы, интегрированной с САПР.

При проектировании матрицы конструктор выбирает ее форму (шаблон из базы данных параметрических моделей матриц) на основании анализа геометрии штампуемой детали и назначает исполнительные размеры отверстий в матрице. По установленным параметрам отверстий матрицы на основании справочных данных определяются габаритные размеры матрицы. Параллельно с этим осуществляется контроль величины нависания рабочей кромки матрицы над провальным отверстием, состоящий в сопоставлении величин упругих деформаций рабочей кромки матрицы, полученной при конечно-элементном моделировании, с нормативными значениями [6; 85].

При необходимости предусмотрена возможность возврата к выбору формы и параметров отверстий в матрице, что позволяет уточнить значения параметров отверстий в случае, если величина нависания рабочей кромки матрицы слишком велика, что приводит к повышению концентрации напряжений в области перехода в провальное отверстие и, как следствие, к снижению стойкости матрицы.

Затем на основании назначенных габаритных размеров определяется высота матрицы, которая также уточняется по результатам конечно-элементного моделирования деформированного состояния штамповой оснастки под действием технологической нагрузки с учетом совместного деформирования всех элементов оснастки.

В результате выполнения рассматриваемого процесса получаем, во-первых, значения параметров матрицы, которые используются в дальнейшем при проектировании, а во-вторых, параметрическую модель матрицы выбранного исполнения, которая используется при твердотельном моделировании в среде САД-системы.

На основании данных об исполнимых размерах отверстия в матрице и требований к геометрии готовой детали, сформулированных в техническом задании, осуществляется расчет смещения эквидистантного контура отверстия в матрице. В результате выполнения данного этапа алгоритма формируется параметрическая модель отверстия, которая используется на последующих этапах функционирования САПР технологических процессов и штамповой оснастки при построении твердотельной модели штампа в среде САД-системе.

На основании ранее установленного вида технологического процесса и параметров рабочего инструмента осуществляется выбор вида штампового блока и определение его исполнительных размеров. В частности, осуществляется расчет высоты нижней плиты штампового блока на основании расчетных методик, приведенных в справочной литературе.

Кроме того, осуществляется выбор варианта установки плиты штампа на стол пресса. В случае, если принято решение выполнять установку штампа на дополнительную подштамповую плиту, осуществляется определение ее исполнительных размеров с учетом особенностей геометрической формы и габаритных размеров штампуемых деталей.

Параметры нижней плиты штампа и подштамповой плиты, а также усилия затяжки болтов назначаются в соответствии с принятыми методиками и контролируются по результатам конечно-элементного анализа упругих деформаций оснастки. Параметры верхних плит штампа определяются по базовым методикам, приведенным в справочной литературе.

Кроме этого, определяется закрытая и открытая высота штампового блока. Полученные значения этих параметров конструкции позволяют осуществить выбор типа направляющих узлов, а также определить их размеры.

После выполнения всех процедур формируются структуры данных, содержащие информацию о параметрах штампового блока, которые могут быть использованы при получении модели конструкции в среде САД-системы на основе технологии ВСП.

Достоинством разработанной системы является возможность непосредственного перехода к конечно-элементному анализу полученных моделей после их автоматизированного построения в среде САД-системы, что позволяет оценить качество принятых на промежуточных этапах проектирования технологических и конструкторских проектных решений.

2.3.3 Влияние конструкции штампа на деформацию элементов блока и рабочего инструмента

В разделе проанализировано влияние конструкции штампа на напряженно-деформированное состояние его элементов. В результате расчетов и анализа напряжений и деформаций элементов штампа предложена конструктивная схема, позволяющая значительно снизить упругие деформации элементов штамповой оснастки, воспринимающих технологическую нагрузку.

При выполнении разделительных операций листовой штамповки элементы штампа упруго деформируются под действием технологической нагрузки, что оказывает существенное влияние на точность получаемых деталей и стойкость рабочего инструмента штампа. Поэтому при проектировании штамповой оснастки необходимо учитывать упругие деформации

5 В существующих конструкциях штампов даже при симметричном приложении нагрузки (отсутствие эксцентриситета технологического усилия) вследствие упругих деформаций элементов конструкции возникают усилия в горизонтальной плоскости, которые стремятся сместить плиты штампового блока относительно друг друга и нарушить соосность инструмента.

6 На основе интеграции САД- и САЕ-систем и анализа нагружения штампа предложена конструктивная схема, позволяющая значительно снизить упругие деформации элементов штамповой оснастки (максимальный прогиб нижней плиты у провального отверстия – в 2 раза, угол поворота направляющих колонок штампа вследствие упругих деформаций его нижней плиты – в 7 раз), что позволит повысить точность штампуемых деталей и стойкость штамповой оснастки.

2.3.4 Моделирование и экспериментальное исследование упругих деформаций штамповой оснастки

Инженерные методики расчета не позволяют определить локальные характеристики деформаций и напряжений нагруженных элементов штамповой оснастки, т. к. не существует инженерных методик расчета напряженно-деформированного состояния толстых плит, нагруженных вдоль контура произвольной формы. Поэтому необходимо дальнейшее развитие методов расчета элементов штамповой оснастки, воспринимающих технологическую нагрузку. Расчет реальных конструкций возможен с использованием современных расчетных систем анализа конструкций методом конечных элементов [6; 21; 85].

В данном разделе выполнен анализ напряженно-деформированного состояния нагруженных плит штампового блока и экспериментальное исследование их упругих деформаций, возникающих в процессе нагружения.

В общем случае штамповая оснастка эксплуатируется на прессах, стол которых имеет центральное отверстие. Поэтому при выполнении технологических операций возникает всесторонний изгибающий момент, опрокидывающий плиту в отверстие стола прессы, что приводит к отклонению осей направляющих колонок от вертикального положения и существенно снижает эксплуатационные параметры штампа и точность штампуемых деталей.

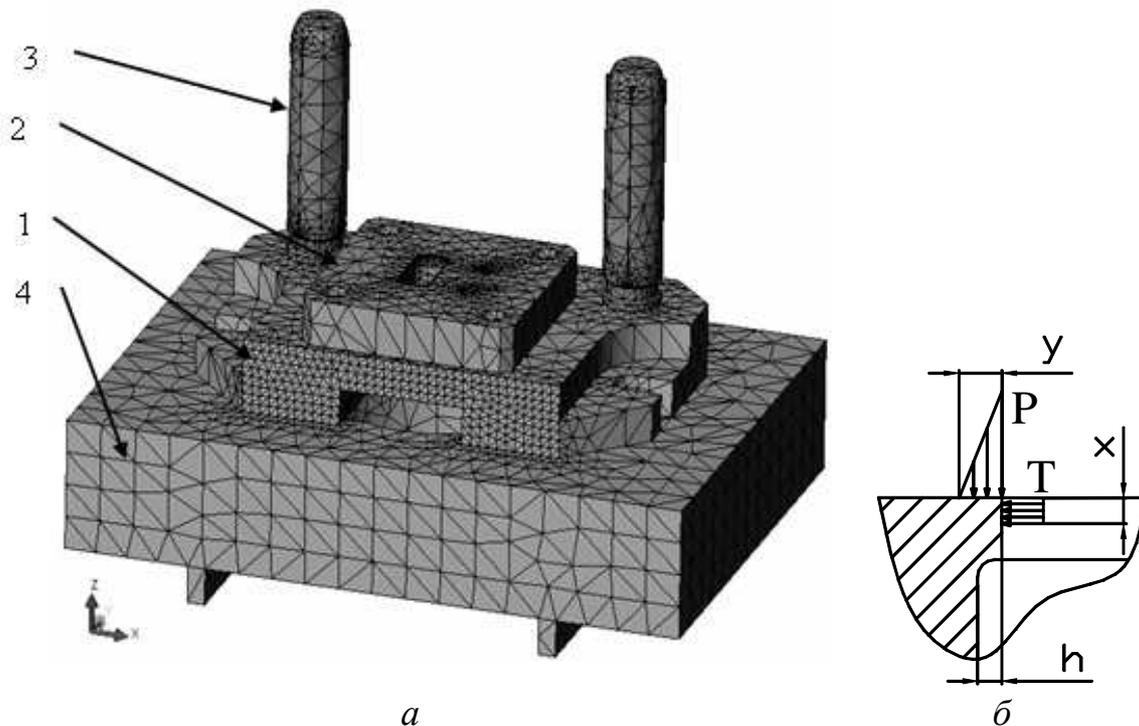
Как показали расчёты [86], наиболее существенные отклонения осей направляющих колонок от вертикального положения наблюдаются в плоскости, параллельной фронту штампа. Для количественной оценки величины отклонения осей колонок на основе использования конечно-элементного метода была разработана расчетная модель (рис. 2.41, а), включающая нижнюю плиту штампового блока с установленными в ней колонками, которая опирается на жесткую плиту с центральным отверстием,

элементов штампа, воспринимающих нагрузку, т.е. необходим комплексный (конструктивно–технологический) подход к проектированию.

В практике проектирования обеспечение требуемой жесткости штамповой оснастки достигается путем увеличения толщин плит штампового блока, что влечет за собой высокую металлоемкость штампового производства. При расчете конструктивных параметров элементов штамповой оснастки, как правило, используются методики, основанные на замене реальных конструкций упрощенными моделями (нагруженными балками). В этой связи известен ряд методов расчета плит штампового блока: расчет плит как нагруженных балок [71; 83; 84], расчет максимального прогиба нижней плиты штампового блока с использованием уравнения упругой линии [84] и другие аналитические методы [88]. Перечисленные методы основаны на ряде допущений, упрощающих расчет, и не позволяют определить локальные характеристики напряженно-деформированного состояния нагруженных элементов штамповой оснастки. Кроме того, они не учитывают упругие деформации рабочего инструмента штампа (матрицы и пуансона). В процессе проектирования штамповой оснастки конструкторы на основе личного опыта и существующих рекомендаций решают ряд вопросов, связанных с определением конструктивных размеров элементов штамповой оснастки, воспринимающих технологическую нагрузку. Поэтому необходимо дальнейшее развитие методов расчета и проектирования элементов штамповой оснастки, воспринимающих технологическую нагрузку, что можно осуществить путем использования современных расчетных систем анализа конструкций методом конечных элементов (МКЭ) [6; 22; 23].

Рассмотрим определение влияния конструкции штампа на напряженно-деформированное состояние элементов блока и рабочего инструмента штампов на основе использования метода конечных элементов. Для изучения была выбрана базовая конструктивная (и расчетная) схема (рис. 2.33), в которую входят: нижняя плита штампового блока, матрица, направляющие колонки. Стол пресса моделируется добавлением в расчетную схему плиты с центральным отверстием. Моделирование конструкции осуществлялось в среде CAD-системы SolidWorks с помощью интегрированного пакета конечноэлементного анализа COSMOSWorks.

В качестве силовых факторов при расчете напряженно-деформированного состояния оснастки при выполнении вырубке детали сложного контура учитывались как вертикальная технологическая сила, так и боковые распирающие усилия, возникающие вследствие смещения разделяемого материала в матрицу при внедрении в него пуансона. При этом было принято, что технологическая нагрузка P приложена к матрице эквидистантно контуру разделения. Ширина площадок нагружения – x , y , нависание рабочего контура матрицы над провальным отверстием – h . Распирающее боковое усилие T действует на площадку шириной x (см. рис. 2.33).



a – конструктивная схема штампа;
б – расчетная схема нагружения матрицы;
 1 – нижняя плита штампового блока; 2 – матрица;
 3 – колонка; 4 – стол прессы

Рисунок 2.33 – Расчетная схема для конечноэлементного анализа напряженно-деформированного состояния базового варианта штамповой оснастки в процессе выполнения технологической операции

При проведении численных экспериментов с использованием метода конечных элементов рассматривались упругие деформации матрицы разделительного штампа, т. к. именно она определяет точность штампуемой детали. Значения действующих на кромку матрицы усилий и геометрических параметров определялись по следующим зависимостям [83; 84]:

$$y = 0,385 \cdot s; \quad x = 0,5 \cdot s;$$

$$P = 1,25 \cdot L \cdot s \cdot \sigma_{cp}; \quad T = \frac{z' + 0,26 \cdot s}{s} P,$$

где x , y – ширина площадок, на которые действуют технологические усилия, мм;

s – толщина штампуемого материала, мм;

L – длина режущего контура, мм;

σ_{cp} – напряжение при срезе, МПа;

z' – величина одностороннего зазора между матрицей и пуансоном, мм.

Известно, что при выполнении технологической операции максимальные напряжения, возникающие в матрице, локализуются в области ее рабочего отверстия. Кроме того, как показали расчеты, вследствие действия изгибающего момента, вызванного эксцентричным приложением технологической нагрузки и изгибом штампуемого материала во время выполнения технологической операции, значительные напряжения возникают также в месте перехода рабочего отверстия в провальное (рис. 2.34). При этом величина этих напряжений при малых радиусах в месте перехода может быть соизмерима с напряжениями, возникающими на режущих кромках матрицы.

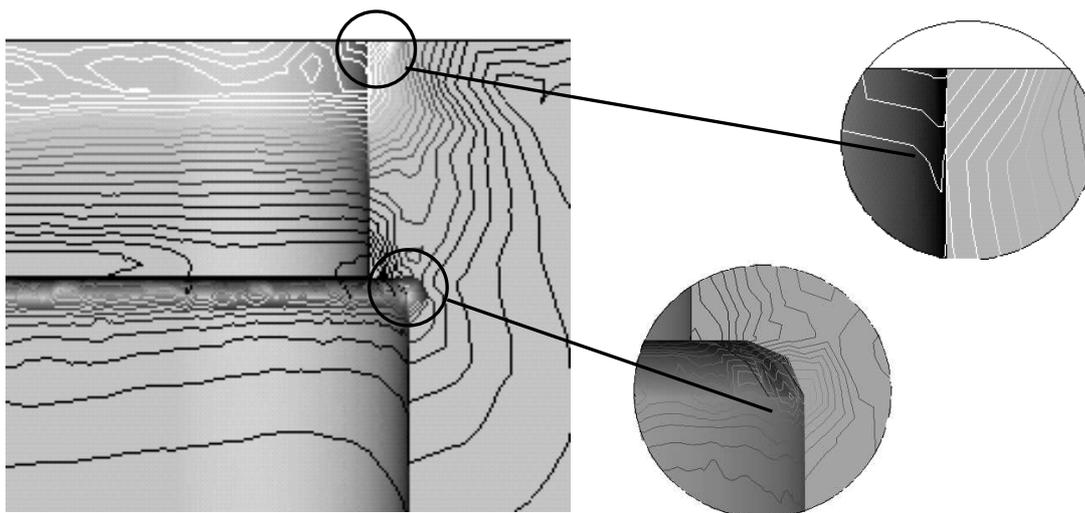


Рисунок 2.34 – Распределение напряжений в матрице при действии технологической нагрузки (сгущение сетки говорит о больших градиентах напряжений)

При ВСП после формирования рабочего отверстия в матрице необходимо спроектировать «виртуальный инструмент», выполняющий провальное отверстие, контур которого не полностью совпадает с контуром рабочего, поэтому необходим алгоритм проверки матрицы на прочность и жесткость.

При изготовлении вырубных матриц, имеющих сложный рабочий контур, провальное отверстие обычно выполняют с упрощением контура, что приводит к увеличению момента, возникающего вследствие действия технологической нагрузки и консольного нависания рабочего контура матрицы над провальным отверстием h (см. рис. 2.33). Это вызывает повышенную деформацию режущей кромки матрицы и снижает точность штампуемых деталей и стойкость оснастки.

Для изучения влияния величины нависания рабочего контура матрицы над провальным отверстием на ее напряженно-деформированное состояние был проведен ряд численных экспериментов. При расчетах принималось, что технологическое усилие $P = 150$ кН, что соответствует вырубке прямоугольной детали из полосы толщиной $s = 2,5$ мм. На рисунке 2.35 приведено влияние величины нависания рабочего контура матрицы

над провальным отверстием на абсолютную деформацию режущей кромки в горизонтальном направлении, которая приводит к уменьшению технологического зазора между режущими кромками матрицы и пуансона.

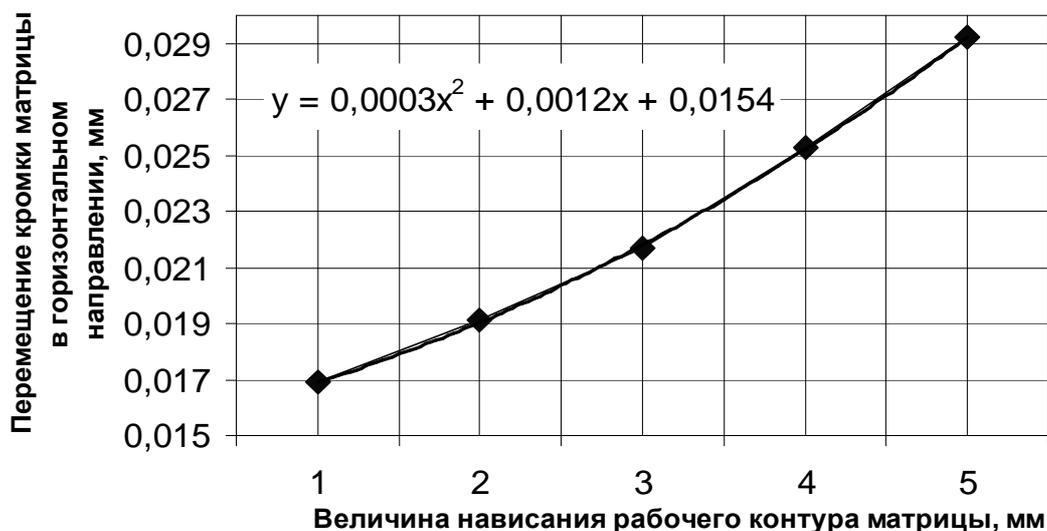


Рисунок 2.35 – Зависимость уменьшения одностороннего технологического зазора от величины нависания рабочего контура матрицы над провальным отверстием

Для принятых условий выполнения технологической операции допуск на двусторонний технологический зазор составляет 0,05 мм [71]. В соответствии с полученной зависимостью (см. рис. 2.35) предельное значение нависания рабочего контура в рассматриваемом случае составляет 4 мм, что подтверждается соответствующими рекомендациями [71]. Таким образом, существенное упрощение контура провального отверстия в ряде случаев может являться причиной низкой точности штампуемых изделий или разрушения рабочей кромки матрицы.

При установке нижних плит штампа на стол прессы с опорой на полную поверхность в момент действия максимальной технологической нагрузки возникает всесторонний изгибающий момент, опрокидывающий плиту в провальное отверстие стола прессы [83]. В связи с этим был выполнен ряд расчетов при различных условиях закрепления нижней плиты штампа на столе прессы. Расчеты показали, что изгиб плиты приводит к смещению направляющих колонок при выполнении технологической операции. Это вызывает перекосяк и упругий изгиб колонок штампа, что приводит к потере соосности пуансона и матрицы и ускоренному износу элементов штампа. Как видно из рисунков 2.36, 2.37, установка и силовая затяжка болтов крепления нижней плиты штампового блока к столу прессы существенно снижает ее деформацию в плоскости, параллельной фронту штампа, но практически не влияет на жесткость плиты в плоскости, которая перпендикулярна фронту прессы.

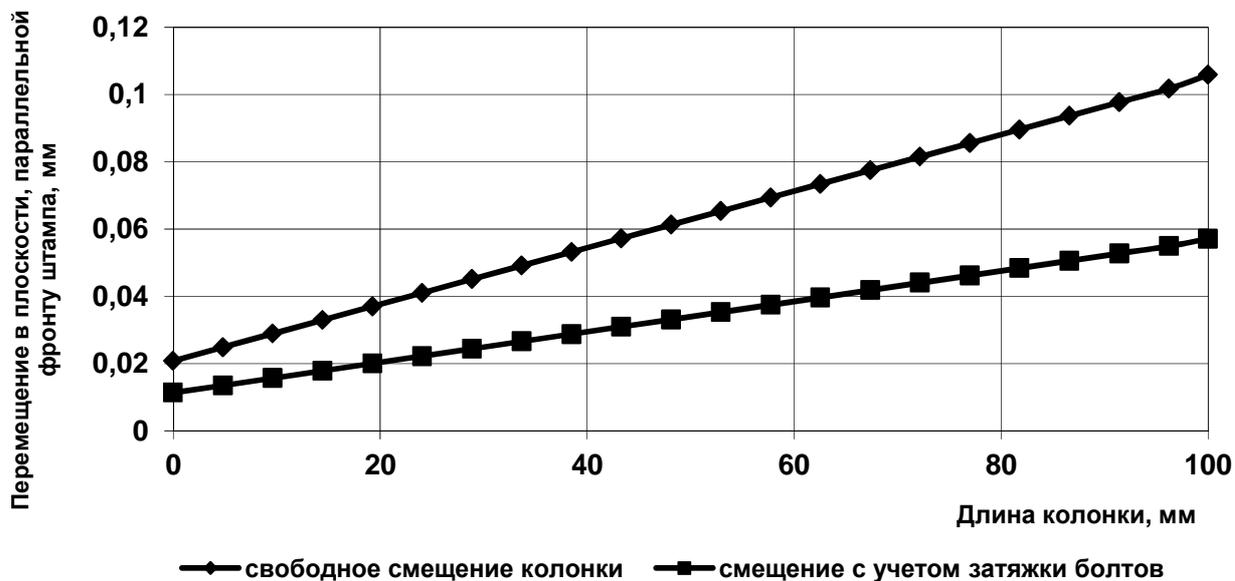


Рисунок 2.36 – Смещение колонки в плоскости, параллельной фронту штампа

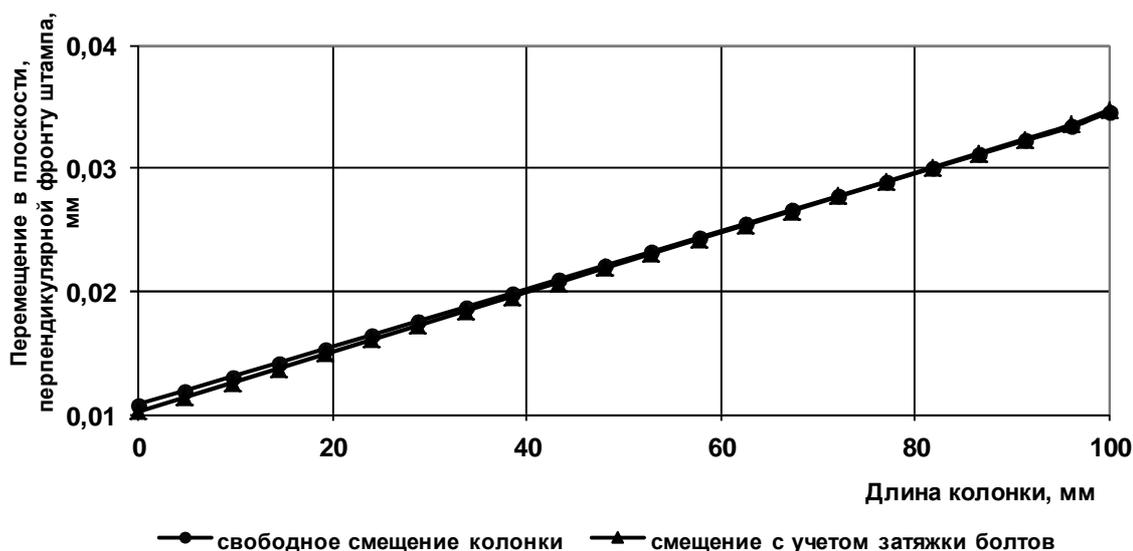


Рисунок 2.37 – Смещение колонки в плоскости, перпендикулярной фронту штампа

На основе анализа напряженно-деформированного состояния нагруженных элементов штампа была предложена конструктивная схема, представленная на рисунке 2.38. Нижняя плита штампового блока выполнена без продольного паза для удаления деталей. При этом нижняя плита штампа установлена на универсальную дополнительную подштамповую плиту с пазом, в который попадают и через который удаляются вырубленные детали.

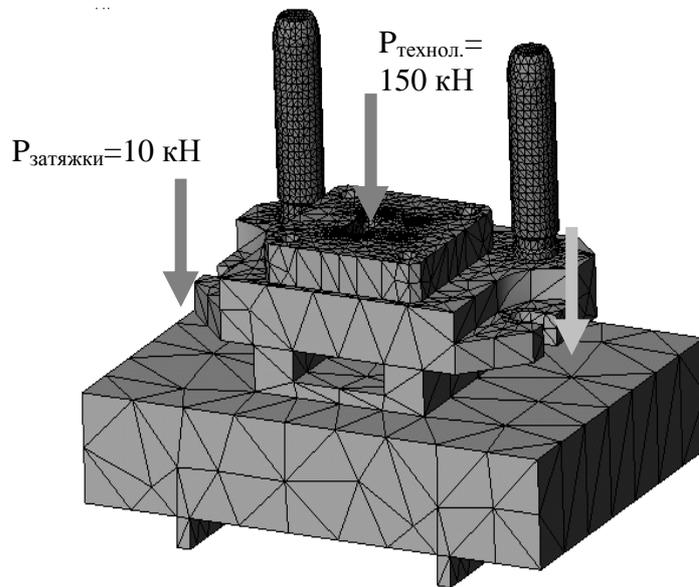


Рисунок 2.38 – Расчетная схема штампа с дополнительной подштамповой плитой

При использовании предложенной конструкции отклонение колонок от вертикали значительно снизилось (рис. 2.39) вследствие увеличения жесткости нижней плиты штампового блока и благодаря изменению схемы нагружения нижней плиты. При наличии дополнительной подштамповой плиты с пазом изгибающий момент, возникающий при затяжке болтов, частично компенсирует действие момента, возникающего вследствие приложения технологической нагрузки.

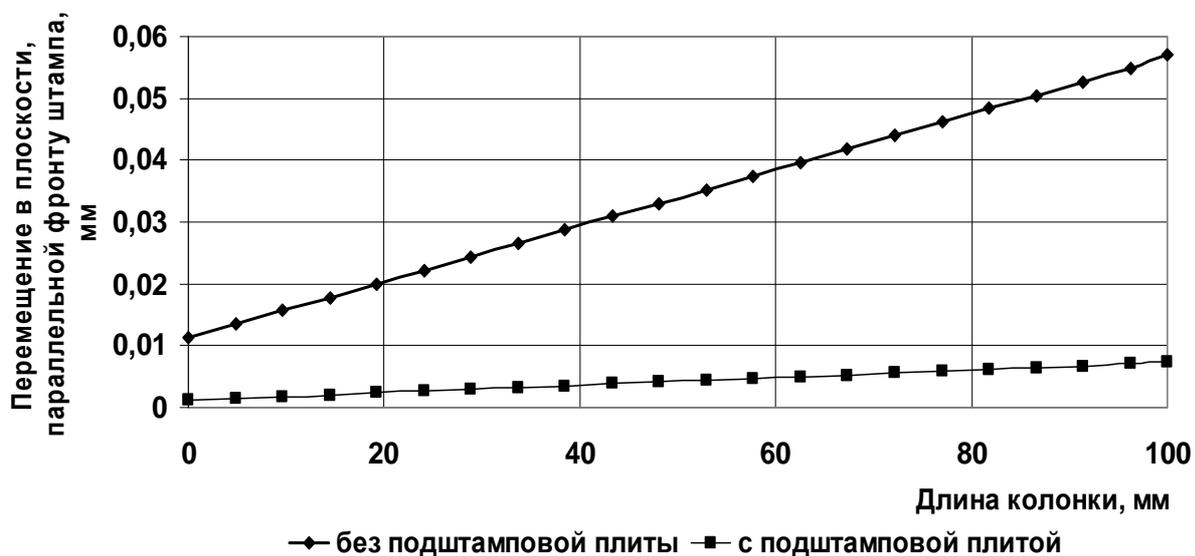


Рисунок 2.39 – Перемещение колонки в плоскости, параллельной фронту прессы, в результате изгиба нижней плиты штампа

Использование дополнительной подштамповой плиты позволяет значительно снизить упругие деформации нижней плиты штампового блока (почти в 2 раза) (рис. 2.40), что обеспечивает повышение эксплуатационных характеристик штампа.

На основе выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

1 Интеграция САПР с CAD и CAE-системами позволяет существенно повысить информационное обеспечение процесса проектирования, использовать CAE-системы для повышения качества проектных решений.

2 Существующие методы расчета упругих деформаций элементов штамповой оснастки при действии технологической нагрузки имеют ряд допущений, не позволяющих определять локальные значения деформаций и напряжений в элементах штампов.

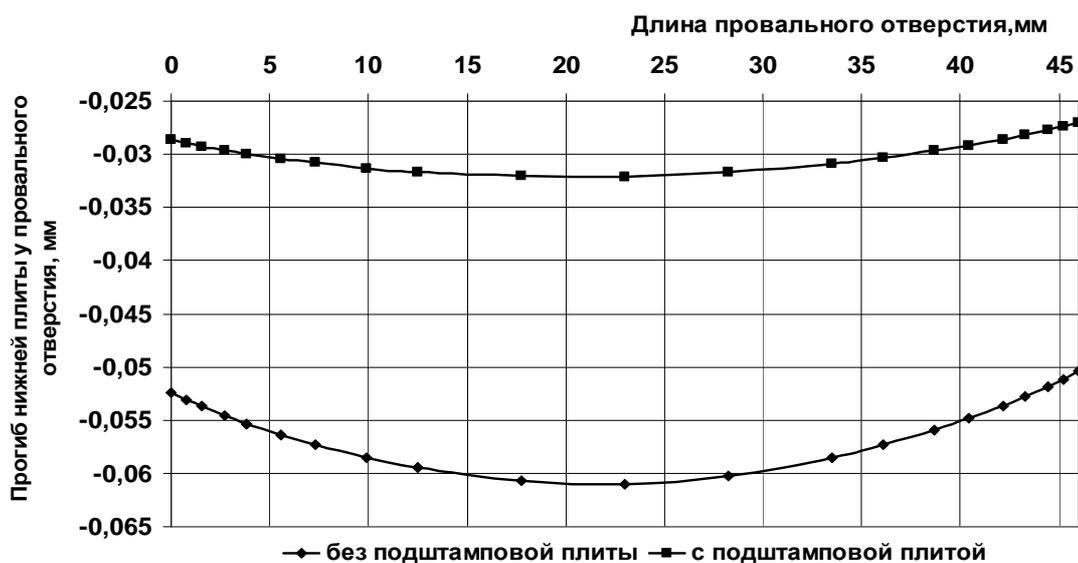


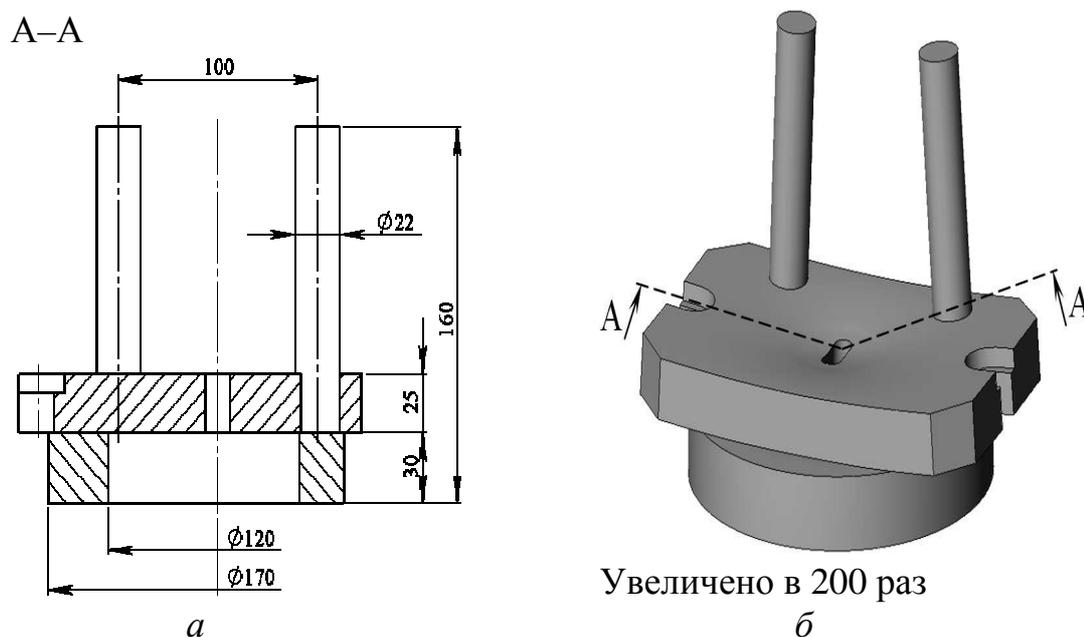
Рисунок 2.40 – Прогиб нижней плиты штампового блока вдоль провального отверстия

3 При выполнении технологических операций листовой штамповки напряжения локализируются не только непосредственно на режущей кромке, но и в области перехода рабочего отверстия матрицы в провальное. Величина нависания рабочего контура матрицы над провальным отверстием существенно влияет на уменьшение технологического зазора между пуансоном и матрицей при выполнении технологической операции. Поэтому с целью обеспечения установленного ГОСТами допуска на технологический зазор при проектировании провальных отверстий матриц требуется ограничивать величину нависания рабочего контура. В рассматриваемом случае предельное значение этого параметра составило 4 мм.

4 Расчеты с использованием МКЭ показали, что усилие затяжки болтов, крепящих нижнюю плиту штампового блока к столу прессы, является одним из факторов, позволяющих снизить упругие деформации нижней плиты штампового блока. Поэтому при эксплуатации штамповой оснастки необходимо контролировать усилие затяжки болтов.

моделирующую стол пресса. Нижнюю плиту штампа нагружали по периметру контура провального отверстия. Конечно-элементный расчет деформаций модели осуществлялся с учетом трения (коэффициент трения $\mu = 0,3$). Полученная в результате расчета деформированная форма модели показана на рисунке 2.41, б.

С целью оценки адекватности конечноэлементной модели проводился комплекс экспериментальных исследований путем тензометрии оснастки. При проведении исследований использовали фольговые тензорезисторы ФКТК10–200С–II, которые соединялись по мостовой схеме, один полумост которой размещался на градуировочном устройстве (рис. 2.42, а), а второй – непосредственно на штамповой оснастке (рис. 2.42, б).



*а – расчетная модель; б – деформированная форма нижней плиты штампа
Рисунок 2.41 – Расчетная модель для анализа упругих деформаций нижней
плиты штампового блока и форма плиты, полученная в результате
расчета*

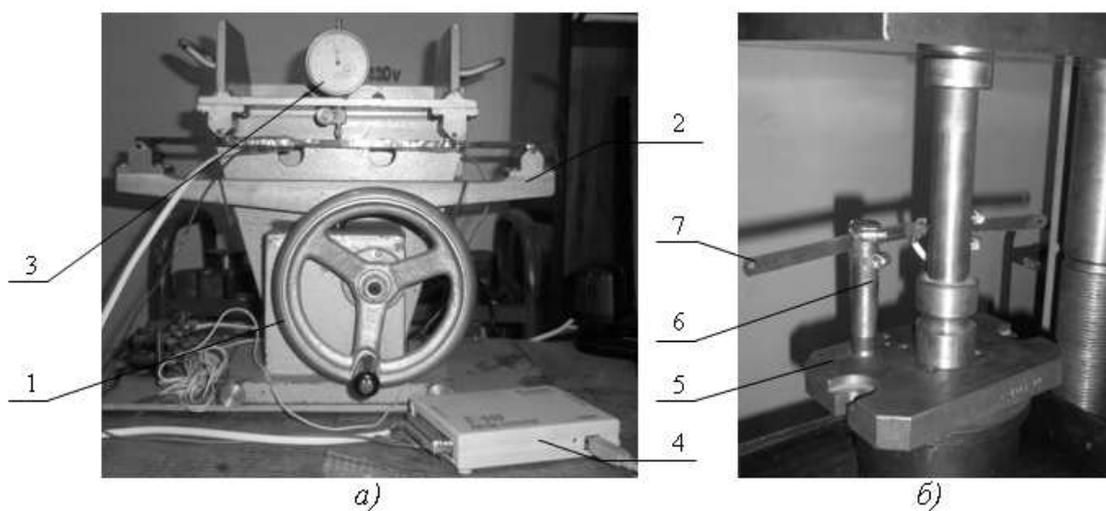
Градуировочное устройство представляет собой балку постоянного сечения, расположенную на двух опорах, а также устройство нагружения. Расстояние между опорами балки составляло $l = 340 \text{ мм}$, а ее толщина $s = 6 \text{ мм}$. Деформацию балки определяли по формуле [89]

$$\varepsilon = \frac{4fs}{l^2},$$

где f – величина прогиба балки в средней точке, которую измеряли индикатором часового типа.

Отклонение осей колонок штампа от вертикального положения оценивали по изменению межосевого расстояния между колонками δ . Для измерения данного параметра на направляющие колонки штампа был установлен преобразователь перемещений, который представлял собой гибкую пластину ($s = 0,75 \text{ мм}$; $l = 100 \text{ мм}$), жестко связанную с колонками штампового блока и имеющую начальный прогиб ($f_0 = 6,14 \text{ мм}$), на которую был наклеен полумост тензометрического моста.

При деформировании штамповой оснастки прогиб пластины увеличивается, что приводит к разбалансировке тензометрического моста. По величине разбалансировки с использованием тарировочных зависимостей, полученных с помощью градуировочного устройства, определяли величину изменения межосевого расстояния направляющих колонок. Напряжение с измерительной диагонали тензометрического моста снимали аналогово-цифровым преобразователем Е-440 производства фирмы L-Card (см. рис. 2.42, а) и обрабатывали с помощью персонального компьютера.



*а – градуировочное устройство;
б – штамповая оснастка с установленным тензорезисторным преобразователем деформаций
1 – устройство нагружения, 2 – балка с датчиками, 3 – индикатор,
4 – тензостанция, 5 – плита штампа, 6 – колонка штампа,
7 – гибкая пластина с датчиком*

Рисунок 2.42 – Тензометрическое исследование прогиба плиты штамповой оснастки

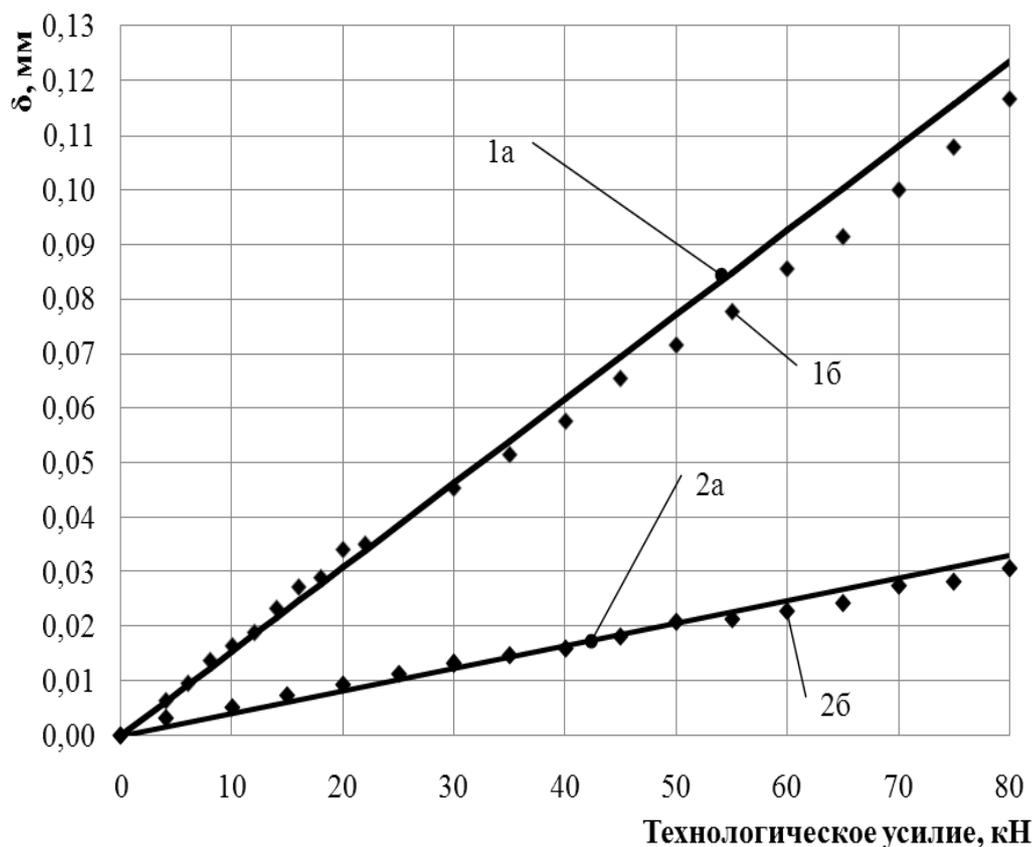
Как отмечалось, на основе расчётов с применением САЕ-системы [86; 90] была предложена устанавливаемая на стол пресса подштамповая плита, которая позволяет изменить схему нагружения и локально повысить жесткость нижней плиты штампового блока. Поэтому при проведении экспериментальных исследований упругих деформаций нижней плиты под действием технологической нагрузки рассматривались следующие варианты ее установки:

– базовый вариант – установка нижней плиты штампового блока непосредственно на кольцевую плиту с центральным отверстием, моделирующую стол пресса (рис. 2.41);

– предложенный новый вариант – установка нижней плиты на дополнительные опоры, которые представляют собой две балки постоянного поперечного сечения (16×16 мм), которые в свою очередь устанавливаются на кольцевую плиту с центральным отверстием перпендикулярно фронту штампа симметрично относительно оси отверстия на расстоянии $h = 40$ мм друг от друга (для извлечения вырубленной детали).

Данные, полученные путем конечноэлементного моделирования и в результате экспериментального исследования деформированного состояния нагруженных элементов штамповой оснастки, приведены на рисунке 2.43.

Сравнительный анализ полученных данных показал, что относительная погрешность вычислений величины изменения межосевого расстояния направляющих колонок не превышают 10%. Кроме того, из рисунка 2.43 видно, что при установке нижней плиты штампа на дополнительные опоры значение изменения межосевого расстояния направляющих колонок существенно уменьшается (до 3,8 раз при усилии $P = 80$ кН).



1 – без дополнительных опор; 2 – с дополнительными опорами
 а – расчетные значения; б – экспериментальные значения

Рисунок 2.43 – Расчетные и экспериментальные значения изменения межосевого расстояния направляющих колонок в зависимости от величины технологической нагрузки

В процессе выполнения расчётов с использованием МКЭ и экспериментальных исследований получены следующие результаты:

1 Разработана конечноэлементная модель штамповой оснастки, которая на основе использования современных средств численного моделирования позволяет выполнить анализ деформированного состояния конструктивных элементов штампа с учетом реальных условий его функционирования.

2 Разработана методика экспериментального определения параметров деформированного состояния оснастки под действием технологической нагрузки на основе использования методов тензометрии, реализация которой позволила установить реальные значения деформаций конструктивных элементов штампового блока и оценить адекватность используемых численных моделей.

3 Сравнительный анализ численных и экспериментальных значений величины отклонения осей направляющих колонок штампового блока от вертикального положения показал, что относительная погрешность численного решения не превышает 10 %, что подтверждает достаточную степень адекватности используемых конечноэлементных моделей.

4 Проведенный комплекс экспериментальных исследований упругих деформаций нижней плиты штамповой оснастки под действием технологической нагрузки показал, что использование дополнительной подштамповой плиты в виде двух балок, приводит к существенному снижению упругих деформаций элементов штамповой оснастки. В данном случае изменение межосевого расстояния направляющих колонок штампа снизилось в 3,8 раза, что обеспечивает повышение точности штампуемых деталей и стойкости штамповой оснастки.

2.3.5 Расширение функциональности CAD/CAE-систем на основе интеграции с пользовательскими программными компонентами

Практика использования интегрированных CAD-, CAE-систем показывает, что их базовый функционал не всегда позволяет решать задачи, возникающие в предметной области. Поэтому возникает необходимость интеграции CAD-, CAE-систем с дополнительными модулями, позволяющими решать специфические задачи.

В частности, в заготовительном производстве при теоретическом исследовании процессов обработки металлов давлением (ОМД) широко используются численные методы анализа напряженно-деформированного состояния заготовки, возникающего в результате выполнения технологических операций [23; 54; 84; 85; 90–95]. Возможность применения конечноэлементных систем при анализе процессов ОМД связана с универсальностью математических моделей [6; 22; 23; 96; 97], описывающих процессы упругопластического деформирования и допускающих учет таких

факторов, как деформационное упрочнение заготовки, особенности трения на контактных поверхностях и т. д., что оказывает существенное влияние на точность определения значений параметров напряженно-деформированного состояния по объему заготовки. Кроме того, использование систем конечно-элементного анализа при моделировании процессов ОМД позволяет осуществлять всестороннее исследование технологических процессов путем изменения базовых параметров модели в широком диапазоне, что не всегда можно реализовать при использовании классических методов анализа.

Анализ возможностей универсальных систем конечноэлементного анализа, которые можно применять для исследования процессов ОМД, показал, что подавляющее большинство из них не позволяет в полной мере моделировать выполнение технологических операций, результатом которых является разрушение заготовки в очаге пластической деформации (например, операций листовой штамповки). Это связано с тем, что в рассмотренных системах моделирования реализуются только наиболее общие модели поведения материала под действием нагрузки, а реализация феноменологических критериев оценки деформируемости материала отсутствует.

Таким образом, для САПР технологических процессов и штамповой оснастки необходима разработка пользовательского модуля оценки степени использования ресурса пластичности, интегрированного в разрабатываемую САПР.

На основе формализованного понятийного аппарата предметной области можно осуществлять разработку пользовательских модулей, дополняющих и расширяющих функциональные возможности базовых CAD/CAE-систем. При этом использование единой системы понятий позволяет существенно упростить процесс интеграции пользовательских приложений.

Для обеспечения этой возможности необходима формализация понятийной структуры предметной области и ее причинно-следственных связей, что достигается путем представления их в виде онтологии понятий [118–120].

Часть онтологии МКЭ моделирования приведена на рисунке 2.44, она позволяет облегчить пользователю поиск информации в большом наборе ресурсов путем систематизации знаний, создания единой иерархии понятий, унификации терминов и правил интерпретации.

В качестве базового концепта рассматриваемой предметной области выделено понятие задачи, которую необходимо решить пользователю интегрированной системы автоматизированного проектирования «Задача расчета МКЭ». Данное понятие может быть рассмотрено как совокупность образующих его элементов, представленных на рисунке 2.44 понятиями «Модель», «Сетка конечных элементов», «Граничное условие», «Нагрузка», «Геометрическая модель» и др.

В частности, классы «Граничное условие», «Нагрузка», «Параметр материала» позволяют определить особенности задачи определения напряженно-деформированного состояния для заданного процесса и условий деформирования.

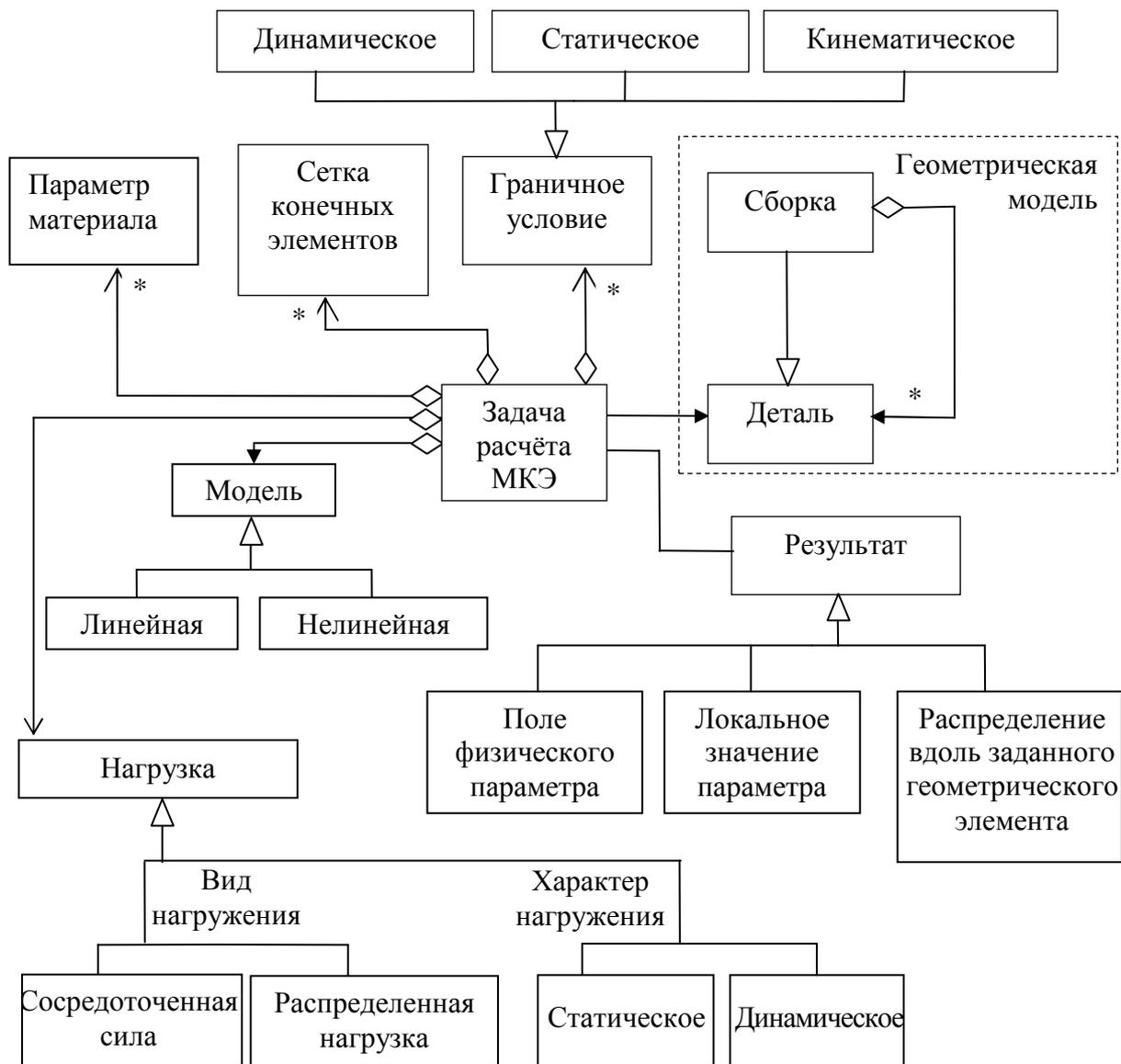


Рисунок 2.44 – Онтология базовых понятий при конечноэлементном моделировании

Рассмотрим теоретические основы расчета степени использования ресурса пластичности. Вопросами оценки пластичности материала в разное время занималось достаточно большое количество исследователей [98–100]. Как отмечают многие авторы, при холодном пластическом деформировании важнейшим фактором, определяющим пластичность материала, является вид схемы напряженного состояния [99].

Для численного описания этой схемы используется показатель напряженного состояния Π , значение которого определяется по формуле [98]

$$\Pi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i},$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения;
 σ_i – интенсивность напряжений.

Интенсивность напряжений в общем случае определяется по формуле [101]

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}.$$

Основой для определения степени использования ресурса пластичности является построение поверхности предельной пластичности [102] для моделируемого материала, которая в общем случае представляет собой функцию [103]

$$\varepsilon_p = f(\Pi, \mu_\sigma),$$

где ε_p – предельная деформация, при которой осуществляется разрушение материала заготовки,

μ_σ – параметр Надаи – Лоде.

Параметр Надаи – Лоде определяется по формуле [98]

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}.$$

Как отмечается в работе [100], поверхность пластичности может быть аппроксимирована экспоненциальной зависимостью вида

$$\varepsilon_p(\Pi, \mu_\sigma) = \varepsilon_p^{\Pi=0} e^{\lambda_2 \mu_\sigma - \lambda_1 \Pi},$$

где $\varepsilon_p^{\Pi=0}$ – предельная деформация, полученная при испытаниях образца на кручение (для листовых материалов – на сдвиг);

λ_1, λ_2 – постоянные коэффициенты.

На основании проведенных экспериментальных исследований и применения методики [100] было установлено, что поверхность пластичности для стали 08кп может быть аппроксимирована зависимостью:

$$\varepsilon_p(\Pi, \mu_\sigma) = 0,56 e^{0,65 \mu_\sigma - 0,78 \Pi}.$$

Оценку степени использования ресурса пластичности в процессе моделирования необходимо проводить на каждом шаге численного решения, полученного методом конечных элементов. При определении использованного ресурса пластичности целесообразно применять критерий, основанный на нелинейном законе накопления повреждений, в виде [100]

$$\Psi = \int_0^{\varepsilon_i} n \frac{\varepsilon_i^{n-1}}{\varepsilon_p (\Pi, \mu_\sigma)^n} d\varepsilon_i,$$

где ε_i – интенсивность деформаций;

n – коэффициент, учитывающий влияние истории деформирования.

Для определения коэффициента n использовалась формула [100]:

$$n = 1 + 0,16 \frac{d\Pi}{d\varepsilon_i} - 0,1 \frac{d\mu_\sigma}{d\varepsilon_i}.$$

Интенсивность деформаций необходимо определять на каждом шаге решения по формуле [101]

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2},$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные логарифмические деформации.

С целью прогноза момента разрушения заготовки при конечноэлементном моделировании в среде системы ABAQUS был разработан обобщенный алгоритм оценки использования ресурса пластичности (рис. 2.45).

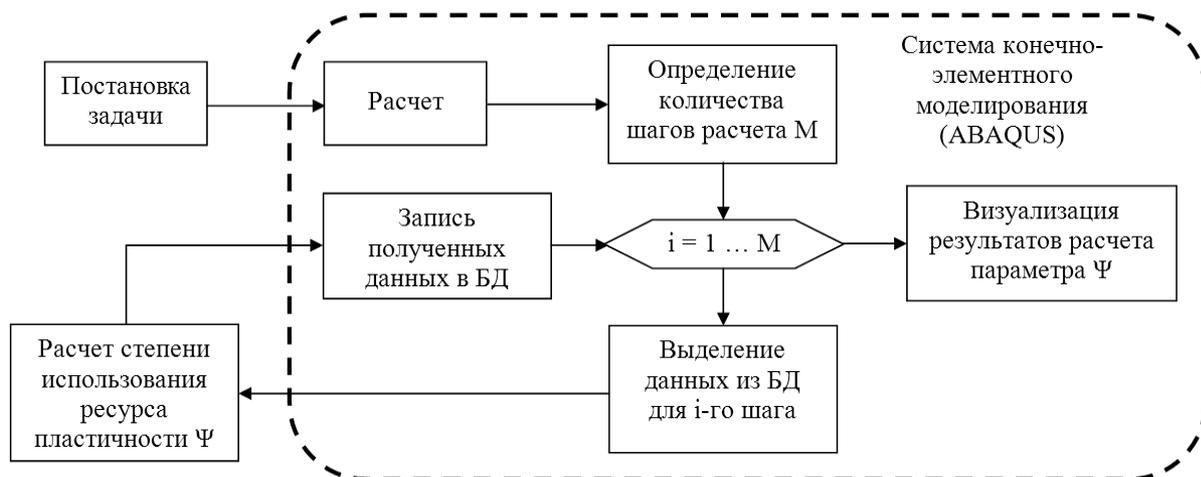


Рисунок 2.45 – Обобщенный алгоритм конечноэлементного моделирования технологических операций с оценкой степени использования ресурса пластичности

На первом шаге алгоритма осуществляется постановка задачи конечноэлементного анализа, при которой необходимо определить геометрические параметры модели, механические свойства моделируемых материалов и т. д. После этого выполняется традиционный расчет поставленной задачи средствами САЕ-системы ABAQUS, результатом которого является база данных, содержащая значения параметров НДС в узлах конечноэлементной сетки модели.

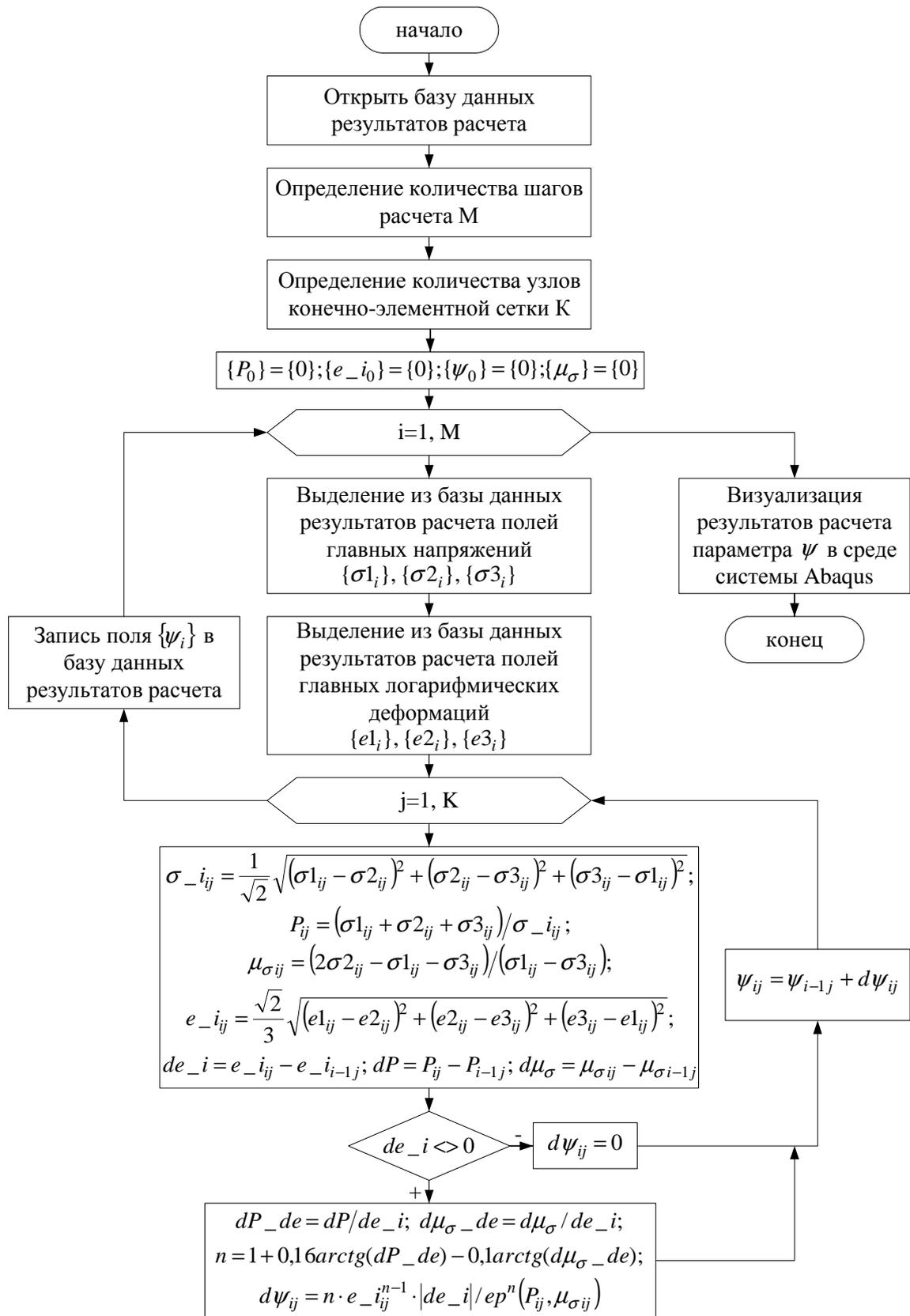
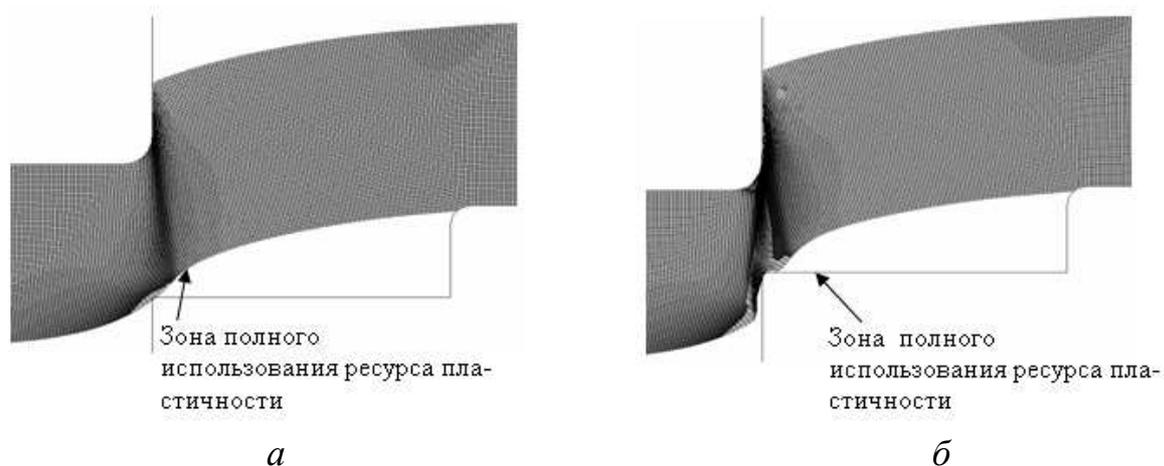


Рисунок 2.46 – Алгоритм вычисления полей значений степени использования ресурса пластичности на каждом из этапов численного решения задачи моделирования операций пластического деформирования

Анализ полученной базы данных позволяет выявить количество шагов M , за которые было получено решение задачи. Это обеспечивает возможность организации итерационного вычислительного процесса определения степени использования ресурса пластичности Ψ для всех узлов конечноэлементной сетки на каждом шаге расчета.

На каждой итерации из базы данных для текущего шага расчета выделяются значения главных напряжений и деформаций в каждом из узлов конечноэлементной сетки (рис. 2.46). По известным значениям напряжений и деформаций согласно изложенной выше методике определяются приращения степени использования ресурса пластичности материала заготовки $d\Psi_{ij}$ для j -го узла конечноэлементной сетки на i -м шаге численного решения, а также накопленные значения степени использования ресурса пластичности Ψ_{ij} , которые записываются в базу данных результатов расчета. Использование встроенной базы данных системы ABAQUS делает возможным визуализацию полученных результатов (полей степени использования ресурса пластичности Ψ_{ij}) непосредственно средствами CAE-системы.

Таким образом, после анализа степени использования ресурса пластичности в приложении пользователя на основе изложенной методики информация о величине значений Ψ_{ij} в каждой точке сетки передается в ABAQUS и визуализируется (рис. 2.47, 2.48).



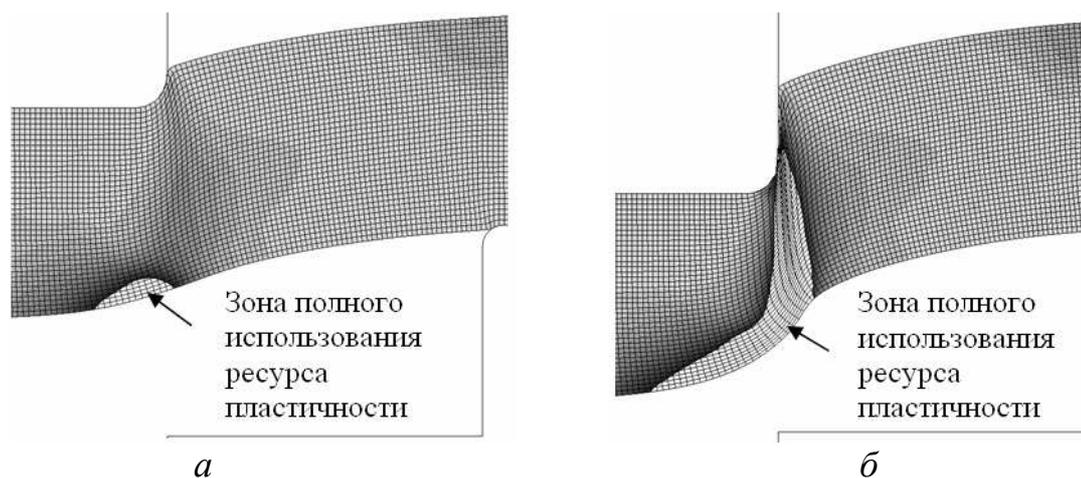
*а – использование ресурса пластичности металла заготовки при ее контакте с матрицей;
б – окончательное разделение заготовки*

Рисунок 2.47 – Процесс разделения заготовки на матрице

На основании разработанного алгоритма выполнена реализация программного обеспечения, интегрированного с системой конечноэлементного моделирования ABAQUS, в частности, разработан пользовательский модуль оценки степени использования ресурса пластичности, интегрированного в разрабатываемую САПР технологических процессов и штамповой оснастки [104].

Для интегрированных с САЕ-системами САПР предложена онтология базовых понятий при конечно–элементном моделировании.

Применение разработанного алгоритма и программного обеспечения при моделировании процесса пробивки листовой заготовки с локальным профилированием бурта по периметру разделения [105; 106] позволило уточнить характер протекания данного технологического процесса, выявить различные случаи разделения заготовки, предложить новые технические решения [87; 107; 108].



а – начальная стадия; б – стадия разделения заготовки
Рисунок 2.48 – Процесс разделения заготовки без контакта с матрицей

2.4 Реализация ИСАПР для проектирования технологии и инструмента для вальцовки заготовок на основе интеграции с CAD/CAM/CAE-системами

Большое значение в машиностроении придается технологическим процессам получения полуфабрикатов путем их обработки давлением. Для улучшения структуры исходных заготовок, получения высокого качества поверхности заготовок применяется технологический процесс вальцовки [109–111]. Вальцовка используется для получения профилированной заготовки переменного сечения, обеспечивающей уменьшение потерь металла при дальнейшей объемной штамповке, а также в качестве окончательной операции.

Сущность вальцовки заключается в том, что при деформации заготовки между вращающимися сменными вальцовочными штампами происходит уменьшение площадей поперечных сечений исходной заготовки при одновременном увеличении ее длины. При вальцовке ручки располагают на окружности вальцовочных штампов, подобно расположению калибров на валках при сортовой прокатке. Профиль заготовки должен обеспечить оптимальное распределение металла вдоль ее оси. Вальцовка заготовок

осуществляется в несколько переходов по разным схемам деформирования поперечного сечения заготовки (например, по схеме круг – овал – круг), чтобы в результате она приняла заданные размеры и форму по длине. Технология вальцовки достаточно сложна при разработке, так как требуется выбрать форму и количество переходов, подобрать форму заготовки постоянного сечения спроектировать профиль ковочных вальцов и т. д. Расчет системы калибров для технологического процесса вальцовки заготовок под штамповку деталей удлиненной формы является сложной и трудоемкой задачей. Ее решение требует значительных затрат рабочего времени, что обусловлено наличием большого числа параметров, учитываемых при расчете и сложная пространственная геометрия калибров вальцовочных секторов. Обычно разработка такой технологии требует несколько этапов проектирования для доводки. Ряд расчетных методик технологического процесса вальцовки стальных заготовок описан в работах [109], алюминиевых – в работах [110; 111].

Разработка технологии вальцовки заготовок под штамповку включает в себя: конструирование чертежа вальцованной заготовки; определение параметров исходной заготовки; определение числа переходов и выбор системы калибров; расчет поперечных и продольных размеров калибров вальцовочных секторов по переходам; проектирование вальцовочных секторов; выбор термомеханических режимов для вальцовки заготовок конкретного сплава; выбор средств для моделирования технологического процесса вальцовки.

CAD-системы не предоставляют пользователю встроенные возможности для выполнения расчетов в различных прикладных областях, но позволяют подключать внешние модули на основе использования API-интерфейса.

Рассмотрим проектирование технологического процесса вальцовки заготовок с использованием CAD/CAE-систем, поскольку он позволяет оценить изменение формы заготовки в процессе пластического деформирования и правильность формы спроектированной технологической оснастки.

2.4.1 Разработка ИСАПР технологии и инструмента для вальцовки заготовок

Основными результатами использования данного программного обеспечения являются:

- повышение уровня автоматизации труда технологов и конструкторов;
- сокращение сроков технологической подготовки производства вследствие сокращения цикла проектирования технологических процессов;
- автоматизация проектирования заготовок и вальцовочных секторов в CAD-системе;
- повышение точности и качества вальцованных заготовок и вальцовочных секторов.

Для достижения этих результатов выполнено: создание ИСАПР процесса вальцовки на основе автоматизации расчетов с последующим проектированием исходной заготовки вальцовочных калибров в САД-системе, определение влияния геометрических параметров калибра и формы исходной заготовки на ее деформирование [112], а также обеспечение проектирования в разных САД-системах при построении сложнопрофильных инструментов [113; 114].

Применение внешнего программного модуля позволяет рассчитать технологический процесс получения детали по методике, основанной на эмпирических правилах, выдержать логику процесса проектирования заготовок и инструмента. Процесс расчета исходной заготовки и вальцовочных калибров для ее деформирования является трудоемкой задачей, поскольку на данный момент отсутствуют алгоритмы расчета некоторых технологических параметров. Применение САД-системы позволяет построить объемные модели готовой поковки и заготовок по переходам вальцовки, выполнить их динамическое сечение вдоль продольной оси и рассчитать площади этих сечений. Кроме того, с помощью САД-системы строятся параметрические модели вальцовочных секторов, размеры которых определяются в модуле проектирования технологии вальцовки. Применение САЕ-системы позволяет изучить процесс деформирования заготовки в вальцовочных калибрах с учетом реальных показателей сопротивления деформации и распределения температуры в заготовке и инструменте. Одновременно с повышением производительности труда конструктора и технолога повышается точность расчета заготовки и технологической оснастки, что является актуальной проблемой [112].

ИСАПР технологического процесса вальцовки выполняет также следующие задачи (рис. 2.49): получение данных о штампованной поковке из САД-системы, построение эпюр, эскизов поперечных сечений и диаметров, определение числа переходных участков, выбор и проведение расчета системы калибров. Все зависимости, по которым технологи ведут расчет технологического процесса вальцовки, представлены в виде уравнений, полученных с помощью методов аппроксимации экспериментальных и эмпирических зависимостей.

Таким образом, в рамках одного программно-методического комплекса осуществляется процесс сквозного проектирования параметров технологического процесса вальцовки с возможностью построения трёхмерных моделей заготовок и вальцовочных секторов в САД-системе с моделированием в конечноэлементной системе (QForm) и последующим моделированием технологического процесса обработки вальцовочных калибров с помощью САМ-системы. Использование ИСАПР позволяет не только сократить цикл проведения проектных работ, но и корректировать существующие методики расчета технологического процесса вальцовки с целью получения более качественных результатов проектирования.

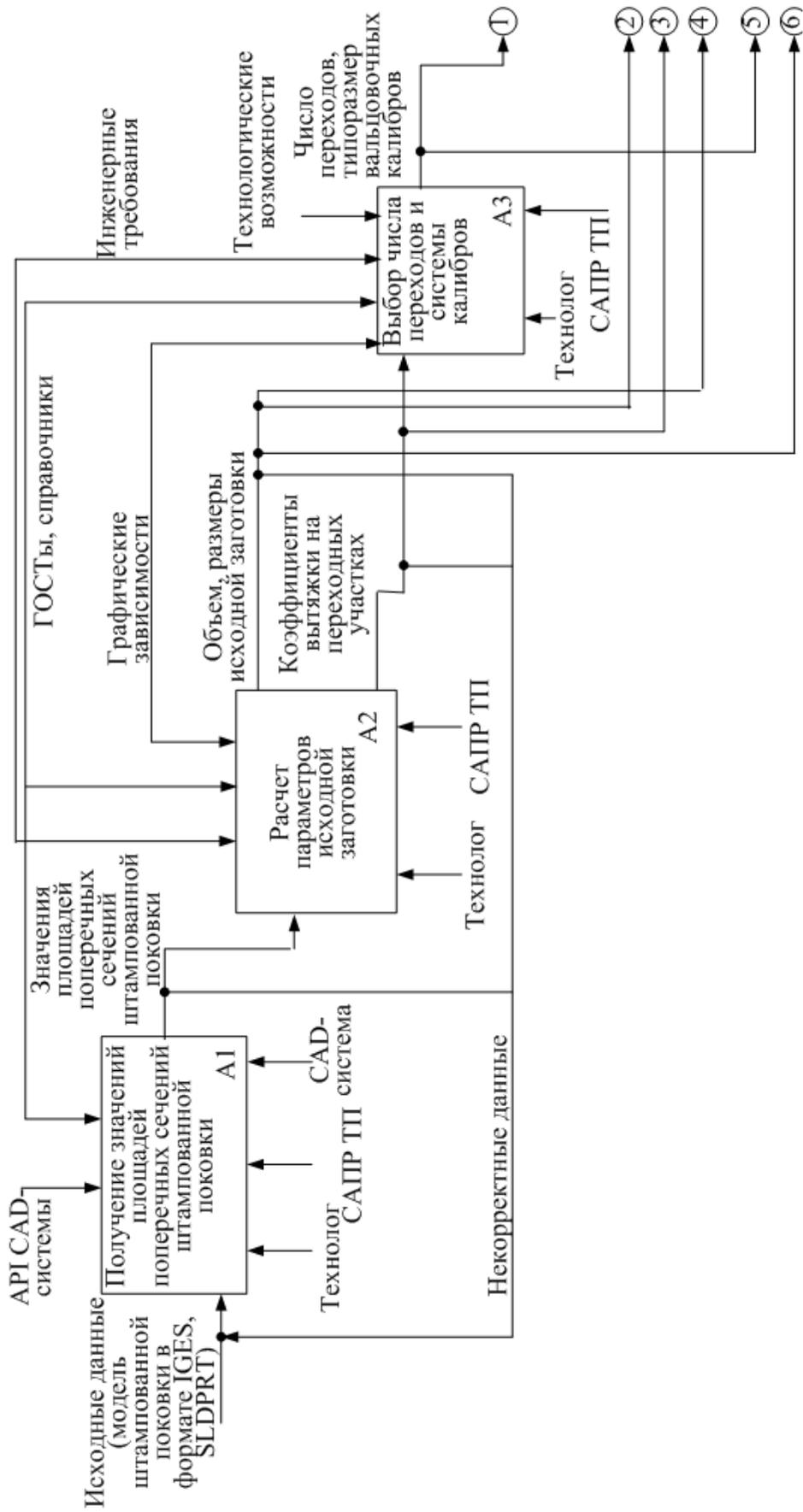


Рисунок 2.49 – Структурно-функциональная диаграмма автоматизированного проектирования технологического процесса вальцовки

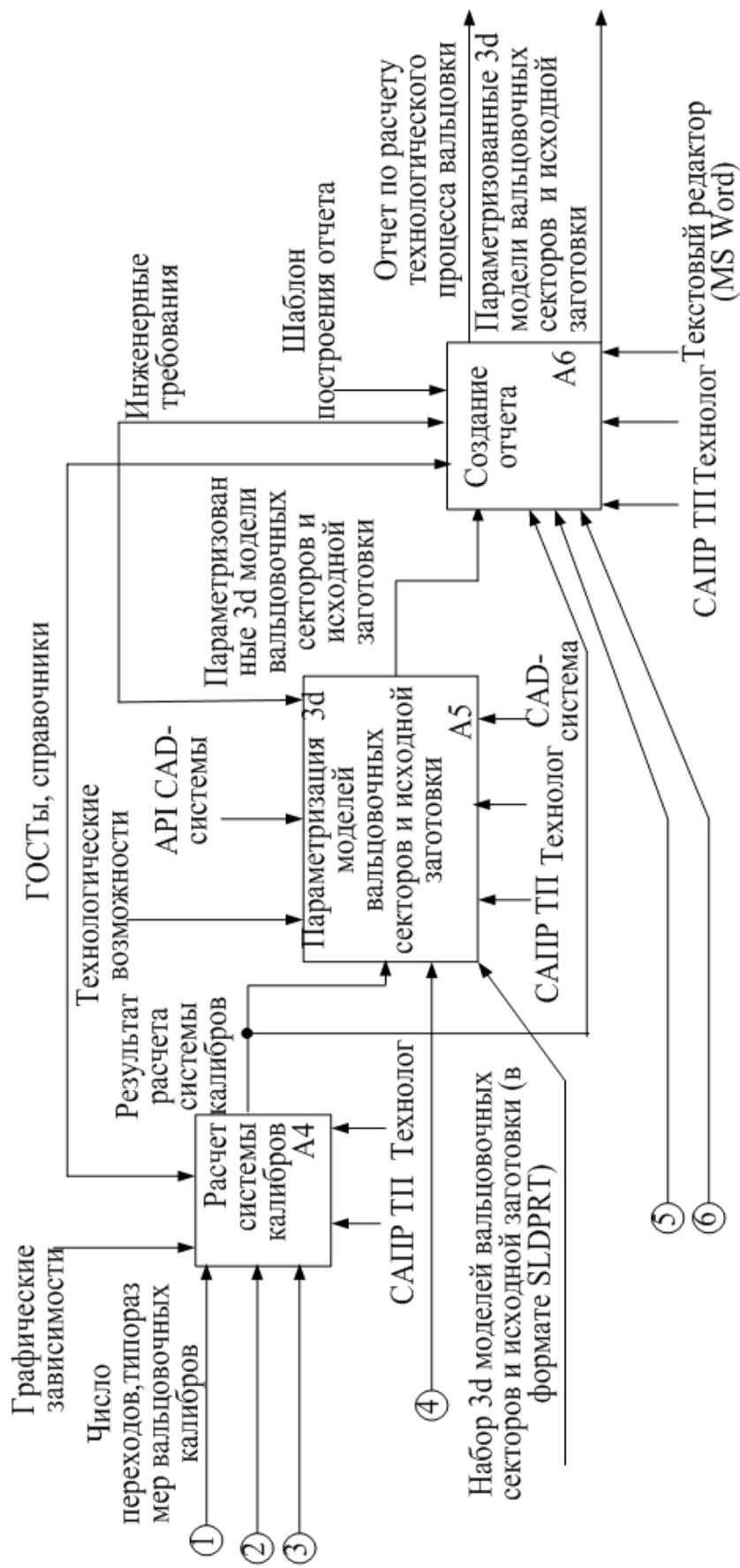


Рисунок 2.49, лист 2

Рассмотрим процесс моделирования технологического процесса вальцовки в ИСАПР. На рисунке 2.50 представлена штампованная поковка после подготовительного ручья. Расчет профиля поверхности вальцовочных секторов – трудоемкая задача, требующая неоднократного пересчета, так как заготовка при деформировании изменяет свою форму и по длине, и по сечению. Достижение оптимального варианта, при котором на каждом переходе задана максимально допустимая вытяжка, требует циклического расчета по сечениям заготовки и переходам вальцовки.

Для реализации автоматизированного проектирования технологического процесса вальцовки и оснастки (вальцовочных секторов) разработана программная система «Вальцовка» [112]. Это специализированное инструментальное средство, обеспечивающее выполнение задач по расчету размеров заготовки и расчету калибров для переходов вальцовки. Данные о 3D-модели поковки получаются из САД-системы с использованием API-функций. После выполнения расчетов в САД-системе создаются 3D-модели вальцовочных секторов с целью генерации программ обработки ручьев на станках с ЧПУ в среде PowerMILL. Используем для расчетов ПС «Вальцовка», затем проверим результат проектирования процесса путем моделирования течения металла в ПС QForm.

Разработаем технологический процесс вальцовки для поковки «Рычаг» (см. рис. 2.50), которая изготавливается последующей штамповкой. Для этого необходимо: рассчитать эпюры сечений и диаметров по длине этой детали, выбрать заготовку, рассчитать переходы вальцовки и инструмент – вальцовочные калибры.

В качестве исходных данных для расчета технологического процесса вальцовки технологу необходимо наличие 3D-модели штампованной поковки в формате САД-системы или универсальном, например, IGES и набор 3D-параметрических моделей вальцовочных секторов. С помощью известной методики осуществляется автоматизированный расчет технологического процесса вальцовки. Ограничения при автоматизированном проектировании накладывают API САД-системы, в которой производится получение значений площадей поперечных сечений штампованной поковки и параметризация 3D-моделей вальцовочных секторов, инженерные требования к процессу и технологические возможности оборудования [109].

На первом этапе проектирования технологу необходимо получить значения площадей поперечных сечений штампованной поковки с помощью САД-системы. При этом ПС интегрируется с ней для получения данных с помощью функций API. После построения модели изделия в САД-системе автоматически производится ее разбиение по длине на заданные малые участки с определением площадей их поперечных сечений и построением эпюр сечений и диаметров. Шаг по длине выбирается адаптивно, в зависимости от изменения сечения. Данная функциональность реализована в SolidWorks.

После получения этих значений выполняется расчет параметров исходной заготовки, при этом часть информации задается технологом в диалоговом режиме. На основании полученных данных рассчитываются

эпюры, эскизы сечений и диаметров детали, затем эпюры и эскизы сечений и диаметров штампованной поковки с учетом облоя и усадки. После выбора ряда характерных сечений на эпюре диаметров происходит расчет основных параметров исходной заготовки: площади характерных сечений, объемы элементов между ними, объем всей заготовки с учетом облоя и усадки, коэффициенты вытяжки на переходных участках, длина и диаметр исходной заготовки. Расчеты основных параметров заготовок и процесса осуществляются с помощью эмпирически полученных зависимостей [115].

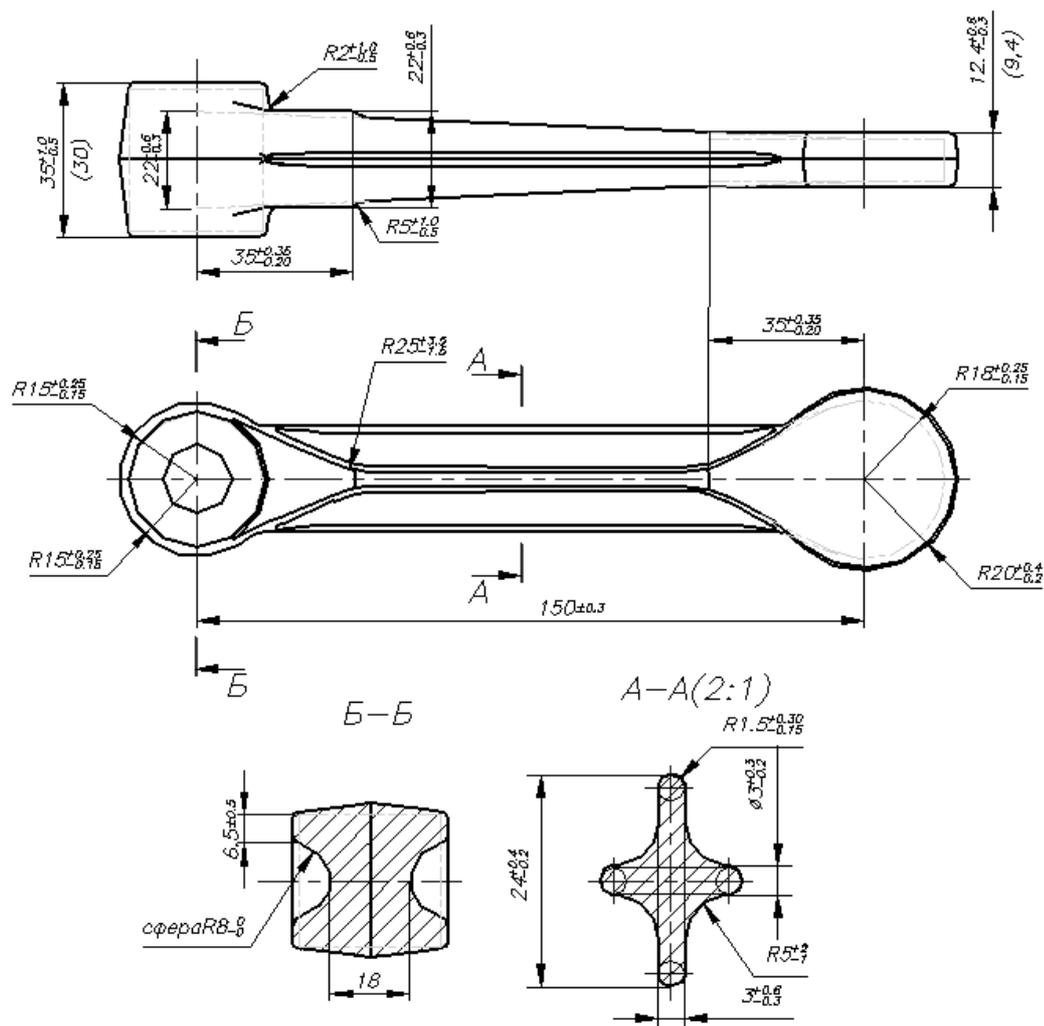


Рисунок 2.50 – Чертеж штампованной поковки «Рычаг»

На рисунке 2.51 представлен фрагмент расчета геометрии штампованной поковки путем определения площадей сечений средствами SolidWorks.

Проектирование формы заготовок по переходам и ручьев технологической оснастки (вальцовочных секторов) также осуществляется в ПС автоматизированного проектирования технологического процесса вальцовки.

После выполнения расчётов на экране строятся эпюры сечений и диаметров поковки, учитывается наличие облоя (отхода при штамповке), рассчитывается усадка металла при охлаждении и другие технологические параметры, корректируются эпюры в интерактивном режиме по желанию технолога с учетом ограничений технологического процесса (рис. 2.52).

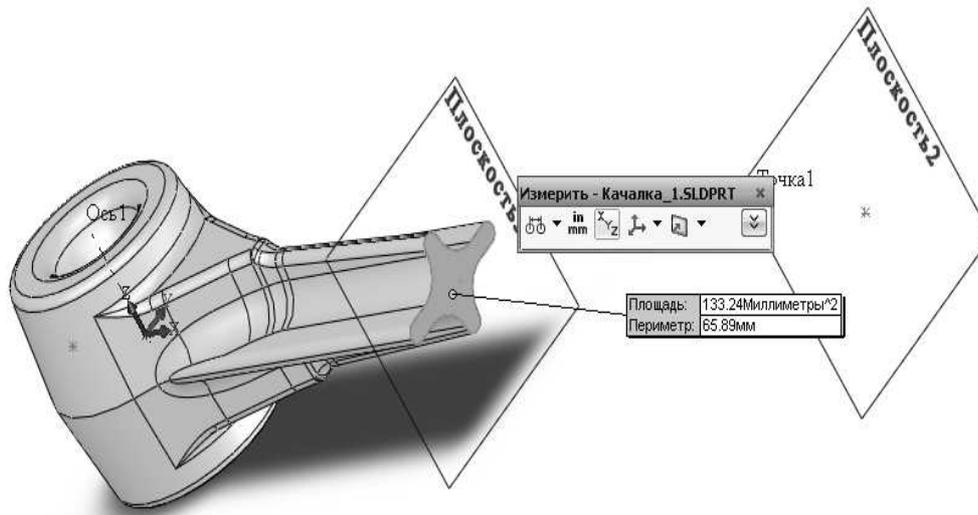


Рисунок 2.51 – Расчет площадей сечений штампованной поковки «Рычаг» средствами SolidWorks

На выходе технолог получает отчет по расчету технологического процесса вальцовки: эпюры, эскизы сечений и диаметров, различную документацию, 3D-модели заготовок и параметры вальцовочных секторов.

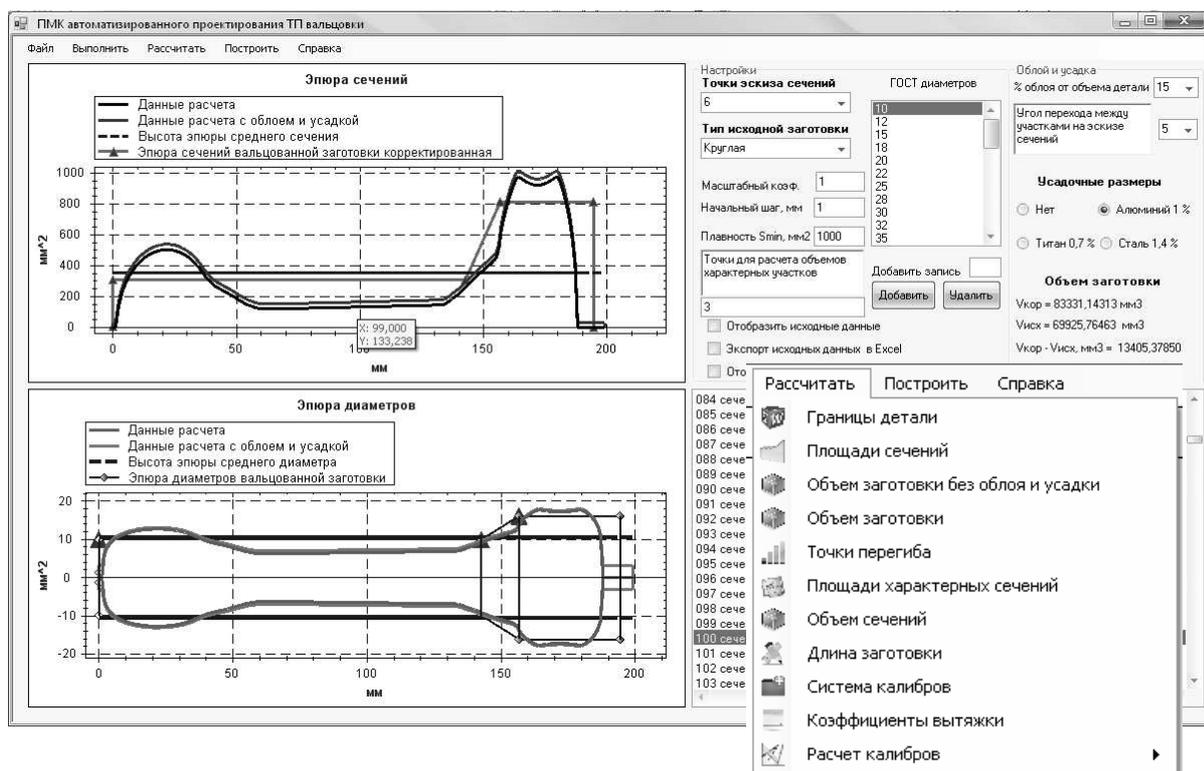


Рисунок 2.52 – Интерфейс ИСАПР «Вальцовка» для проектирования технологического процесса вальцовки

После расчетов площадей поперечных сечений поковки, объемов, эпюр диаметров, горячих размеров и др. (см. рис. 2.52), выполняется расчет переходов вальцовки заготовки и определяются сечения калибров.

Параметры, необходимые для выбора системы калибров изменяются согласно размерам, полученным в ходе проектирования заготовок. Выбор системы калибров осуществляется на основании рекомендаций, проверенных на практике, выбор числа переходов зависит от максимального коэффициента вытяжки, характера сечений исходной заготовки вдоль оси и формы сечения на выходе [109].

В данной работе принята схема деформирования заготовки «круг – овал – квадрат». Обычно технолог считает калибр по 4...10 сечениям, в работе расчет производился по 200 сечениям за счет автоматизации процесса, что повышает точность построения инструмента.

В результате расчета системы калибров (площади калибров, поперечные размеры калибров для характерных сечений, рабочие радиусы валков, уширение и опережение при вальцовке) определяются центральные углы участков вальцовочного штампа. Следующий этап – построение 3D-моделей исходной заготовки и вальцовочных секторов.

После построения геометрии параметрических 3D-моделей вальцовочных секторов и исходной заготовки происходит создание отчета.

Часто для изготовления изделия или технологической оснастки достаточно иметь только его поверхность, по которой может быть выполнена обработка на станках с ЧПУ и проведен контроль. Использование при моделировании поверхностей в ряде случаев позволяет быстрее и проще получить результат, особенно если форма изделия сложная.

Для проектирования вальцовочных секторов в CAD-системе была выбрана параметрическая модель сектора с овальной формой поперечного сечения. На рисунке 2.53 показана модель вальцовочного сектора, построенная по результатам расчётов в CAD-системе PowerSHAPE.

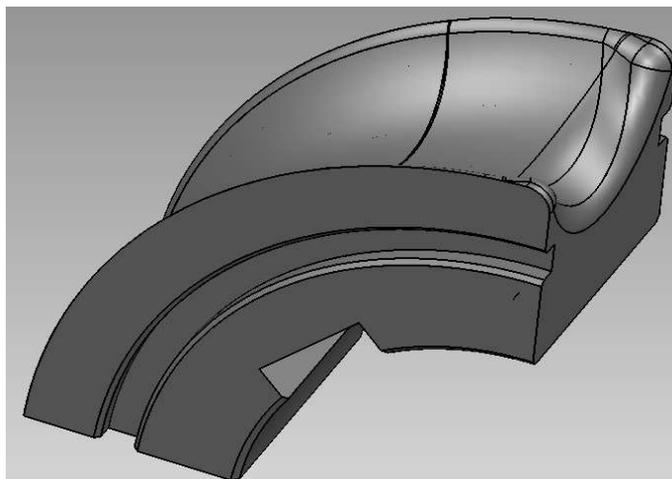
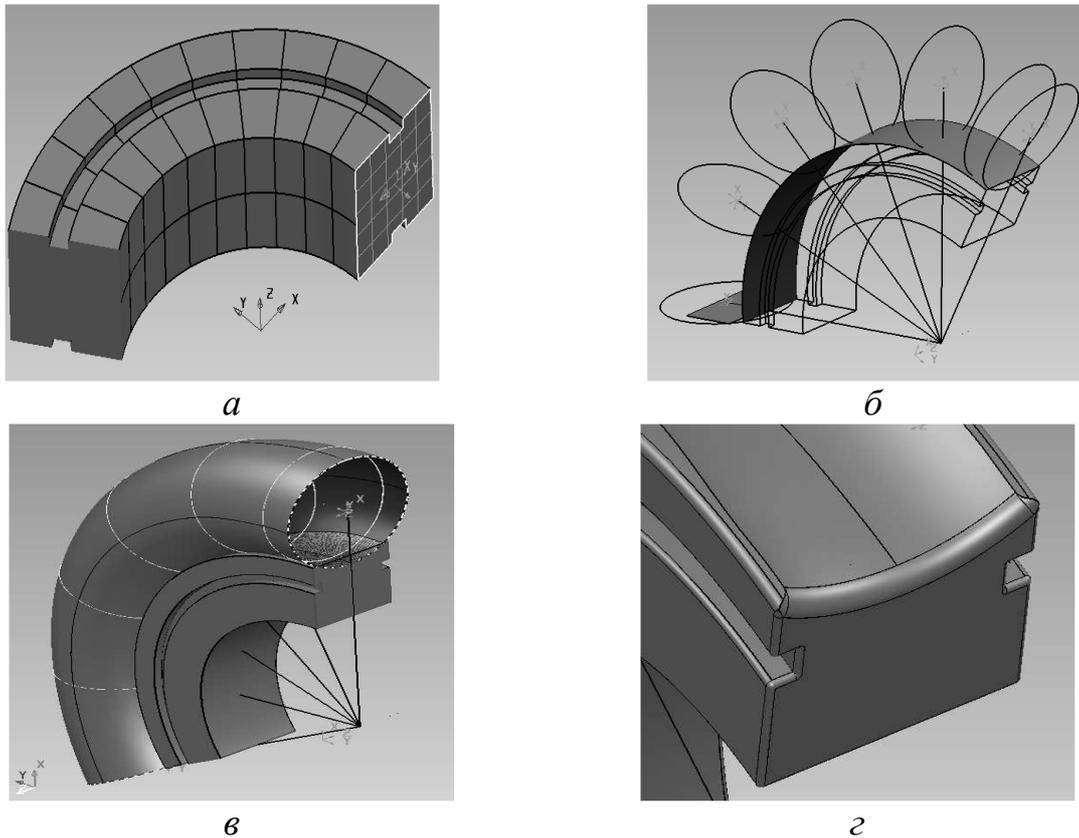


Рисунок 2.53 – Модель вальцовочного сектора первого перехода

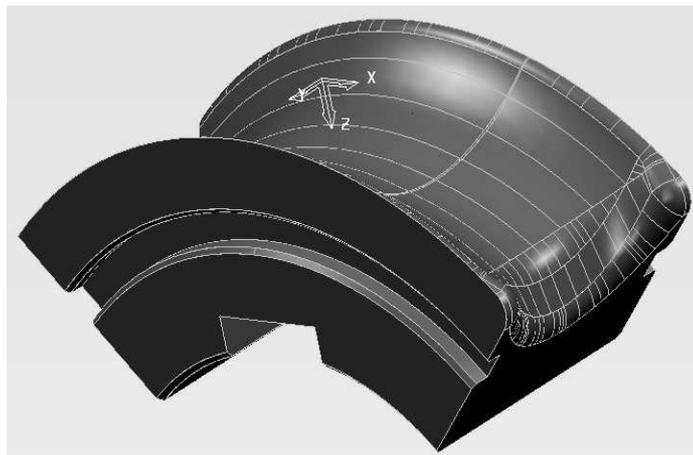
На рисунке 2.54 показан процесс построения калибра вальцовочного сектора путем вырезания ручья сложной поверхностью в PowerSHAPE.



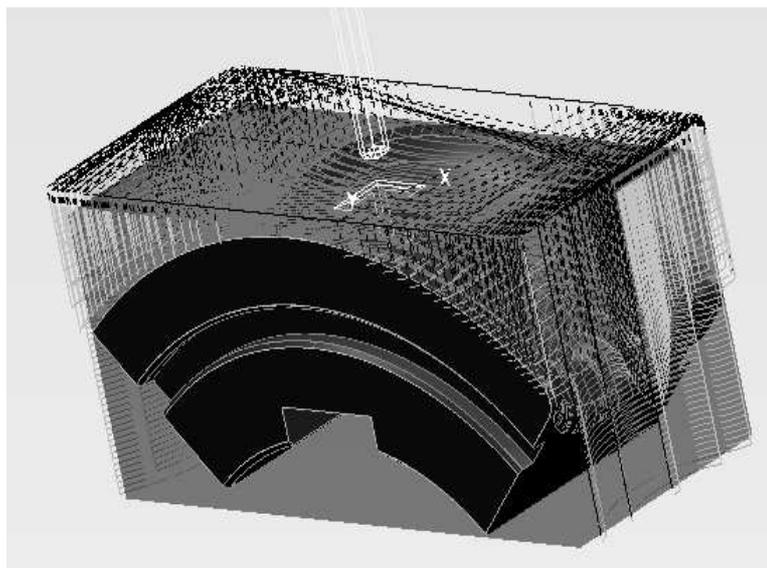
а – заготовка сектора; б, в – построение рабочей поверхности по сечениям; г – торцевая часть вальцовочного сектора
Рисунок 2.54 – Построение модели вальцовочного сектора в PowerSHAPE

2.4.2 Разработка технологии изготовления вальцовочного сектора в PowerMILL

Данная деталь не представляет особых трудностей для обработки, поэтому эта часть работы приведена для полноты описания технологического процесса. Для проектирования технологии изготовления рабочей поверхности вальцовочного сектора выполним необходимые этапы работы: импортируем геометрию инструмента из CAD-системы PowerSHAPE (рис. 2.55), задаем новую систему координат, учитывая габариты инструмента, создаем заготовку в виде блока, для черновой обработки используем сферическую фрезу D20, для создания траектории выбираем стратегию 3D обработки (выборка смещением, 3D-модель) и устанавливаем параметры обработки, задаем безопасные высоты и подводы инструмента, устанавливаем режимы резания (выполнено без привязки к станку). В результате траектория инструмента создаётся в САМ-системе PowerMILL. После этого выполняем проверку траектории на зарезы и столкновения (не обнаружены). Траектории инструмента с подводами показаны на рисунке 2.55.



a



б

a – модель вальцовочного сектора;

б – траектории инструмента при обработке (PowerMILL):

красным пунктиром отображаются быстрые ходы,

голубым цветом – подводы, зеленым цветом – рабочие ходы

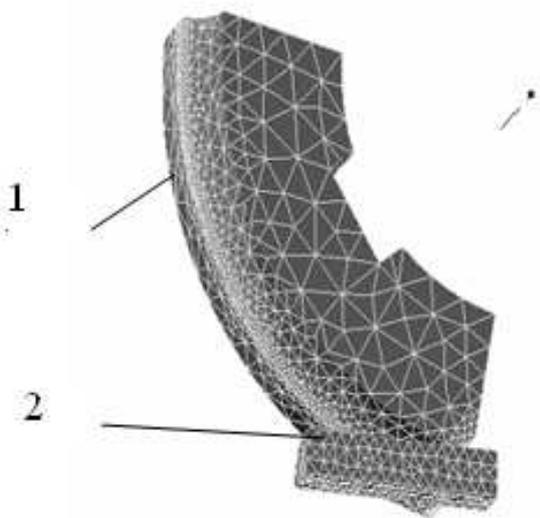
Рисунок 2.55 – Модель вальцовочного сектора, импортированная из CAD-системы PowerSHAPE в САМ-систему PowerMILL и траектории инструмента при моделировании процесса его обработки

2.4.3 Моделирование пластического деформирования заготовки вальцовочными секторами

При построении моделей инструментов для вальцовки заготовок под последующую штамповку одним из самых важных параметров, по которому можно оценить эффективность работы разработанной ИСАПР «Вальцовка», является точность расчета геометрии вальцованной заготовки и вальцовочных калибров.

Для моделирования процесса вальцовки по переходам и проверки разработанной геометрии заготовок и калибров использована программа конечноэлементного расчета QForm, которая позволяет «довести» технологию на компьютере без трудоемких экспериментов с металлом. QForm обеспечивает моделирование всех стадий вальцовки: анализ условий захвата заготовки вальцами, деформацию заготовки по переходам и кантовку между переходами. Программа может предсказывать возникновение таких дефектов как зажимы, незаполнение и невозможность получения формы. Кроме того, полученная после вальцовки заготовка может быть далее использована для моделирования объемной штамповки.

Для проведения экспериментов по моделированию процесса были взяты заготовки с размерами $\varnothing 35 \times 125$ мм для детали «Рычаг» (см. рис. 2.50). После построения в САД-системе импортировали геометрию калибров и заготовки в QForm в формате IGES или STEP. Полученная геометрия передается в модуль QShape, где выполняется редактирование геометрии, разбивка на конечные элементы, задание плоскостей симметрии и осей вращения. На рисунке 2.56 показана сборка вальцовочных секторов и исходной заготовки в QForm (с учётом симметрии показана половина верхнего валка и четверть заготовки) с разбивкой сетки для МКЭ анализа процесса вальцовки.



1 – половина верхнего валка, 2 – четверть заготовки

Рисунок 2.56 – Сборка вальцовочных секторов и исходной заготовки для моделирования процесса вальцовки круглой заготовки в QForm

Затем в мастере подготовки последовательно задаются: тип оборудования, скорость вращения вальцовочного сектора, материал заготовки, температура, смазка, угол поворота вальцовочного сектора и др. (рис. 2.57). QForm также позволяет при моделировании процесса деформирования заготовки в вальцах определить работу, выполняемую валками, и мощность при вальцовке заготовок.

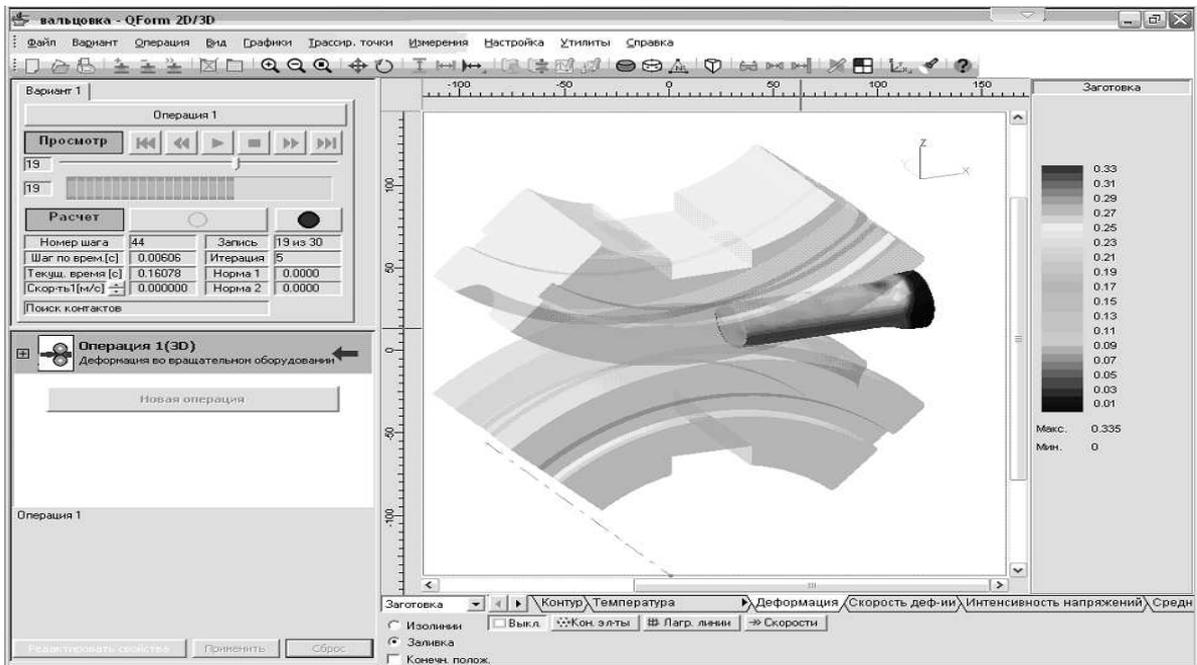
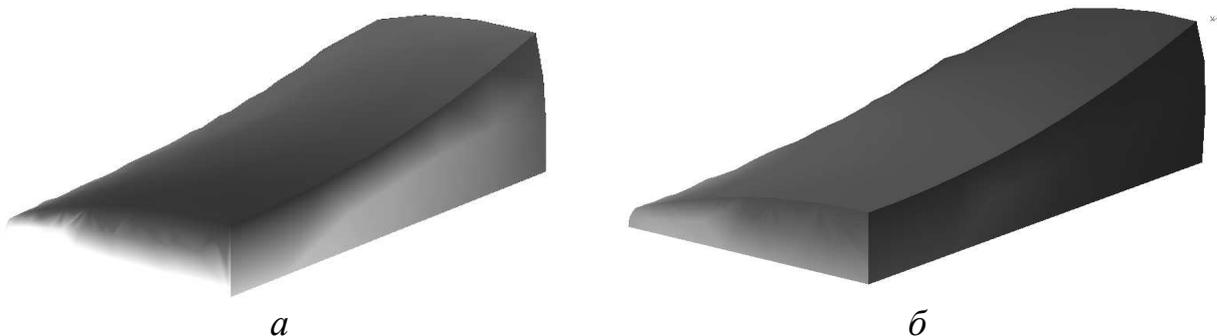


Рисунок 2.57 – Расчет деформирования заготовки в QForm

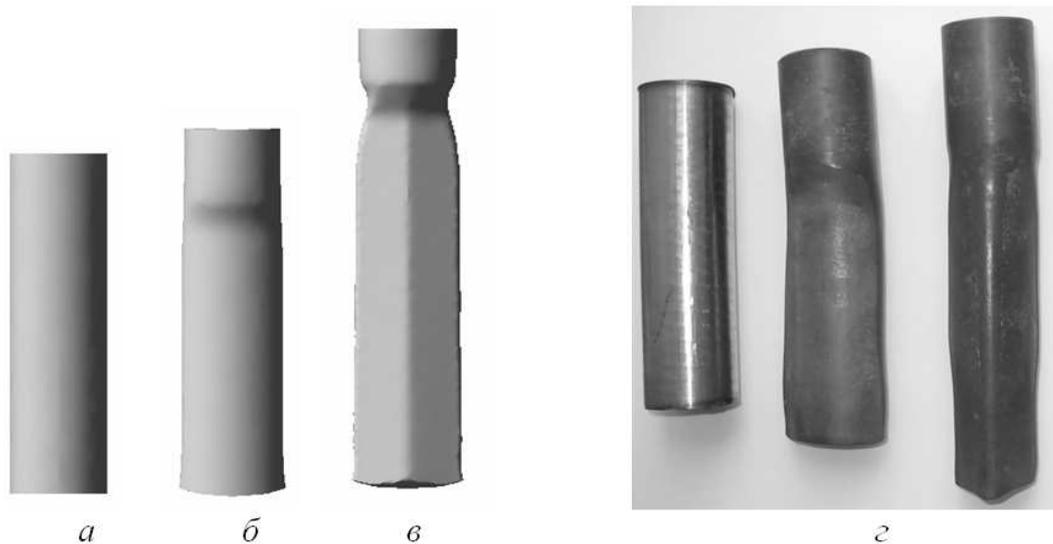
При окончательном моделировании вальцовки выполнили расчет процесса при различных температурах вальцовочных секторов (рис. 2.58). По рисунку 2.58 видно, что нагрев вальцовочных секторов до 350 °С приводит к более равномерному распределению температуры по сечению заготовки, что обуславливает снижение усилий, затрачиваемых на работу пластической деформации.



а – 20 °С; б – 350 °С

Рисунок 2.58 – Распределение температуры в заготовке в процессе вальцовки при различной температуре подогрева вальцовочных секторов (показана одна четверть заготовки)

Результаты моделирования в QForm вальцовки заготовок для поковки «Рычаг» по схеме «круг – овал – квадрат» представлены на рисунке 2.59 а, б, в. Для сравнения представлена фотография вальцованной заготовки (рис. 2.59, г).



*а – мерная заготовка;
 б – вальцованная заготовка первого перехода «круг – овал»;
 в – вальцованная заготовка второго перехода «овал – квадрат»;
 г – фотография вальцованных заготовок по переходам*
 Рисунок 2.59 – Результаты моделирования в программе QForm вальцовки заготовки по схеме «круг – овал – квадрат»

В процессе работы решены следующие задачи сквозного автоматизированного проектирования процесса вальцовки:

- изучена последовательность и методика проектирования технологического процесса вальцовки;
- выполнена разработка математической модели автоматизированного проектирования технологического процесса вальцовки и оснастки, с учетом влияния геометрических и температурных факторов;
- выполнена реализация алгоритмов расчета параметров вальцовки в виде ИСАПР технологического процесса и оснастки;
- выполнено построение параметрических 3D-моделей деталей, заготовок, сложнопрофильных инструментов (вальцовочных секторов) в САД-системах;
- реализовано построение сложных поверхностей инструментов в двух САД-системах с использованием встроенных математических алгоритмов аппроксимации сложных поверхностей;
- выполнено моделирование технологического процесса вальцовки в САЕ-системе (QForm), исследовано влияния температуры нагрева вальцовочных калибров на геометрические параметры заготовки и силовой режим пластической деформации. Импорт полученных в САД-системах моделей осуществлялся в формате IGES;
- выполнена разработка и моделирование технологического процесса механической обработки вальцовочных калибров с помощью САМ-системы.

Выводы по разделу 2

1 В целом автоматизированное проектирование и моделирование процессов обработки заготовок требует применения комплекса программного обеспечения для сквозного процесса проектирования технологии и инструмента. Использование современных пакетов программ для моделирования обработки металлов давлением позволяет исследовать изменение деформаций и напряжений в объеме заготовки, штамповой оснастке, а также распределение температуры в заготовке в процессе деформирования.

2 С помощью систем конечноэлементного моделирования можно анализировать процесс без физического моделирования, а на основании этих данных изменять габаритные размеры исходной заготовки, параметры инструмента, менять параметры обработки, например, увеличить температуру нагрева вальцовочных секторов.

3 В процессе выполнения расчётов с использованием МКЭ разработана конечноэлементная модель штамповой оснастки, которая позволяет выполнить анализ деформированного состояния конструктивных элементов штампа с учетом реальных условий его функционирования. В результате модернизации конструкции изменение межосевого расстояния направляющих колонок штампа под нагрузкой снизилось в 3,8 раза, что обеспечивает повышение точности штампуемых деталей и стойкости штамповой оснастки.

4 На основании разработанного алгоритма выполнена реализация программного обеспечения, интегрированного с системой конечноэлементного моделирования ABAQUS, в частности, разработан пользовательский модуль оценки степени использования ресурса пластичности, интегрированного в разрабатываемую САПР технологических процессов и штамповой оснастки.

5 Для интегрированных с CAE-системами САПР предложена онтология базовых понятий при конечноэлементном моделировании.

6 Применение разработанного алгоритма и программного обеспечения при моделировании процесса пробивки листовой заготовки с локальным профилированием бурта по периметру разделения позволило уточнить характер протекания данного технологического процесса, выявить различные случаи разделения заготовки, предложить новые технические решения.

7 Формализация проектирования технологического процесса вальцовки позволила сформулировать функциональные требования к специализированным ИСАПР как инструменту проектирования и моделирования для проведения исследований технологических процессов.

РАЗДЕЛ 3

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР

3.1 Анализ методов хранения и поиска конструктивных решений в САПР

С развитием вычислительной техники и компьютеризации промышленных объектов, постепенно практически все конструкторские бюро машиностроительных предприятий перешли от бумажного ведения разработок к использованию САПР и ведению электронных архивов, что стало возможным благодаря появлению на рынке программных продуктов для создания интегрированных систем конструкторско-технологической подготовки производства.

Такой переход принес ряд преимуществ, так как при работе с бумажными чертежами часто возникают организационные трудности. Иногда необходимо срочно предоставить копию необходимого чертежа по проекту десятилетней давности, либо использовать ранее накопленный опыт для разработки новых объектов. При этом возникают трудности с поиском местонахождения чертежа, что ведет к значительным затратам времени на ручной поиск, возможно, безрезультатный. На современном этапе, когда постоянно увеличиваются объемы работы, уменьшаются бюджеты и требуется мгновенный доступ к информации, бумажная система хранения данных негативно влияет на затраты и ход выполнения повседневных задач [13–15].

Затраты при использовании бумажных чертежей:

- 1) время, которое требуется для выполнения поиска;
- 2) дорогостоящие и неудобные хранилища для бумажных документов большого формата;
- 3) неэффективный способ распространения документов;
- 4) возможное повреждение копий и оригиналов чертежей;
- 5) неэффективные способы защиты документов от несанкционированного доступа.

Использование электронных архивов позволяет наполнять и поддерживать электронную модель изделия на протяжении всего жизненного цикла изделия, выполнять оперативный поиск нужного документа, используя один или несколько параметров поиска, при этом через несколько секунд документ уже будет открыт на компьютере. После этого документ легко открыть для редактирования (при наличии прав доступа), распечатать или переслать.

Можно выделить следующие преимущества использования электронных архивов:

- 1) различные варианты поиска обеспечивают оперативный доступ к необходимой информации;
- 2) удобный ввод и хранение крупноформатных чертежей;
- 3) защита бумажных оригиналов чертежей от износа и порчи;
- 4) комплексная система безопасности предупреждает несанкционированный доступ к данным;
- 5) совокупные выгоды от экономии времени, уменьшения издержек и улучшения доступа к данным, а также безопасности хранимых данных;
- 6) управление всем хранилищем документов с автоматизированного рабочего места;
- 7) упрощение пересмотра документов при помощи контроля версий;
- 8) уменьшение ручной обработки документов, и, следовательно, ошибок благодаря автоматизированному вводу документов.

Электронный архив позволяет управлять большим числом проектов, чертежей, спецификаций, пропусков и других документов более просто и эффективно. Таким образом, посредством внедрения электронного архива проектной и конструкторской документации решаются «бумажные» проблемы, например: исключаются ошибки и дорогостоящие способы копирования, решаются вопросы обеспечения совместного доступа к документам сотрудникам различных отделов, государственным учреждениям, расположенным в различных городах, общественностью [11; 12].

3.2 Повышение интеллектуальности САПР изделий машиностроения с использованием методов инженерии знаний

Повышение интеллектуальности информационных систем в различных предметных областях основано на использовании баз данных и знаний, а также методов искусственного интеллекта, методов инженерии знаний, других методов моделирования. При этом производится выделение этапов реализации бизнес-деятельности, их информационных связей, затем производится разработка моделей на каждом этапе работы, выделяются информационные потребности, обеспечивающие повышение эффективности деятельности на каждом рабочем месте [1; 2; 9; 18].

Проектирование программных продуктов для автоматизации деятельности в большинстве случаев основано на использовании объектно-ориентированного подхода (ООП) [16; 61; 62; 65]. ООП основан на выделении абстракций предметной области, которые являются основой формализации ее представления и моделирования. Выделяемые сущности являются характерными для автоматизируемой предметной области и могут быть представлены в виде онтологий.

Таким образом, онтологии, которые являются инструментами для представления знаний в различных предметных областях, позволяют создать основу для повторного использования знаний в ПС [116–120].

3.2.1 Объектно-ориентированный подход к построению модели предметной области проектирования изделий

Для моделирования предметной области проектирования изделий применим объектно-ориентированный подход, который основан на систематическом использовании моделей для языково-независимой разработки программного обеспечения.

Согласно объектно-ориентированному подходу под моделью предметной области понимается формальное описание, в котором выделены основные сущности, составляющие, характеризующие предметную область, и определены структурные отношения между этими сущностями, а также их поведение при совместной (кооперативной) работе для достижения заданной цели.

При объектно-ориентированном подходе моделирование и предметной области, и программной системы производится при помощи графического языка UML и совокупности диаграмм на его основе [121; 122].

Для полного анализа моделируемой предметной области ее представляют в виде трех взаимосвязанных моделей:

- 1) объектной модели, которая представляет статические, структурные аспекты;
- 2) динамической модели, которая описывает динамические связи в предметной области;
- 3) функциональной модели, в которой рассматривается взаимодействие элементов предметной области в процессе ее изменения [60; 61].

Следует отметить, что UML применяется не только для проектирования программных систем, но и для документирования онтологий.

Существует множество технических решений, которые изучены, проверены практикой, имеют формальные модели в виде методик проектирования и широко применяются в технике [18]. Их использование обеспечивает снижение рисков при создании новой техники, и таким образом они являются шаблонами проектирования в машиностроении [122–124]. Однако конструкторы применяют и новые технические решения, которые в ряде случаев более эффективны, чем типовые. Учитывая, что информация о проектах имеется в виде электронной модели, задачей автоматизированных систем проектирования может быть как идентификация известных конструктивных решений, так и поиск новых. Эти решения могут пополнять фонды существующих технических решений и играть роль шаблонов для новых задач проектирования.

3.2.2 Разработка общей структуры интеллектуальной интегрированной системы автоматизированного проектирования

В настоящее время ИСАПР активно развиваются на основе САД-систем для проектирования изделий. САД-система рассматривается как платформа интеграции, на которой основано специализированное программное обеспечение САПР. В состав таких интегрированных систем входит также электронный архив не только проектных данных, но и любой информации, имеющейся в электронном виде. Архив обеспечивает совместное использование данных, поиск необходимых ресурсов и в целом повышение производительности труда. САПР предоставляют и возможности коллективной работы над проектом с оперативным обменом данными и быстрым доступом ко всей проектной документации [1; 9; 125].

В частности, для САД SolidWorks разработана PDM-система SWR-PDM, которая обеспечивает организационную и информационную поддержку проектирования за счет управления всей проектной документацией, управления доступом, потоком заданий и всем жизненным циклом изделия. Таким образом, вокруг универсальных расчетных систем (CAE) и систем проектирования (CAD) формируется слой прикладных систем для различных технологических процессов.

Развитие прикладных систем идет медленнее, что связано с тем, что существующие решения частных задач для проектирования конкретных операций техпроцессов, оснастки, инструмента, которые имеют важное значение для их реализации, не позволяют сделать необходимые обобщения для последующего использования в САПР более общего назначения.

В данных условиях сложились два базовых подхода: создание универсальных систем, в которых функции управления выполняет оператор и создание локальных прикладных систем проектирования для конкретных технологических процессов или операций, имеющих ограниченную функциональность, но относительно высокую автоматизацию процесса.

Для развития САПР необходимо участие в процессе их создания специалистов в различных областях знаний, в частности, в специальных предметных областях (например, ОМД), которые предоставляют информационное обеспечение для САПР: модели обрабатываемых сред, определяющих поведение материалов в условиях применяемых технологических процессов, методики и алгоритмы проектирования и др. Специалисты в области информационных технологий обеспечивают эффективную разработку программного обеспечения для последующего использования в САПР.

Рассмотрим общую структуру интеллектуальной системы автоматизированного проектирования. В этом случае реализуется перспектива создания интеллектуальной ИСАПР, структурная схема которой приведена на рисунке 3.1 [24; 66].

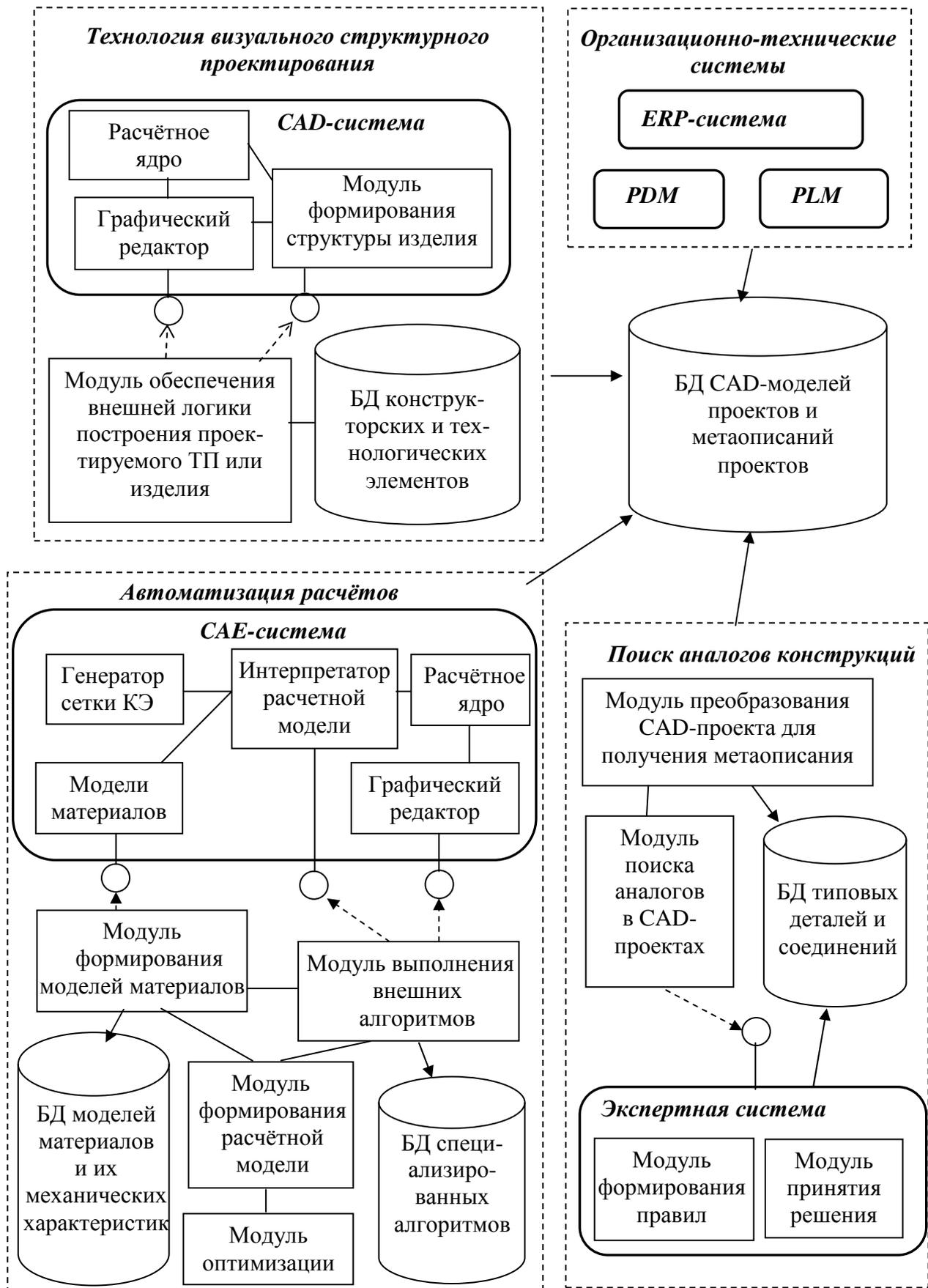


Рисунок 3.1 – Структура системы автоматизированного проектирования

Рассмотрим характеристики компонентов интеллектуальной САПР:

- технология визуального структурного проектирования (ВСП) для интеграции САПР с САД-системами [16; 24]. Данная технология обеспечивает повышение уровня абстракции при проектировании, когда проектировщик работает в основном с графическим интерфейсом, создавая схему конструкции и выбирая ее элементы из соответствующей базы данных с последующим автоматизированным построением в САД-системе;

- для интеграции и автоматизации решения задач в САЕ-системах требуется использование модулей ядра во внешних приложениях, например: использование встроенных графических редакторов для визуализации результатов внешних расчетов; использование внешних баз данных и знаний для интеллектуализации принятия решений в процессе расчета [94; 105]. Решаются вопросы реализации внешних циклов расчета для оптимизации;

- для расширения возможностей организационно-технических систем (PDM) ведется работа в области применения общесистемных методов проектирования, создания экспертных систем, интеллектуализации поиска аналогов в БД САД-проектов машиностроительных предприятий [132–135];

- для поиска информации в базах данных проектов исследуются возможности онтологического подхода к повышению релевантности поиска необходимых конструктивных решений-аналогов.

Таким образом, развитие ИСАПР в промышленности связано с формированием общей среды проектирования, обеспечивающей интеллектуальную поддержку работы конструкторов и технологов на основе формализации данных о проектируемых изделиях и технологиях. Форма представления данных должна обеспечивать их автоматизированную обработку, конвертацию, представление и поиск требуемых аналогов в базах данных САД-проектов, САЕ-моделей.

Рассмотрим вопросы повышения интеллектуальности САПР в заготовительном производстве, чтобы наиболее полно удовлетворять современным требованиям.

От специалистов в различных областях знаний, в том числе и в ОмД, требуется формализация информации в виде расчетных, геометрических моделей и их ограничений, алгоритмов, правил, соотношений параметров, классификационных графов, деревьев решений и в других формах, требуемых для формирования баз данных и знаний и последующего использования в ИСАПР.

В частности, для САЕ-систем особую роль имеет: интеграция с САД-системами и другими внешними прикладными ПС; поддержка моделей деформируемых сред, описание их механических свойств; динамическое (в процессе расчета) получение промежуточных результатов расчета, являющихся исходными данными для подключения внешних алгоритмов проектирования, например: определение степени использования ресурса пластичности; поэтапное моделирование комплексных технологических операций с эффективной передачей полученных в результате расчета распределений параметров НДС и других (температурных полей).

Из анализа приведенной схемы следует, что основными направлениями работы специалистов в области автоматизации машиностроения являются:

- информационное обеспечение процесса проектирования, заключающееся в разработке параметрических моделей типовых деталей и их элементов, типовых технологических операций и процессов, их математических моделей;

- разработка математических моделей с обобщением граничных условий, а также формализация правил их использования;

- классификация типовых операций, элементов конструкций, форм деталей и другой информации, а также правил их выбора, направленная на последующее использование в качестве баз знаний для систем автоматизированного проектирования;

- расширение использования общесистемных принципов, методов и моделей представления и обработки информации о проектируемой системе;

- расширение использования имитационного моделирования, методов оптимизации и автоматизированного принятия проектных решений.

В ряде названных направлений ведется научно-исследовательская работа на кафедре КИТ ДГМА по созданию компонентов интеллектуальной САПР:

- разработана технология визуального структурного проектирования (ВСП) для интеграции САПР с САД-системами. Данная технология обеспечивает повышение уровня абстракции при проектировании, когда проектировщик работает в основном с графическим интерфейсом, создавая схему конструкции и выбирая ее элементы из соответствующей базы данных с последующим автоматизированным построением в САД-системе [54; 58; 64];

- для интеграции и автоматизации решения задач в САЕ-системах освоено использование модулей ядра во внешних приложениях, например: использование встроенных графических редакторов для визуализации результатов внешних расчетов; использование внешних баз данных и знаний для интеллектуализации принятия решений в процессе расчета [85]. Решаются вопросы реализации внешних циклов расчета для оптимизации;

- для расширения возможностей организационно-технических систем (PDM) ведется работа в области применения общесистемных методов проектирования, моделирования процессов оперативного планирования, создания экспертных систем, интеллектуализации поиска аналогов в БД САД-проектов машиностроительных предприятий [91; 128–133].

3.2.3 Структура интеллектуальной системы автоматизации проектирования в заготовительном производстве

Корпоративные ERP-системы, PDM-системы оперируют такими общими понятиями как документ, ресурс и др. и не требуют постоянного участия в разработке специалистов в конкретных технических областях, поэтому ограничимся рассмотрением только систем автоматизированного проектирования на примере заготовительного производства.

Разработка и эксплуатация изделий происходит в рамках этапов их жизненного цикла, каждый из которых требует различных средств автоматизации деятельности и ее информационной поддержки.

В области КТПП заготовительного производства также сформировался комплекс программных продуктов, направленных на автоматизацию проектирования ТП, оснастки, оборудования. Совокупность используемых для этого программных систем автоматизированного проектирования давно уже вышла за пределы функциональности, характеризуемой термином САПР. В настоящее время стандартный набор средств проектирования составляют CAD/CAM/CAE/PDM-системы, обеспечивающие необходимые технологичности и конструктору функции автоматизации их деятельности [21; 22].

Проблемой для универсальных CAD, CAE и др. систем является сложность интеграции, ограниченность программного интерфейса (API) для доступа к функциональности этих систем, неполная поддержка стандартизованных форматов обмена данными. В настоящее время наблюдается определенный разрыв между возможностями универсальных систем для расчета с применением метода конечных элементов (МКЭ) и потребностями в прикладных областях.

Недостатком существующих CAE-систем при использовании в области ОМД является сложность поэтапного моделирования процессов деформирования заготовок, при котором происходит изменение граничных условий и вида напряжения. При этом на уровне модели материала не контролируется достижение заданного состояния, при котором необходимо, например, остановить процесс моделирования или перейти к следующему этапу расчета с сохранением истории деформирования.

Рассмотрим пример расчета совмещенного технологического процесса вырубки – вытяжки – пробивки листовой детали. В процессе поэтапного деформирования заготовка меняет свое состояние: форму, размеры, меняются также механические характеристики материала заготовки.

Последовательные состояния заготовки в процессе деформирования можно графически представить с использованием диаграммы состояний [121], которая отражает поведение системы в процессе ее функционирования. Диаграмма является графом, который содержит узлы – состояния и связи – дуги, отражающие возможные переходы между состояниями. К переходам между состояниями «привязаны» условия переходов и действия при переходах. Интересно, что термин «переходы» на диаграмме состояний имеет противоположное значение относительно переходов (операций) штамповки, которые являются состояниями (узлами) диаграммы. В данном

случае рассматриваем состояния заготовки в процессе ее формоизменения. Пример диаграммы состояний (рис. 3.2) наглядно отражает последовательность операций и логику (условия) переходов между ними в зависимости от условий совмещенного технологического процесса вырубki – вытяжки – пробивки листовой детали.

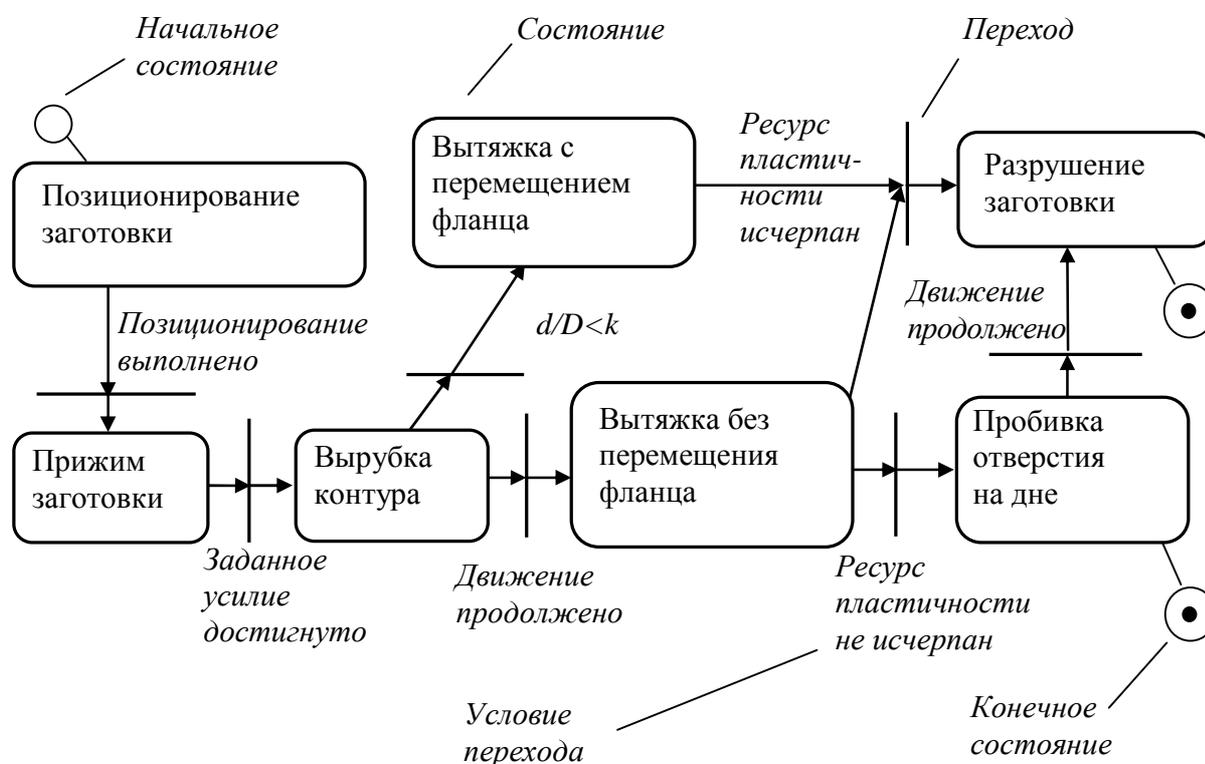


Рисунок 3.2 – Диаграмма состояний модели расчета совмещенного технологического процесса вырубki – вытяжки – пробивки листовой детали с учетом вариативности условий деформирования

Комплексная модель расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) детали в данном случае должна учитывать:

- влияние схемы приложения усилия прижима (наличие перетяжного порога, ребра и т. д.);
- наличие силы трения детали об инструмент;
- осуществлять контроль степени исчерпания ресурса пластичности;
- обеспечивать поддержку одновременного расчёта процесса получения нескольких деталей (или нескольких операций) с разными граничными условиями.

Для этого необходимо реализовать внешние (по отношению к решению конкретной задачи с помощью CAE-системы) процедуры изменения граничных условий в процессе расчета, аппроксимации полученных полей параметров НДС, переразбиение на элементы полученных деталей с сохранением накопленных деформаций при их разделении на несколько частей, построение полей всех полученных параметров.

Существующие САЕ-системы поддерживают только часть функций необходимых для полного решения задач проектирования, что недостаточно для построения многофункциональной САПР.

В частности, отсутствуют высокоуровневые средства задания условий моделирования в случае последовательной смены состояний деформируемой заготовки (см. рис. 3.2). Практически отсутствуют возможности моделирования разделительных операций ОМД, когда происходит нарушение сплошности материала. В случае необходимости последующего моделирования деформации полученных разделением деталей невозможно сохранить полученную сетку и параметры НДС деталей после разделения, т. к. не поддерживается такой режим работы. Отсюда сложность расчета совмещенных операций разделения и последующего формоизменения. Аналогичная схема расчета и проблемы имеют место и при моделировании процесса последовательной штамповки деталей с чередованием разделительных и формообразующих операций.

Выводы по разделу 3

1 В целом совершенствование информационного обеспечения САПР в различных предметных областях основано на использовании электронных моделей проектируемых изделий, электронных архивов проектов и документов, построения на их основе электронного документооборота, развития систем поиска необходимой информации об имеющихся конструктивных решениях.

2 Повышение интеллектуальности информационных систем основано на использовании баз данных и знаний, а также методов искусственного интеллекта, методов инженерии знаний, других методов моделирования бизнес-процессов, которые автоматизируются.

3 Онтологии, которые являются инструментами для представления знаний в различных предметных областях, позволяют создать основу для повторного использования знаний в программных системах. Онтологии позволяют формализовать метаописание различных объектов и обеспечить релевантный поиск требуемой информации, что в целом позволит производить более эффективную обработку информации.

4 Проектирование программных продуктов для автоматизации деятельности в большинстве случаев основано на использовании объектно-ориентированного подхода. Выделяемые в процессе анализа предметной области сущности могут быть представлены в виде онтологий, которые таким образом становятся информационной основой при разработке ООПС.

5 На основе анализа выделены проблемы и направления работы специалистов в области автоматизации машиностроения, предложена структура и компоненты интеллектуальной САПР, их характеристики и технологии реализации, рассмотренные в следующих разделах.

РАЗДЕЛ 4

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА

4.1 Информационное обеспечение проектирования и поиска аналогов изделий в САД-системах

Машиностроение является одной из базовых отраслей мировой экономики, его развитие стимулирует развитие таких отраслей производства, как: топливно-энергетическая, транспортная, строительная и ряд других, а следовательно эта отрасль постоянно прогрессирует, в ее рамках постоянно разрабатываются и внедряются новые изделия [17; 136].

Проектирование новых конструктивных решений, более эффективных и современных, чем существующие, является важным элементом развития любой организации, связанной с машиностроением. Нередко такие решения являются модернизацией существующих моделей с учетом недостатков, выявленных в ходе эксплуатации изделий. Таким образом, прежде чем проектировать новое изделие, целесообразно провести анализ предшествующих проектов, чтобы учесть недостатки, а также получить возможность изучить опыт практического применения того или иного прототипа (аналога) конструкции или технологии.

Выполнение процесса проектирования нового изделия, призванного решать поставленные задачи, начинается при подаче заявки в конструкторское подразделение (см. подразд. 1.3).

В существующей на большинстве машиностроительных предприятий системе технической подготовки производства (ТПП) в качестве исходной для анализа информации имеются проекты, созданные в САД-системах, спецификации, разработанные технологические карты обработки деталей и сборки изделия, в ряде случаев программы для станков с ЧПУ.

При использовании автоматизированного проектирования новых изделий машиностроения в базе данных постоянно накапливается значительный объем информации о спроектированных ранее изделиях. Эту информацию можно и целесообразно использовать в качестве аналогов для проектирования новых изделий и их узлов, учитывая все преимущества и недостатки старых. На предприятиях, где осуществляется ручной поиск аналогов, сам процесс поиска является трудоёмким, занимает большой объем времени и предрасположен к большому количеству ошибок вследствие низкой релевантности ручного поиска. Автоматизация данного процесса позволит улучшить качество поиска, снизится его продолжительность, а следовательно, увеличится эффективность проектирования и работы конструктора [132–135; 138]. Совершенствование информационного обеспечения проектирования связано с развитием автоматизированных архивов

CAD-проектов и другой документации. Главным недостатком данного подхода является необходимость использования CAD-системы, например, SolidWorks, для работы с архивом проектов.

Выполним функциональную декомпозицию предметной области «Проектирование изделий» и покажем место разрабатываемой информационной системы в процессе проектирования изделий. Детализирующая SADT-диаграмма активности «Проектирование изделий» приведена на рисунке 4.1. Спецификация подпроцессов активности «Проектирование изделий» приведена в таблице 4.1.

На входе в систему подаются внешние потоки данных: «Запрос на проектирование изделия» и «Исходные данные». Они несут исходную информацию для начала процесса «Проектирование изделия», в частности, для разработки технического задания. На выходе системы получают внешние потоки данных: «CAD-проект изделия» и «Техническая документация в электронном виде». Проект изделия вместе с сопровождающей документацией хранится в электронном архиве в виде CAD-проекта. В процессе проектирования ряд функций выполняются автоматизированными системами расчёта (CAE-система) и организации управления данными в процессе проектирования (PDM-система) [137–140].

Накопленная в информационных системах информация требует автоматизации обработки с целью поиска нужных данных. Качество поиска не всегда удовлетворяет заказчика. Это связано с тем, что поиск осуществляется в основном по ключевым словам, а чтобы корректно задать условия поиска в объёмах слабо структурированной информации требуются дополнительные затраты времени и опыт использования поисковых систем.

Обычно необходимо несколько попыток, чтобы сформулировать результативный запрос. Отсюда следует актуальность решения задач поиска информации и развития методов поиска данных в структурированной и неструктурированной информации. В настоящее время используется как полное предварительное структурирование данных в базах данных (БД) на основе реляционной, объектной или другой моделей, так и применение различных методов классификации исходных данных со структурированным хранением метаинформации [141; 142]. Примерами такого подхода могут служить системы электронного документооборота, где данные о документах хранятся в электронных карточках, которые служат основой для поиска необходимого документа, причём содержание документа при поиске в большинстве случаев не анализируется. Для облегчения поиска деталей в машиностроении разработаны принципы классификации деталей на основе их геометрической формы [11; 136]. Метаинформация в этом случае сохраняется в чертеже и спецификации.

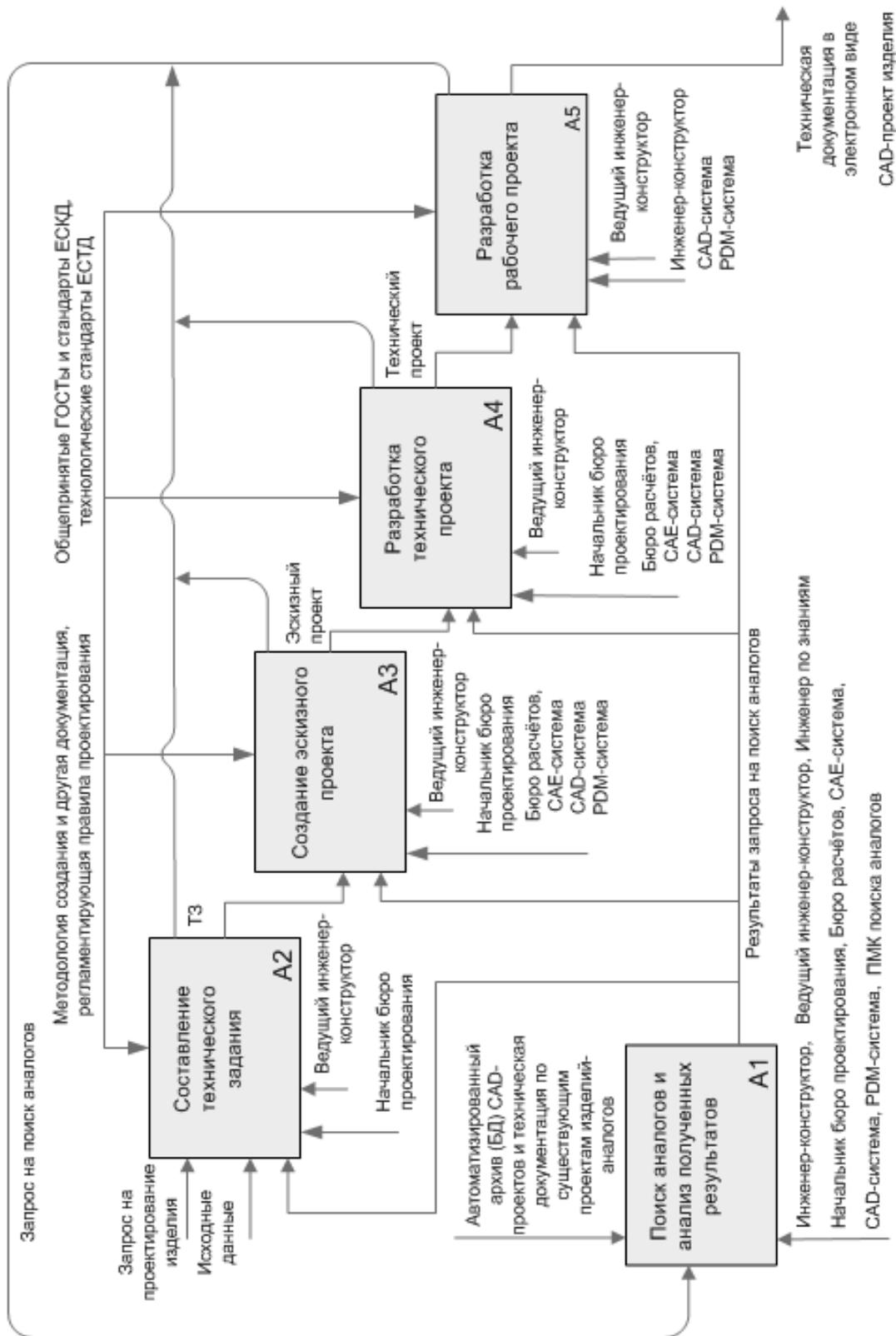


Рисунок 4.1 – Детализирующая диаграмма процесса «Проектирование изделий»

Таблица 4.1 – Описание подпроцессов активности «Проектирование изделий» (рис. 4.1)

№	Наименование операции (активности)	Управление активностью		Входы	Выходы	Исполнитель
		Условие начала	Чем регламентируется, завершается			
1	Поиск аналогов и анализ полученных результатов	–	БД САД-проектов и техническая документация по существующим проектам изделий-аналогов	Запрос на поиск аналогов	Результаты запроса на поиск аналогов	Инженеры: конструктор, по знаниям, ведущий конструктор, начальник бюро проектирования, бюро расчётов, САЕ-система, САД-система, PDM-система, ПМК поиска аналогов
2	Составление технического задания	–	Методология создания и другая документация, регламентирующая правила проектирования;	Запрос на проектирование изделия, исходные данные	Техническое задание	ведущий инженер-конструктор, начальник бюро проектирования
3	Создание эскизного проекта	Составлено ТЗ	регламентирующая правила проектирования;	Техническое задание	Эскизный проект	Ведущий инженер-конструктор, начальник бюро проектирования Бюро расчётов, САЕ-система, САД-система, PDM-система
4	Разработка технического проекта	Составлен эскизный проект	Общепринятые ГОСТы и стандарты ЕСКД; технологические стандарты ЕСТД	Эскизный проект	Технический проект	Ведущий инженер-конструктор, Начальник бюро проектирования, бюро расчётов, САЕ-система, САД-система, PDM-система
5	Разработка рабочего проекта	Составлен ТП		Технический проект	Техническая документация, САД-проект	Ведущий инженер-конструктор, Инженер-конструктор, САД-система, PDM-система

Автоматизированный поиск информации об аналогах конструктивных решений в корпоративной базе данных машиностроительного предприятия может занимать время, соизмеримое с разработкой нового узла или детали. Эта задача делает актуальным совершенствование методов структурирования и поиска такой информации в базах проектов изделий. Кроме того, поиск аналогов конструктивных решений без применения автоматизированных средств требует доступа конструкторов ко всей накопленной информации по проектам, что не отвечает требованиям безопасности.

В данной работе разрабатывается методика эффективного поиска необходимой информации о существующих проектах в конструкторско-технологических базах машиностроительных предприятий, что связано с анализом большого количества проектов изделий, выполненных в САД-системах. Количество деталей в проекте может достигать порядка нескольких тысяч и более в отдельных случаях. Целью поиска аналогов может быть стандартизация отдельных узлов, нахождение оригинальных технических решений, использование опыта конструкторов и технологов для учебы.

Информация о модели сборки изделия в современных САД-системах описывается в виде дерева, хранящего данные об элементах сборки и связях между ними. Поэтому задача поиска конструктивных аналогов в базах моделей типовых изделий (гидроцилиндров, штампов, редукторов, станочных приспособлений и т. п.) может быть поставлена следующим образом [133–135].

Для заданного эталонного графа $G_e(N_e, R_e)$ (где N_e и R_e – множества узлов и связей соответственно) в графах, имеющихся в базе проектов $G(N, R)$, найти подграф $G_s(N_s, R_s)$, для которого пересечения множеств вершин $N_o = N_e \cap N_s$ и ребер $R_o = R_e \cap R_s$ являются непустыми, а их мощности $M(N_o)$ и $M(R_o)$ отличаются от мощностей множеств $M(N_e)$ и $M(R_e)$ элементов эталонного графа на определенные величины $e_N \leq |M(N_o) - M(N_e)|$ и $e_R \leq |M(R_o) - M(R_e)|$, которые характеризуют степень несоответствия графов.

Алгоритм поиска аналогов (рис. 4.2) зависит от применяемых методик принятия решения о соответствии найденного аналога заданию, а технология поиска зависит от организации данных о проекте, наличия и использования стандартных и унифицированных узлов, деталей и ряда других параметров, включая геометрические характеристики [11; 140–143]. Наличие возможности обучать модель при последовательных циклах поиска позволяет постепенно настроить ее на задачу, используя для этого результаты предыдущих попыток.

Анализ возможных вариантов поиска (рис. 4.3) в зависимости от организации данных о проекте (вида структурированной информации) показывает, что принятие решения о выборе аналога связано с целью поиска, наличием средств его осуществления, принятой технологией структуризации исходной информации. По данной классификации все методы поиска можно условно разделить на две группы: организационные, связанные с созданием метаинформации, и прямые методы поиска в проектах изделий, созданных в САД-системе.

Комбинированным вариантом может быть автоматизированная классификация и кодирование на основе анализа информации, полученной из CAD-системы. Функция человека при этом сводится к контролю правильности назначения кода и уточнению результатов кодирования в сложных случаях.

Прямой поиск на основе геометрии и структуры изделия может производиться на нескольких уровнях абстракции в зависимости от объекта и задач поиска. При поиске аналогов узлов конструкции необходимо анализировать граф структуры изделия, последовательности сборки элементов в конструкцию. Кроме того, при использовании технологии визуального структурного проектирования [16; 58; 64] можно анализировать и окружающую деталь среду на основе использования связанных с ней «виртуальных инструментов».

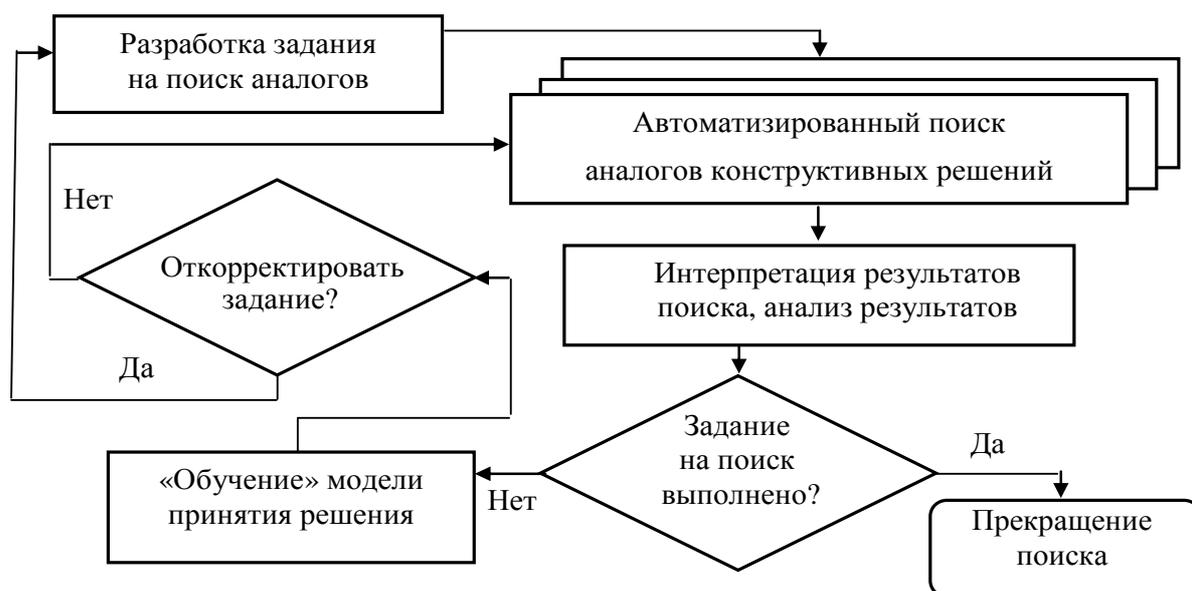


Рисунок 4.2 – Обобщенный алгоритм автоматизированного поиска аналогов конструктивных решений с «обучением» модели принятия решения

Объектная модель детали, построенная в CAD-системе [6; 21; 143], позволяет анализировать и информацию о гранях детали, что даёт сведения для идентификации формы детали (соотношения l/a , a/b и др.). Для повышения качества поиска аналога задание должно строиться на основе принятой в данной области терминологии, включенной в тезаурус поисковой системы или на основе онтологии предметной области [144; 145].

При поиске в проекте, разработанном в CAD-системе, исходными данными являются: структура аналога и параметрические ограничения (размеры деталей или узла в целом). Ограничения на работу системы складываются из времени подготовки задания, времени на обучение системы, при необходимости, и времени на поиск заданного количества требуемых аналогов. Сложность принятия решения определяется степенью несоответствия структур заданного узла и аналогов. Например, для нечеткого поиска

конструктивных аналогов в базах 3D-моделей изделий, спроектированных в CAD-системах возможно применение нейронных сетей. Алгоритм полного комбинаторного решения такой задачи может быть представлен как итеративная последовательность решения следующих подзадач:

- выделение всех возможных неповторяющихся подграфов из исходного графа $G(N, R)$, для которых e_N и e_R находятся в заданных диапазонах;
- проверка выделенного подграфа на изоморфность эталонному.

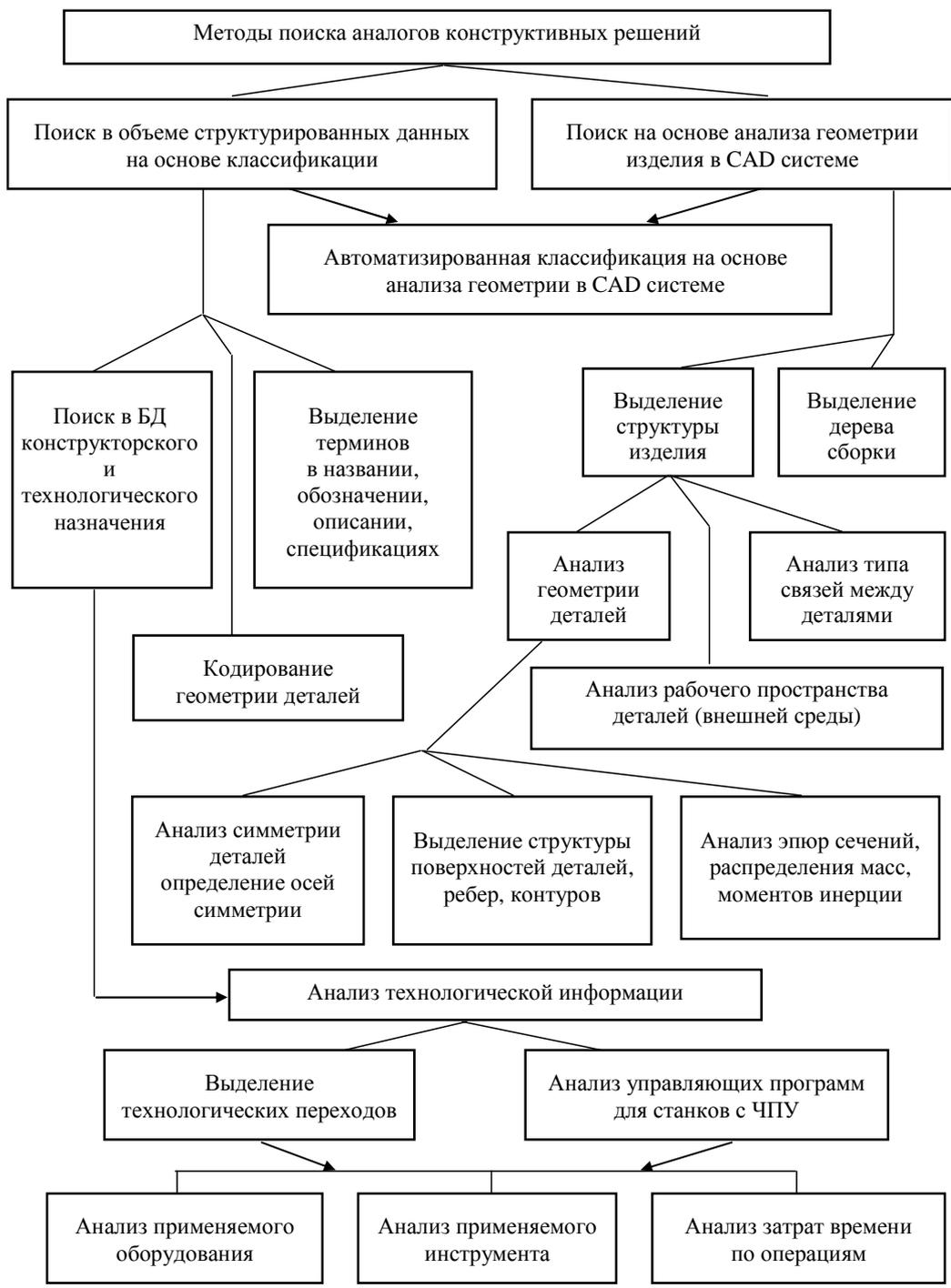


Рисунок 4.3 – Варианты поиска аналогов конструктивных решений в БД машиностроительных предприятий

Предложены методика и алгоритм реализации нечеткого поиска конструктивных аналогов в базах данных объемных моделей САД-систем с использованием самоорганизующихся карт Кохонена [133]. Сложность алгоритма существенно меньше сложности алгоритма полного комбинаторного перебора.

Для повышения эффективности поиска предложено использовать информацию о типовых структурах сборки, типах взаимосвязей деталей и их геометрии, полученных из САД систем.

Перспективным направлением является автоматизация классификаций на основе анализа геометрии одновременно с созданием деталей в САД системе.

Для построения интегрированного с SolidWorks приложения для поиска аналогов на основе онтологического подхода необходимо выполнить анализ объектной модели SolidWorks, языков описания и средств разработки онтологий, хранения информации в виде метаданных, средств построения запросов.

Выбор данной системы в качестве системы автоматизированного проектирования был сделан благодаря нескольким факторам [6; 21; 44; 143]:

1) SolidWorks является мощной и быстро развивающейся системой объемного геометрического моделирования, имеющей множество специализированных модулей;

2) функции SolidWorks API позволяют получить доступ к объектной модели проектов из внешней среды программирования для обеспечения интеграции и обмена данными;

3) значительное число машиностроительных предприятий, в частности, одно из крупнейших – Новокраматорский машиностроительный завод (НКМЗ), широко используют именно SolidWorks. На НКМЗ накоплена большая БД САД-проектов и реализация поиска аналогов изделий является актуальной задачей;

4) система автоматизированного проектирования SolidWorks является приложением, специально спроектированным для работы под управлением операционной системы Windows. Для обеспечения максимальной эффективности использует множество технических приемов проектирования. SolidWorks обладает тщательно продуманной открытой архитектурой, которая является основой для разработки специализированных модулей, расширяющих ее функциональность.

Для обеспечения интеграции с внешними приложениями САД-система SolidWorks представляет собой сервер автоматизации (Automation) и реализует доступ к своим ресурсам посредством объектно-ориентированного интерфейса SolidWorks API, организованного в виде стандартных COM-объектов [21; 143; 146]. В данной работе при создании ПМК для поиска в БД машиностроительных изделий для получения доступа к сборкам используется класс AssemblyDoc объектной модели SolidWorks.

Через объект, интерфейс которого предоставляет класс `AssemblyDoc`, можно получить доступ к коллекции связей (сопряжений), входящих в сборку, к параметрам, описывающим эти сопряжения, а также доступ к деталям, входящим в сборку. Каждое сопряжение (описываемое интерфейсом `IMate`) представляет собой бинарную связь двух деталей (`IEntity`), тип связи, другие качественные и количественные характеристики. Как и класс `PartDoc`, класс `AssemblyDoc` является прямым наследником класса `ModelDoc` и реализует методы родителя уровня документа. К основным функциям, характерным для `AssemblyDoc` можно отнести добавление, удаление, редактирование деталей в контексте сборки, наложение, удаление, редактирование сборочных зависимостей между компонентами, управление конфигурациями сборки, создание разорванного вида, управление видимостью компонентов. Класс предоставляет пользователю функции для определения характеристик связи. В таблице 4.2 представлен перечень главных характеристик связей и их возможные значения, которые были использованы в ПМК поиска аналогов изделий.

Таблица 4.2 – Характеристики связей в *SolidWorks*, использованных в ПМК поиска аналогов изделий

№	Название	Принимаемое значение
1	Тип связи	Строковая величина, описывающая тип связи, который предопределён интерфейсом <code>SolidWorks</code> и может принимать следующие значения: <ul style="list-style-type: none"> - <code>swMateCOINCIDENT</code> (сопряжение ведётся по совпадению элементов сопрягающихся деталей); - <code>swMateCONCENTRIC</code> (концентричность); - <code>swMatePERPENDICULAR</code> (сопряжение по перпендикулярной поверхности); - <code>swMateDISTANCE</code> (расстояние) и другие (всего 16 возможных вариантов)
2	Тип сопрягаемого элемента	Строковая величина, описывающая тип сопрягаемого элемента, который предопределён интерфейсом <code>SolidWorks</code> : <ul style="list-style-type: none"> - <code>EDGE</code> (деталь сопрягается по ребру); - <code>FACE</code> (деталь сопрягается по поверхности); - <code>VERTEX</code> (деталь сопрягается по вспомогательной точке из справочной геометрии); - <code>PLANE</code> (деталь сопрягается по вспомогательной плоскости из справочной геометрии); - <code>AXIS</code> (деталь сопрягается по вспомогательной оси из справочной геометрии) и другие
3	Тип сопрягаемой поверхности	Строковая величина, описывающая тип сопрягаемой поверхности, который предопределён интерфейсом <code>SolidWorks</code> : <ul style="list-style-type: none"> - <code>Plane</code> (плоская поверхность); - <code>Cylinder</code> (цилиндрическая поверхность); - <code>Cone</code> (коническая поверхность); - <code>Sphere</code> (сферическая поверхность); - <code>Torus</code> (торообразная поверхность); - <code>Revolved</code> (поверхность вращения) и другие

Таким образом, SolidWorks API и позволяет получить открытый доступ к объектной модели проектов для обеспечения интеграции и обмена данными. При работе в SolidWorks конструктор формализует информацию о деталях и узлах конструкций в виде дерева объектов модели. Эта информация в совокупности с названиями деталей может быть использована для повышения релевантности результатов поиска аналогов машиностроительных изделий. Модель SolidWorks хранит также важную информацию о связях деталей в изделии, что тоже может повысить релевантность результатов поиска аналогов.

4.2 Онтологии как основа для проектирования баз знаний

В любой системе существуют две основные категории предметов восприятия: объекты, составляющие систему (физические или интеллектуальные) и взаимосвязи между ними, характеризующие состояние системы. Таким образом, описанием объектов являются термины, а взаимосвязи объектов описаны в виде правил. На начальном этапе построения онтологии должны быть выполнены следующие операции:

- создание и документирование словаря терминов;
- описание правил и ограничений, по которым на базе введенной терминологии формируются утверждения, описывающие состояние системы;
- построение модели, которая на основе существующих утверждений позволяет формировать необходимые дополнительные утверждения.

Дополнительные утверждения создаются для того, чтобы данная модель могла выбирать наиболее эффективные утверждения из существующих в каждой конкретной ситуации. Таким образом, онтология – словарь данных, включающий в себя и терминологию и модель поведения системы.

Для наглядного представления данных, полученных в результате обработки онтологических запросов в простой естественной графической форме, создано много методологий, но наиболее распространенной и общепринятой является методология IDEF5 [147; 148].

Различают следующие типы онтологий [118; 148–150].

1 Предметно-ориентированные:

- специфичные для данного домена;
- обобщение предметной области (машиностроение).

Данные онтологии специфичны для определенного типа объектов. Примером может служить онтология для станков, инструментов, электрических цепей. Онтология предметной области обобщает понятия, использующиеся в некоторых задачах домена, абстрагируясь от самих задач. Так онтология предметной области для конструирования станков должна быть независима от любых видов прикладных задач.

2 Ориентированные на прикладную задачу:

- специфичные для данной задачи (технология; планирование; контроль качества);
- обобщение предметной области (решение проблем обработки материалов).

Онтологии, ориентированные на прикладную задачу – это обычно онтологии, используемые приложением. Они содержат термины, которые используются при разработке системы прикладных программ, выполняющих задачу. Они могут отражать специфику приложения, а могут также содержать некоторые общие характеристики. Часто нужно определить, как понять значение частей онтологии задачи для их повторного использования, и как построить часть онтологии задачи из существующей предметно-ориентированной онтологии.

3 Базовые технические онтологии описывают общие характеристики артефактов, обычно определяют знания, связанные с видами физических процессов или объектов (деталей машин, геометрических фигур и их элементов).

4 Общие онтологии:

- категории верхнего уровня;
- элементы и измерения.

Обобщающие онтологии описывают категории – понятия верхнего уровня. Это базовый механизм «разделения мира».

В данной работе будут использованы:

- предметно-ориентированная онтология машиностроительных элементов;
- ориентированная на прикладную задачу онтология геометрического моделирования SolidWorks;
- базовая техническая онтология геометрических элементов.

Построение онтологий – сложный и занимающий много времени процесс. Чтобы облегчить его, в середине 90-х годов начали создаваться первые среды для процесса разработки онтологий. Они обеспечили интерфейсы, которые позволили выполнять концептуализацию, реализацию, проверку непротиворечивости и документирование. За последние годы число инструментов для онтологий резко возросло (сайт консорциума W3C, например, предоставляет список более чем 50 инструментов редактирования онтологий [151]).

Инженерию онтологий можно определить как совокупность действий, касающихся: процесса разработки онтологий; жизненного цикла онтологий; методов и методологий построения онтологий; набора инструментов и языков для их построения и поддержки.

В настоящее время для создания и поддержки онтологий существует целый ряд инструментов, которые помимо общих функций редактирования и просмотра выполняют поддержку документирования онтологий, импорт и экспорт онтологий разных форматов и языков, поддержку графического редактирования, управление библиотеками онтологий и т. д.

Сравнение характеристик существующих ПМК построения онтологий приведено в таблице 4.3. Анализ информации, приведенной в таблице, показал, что одним из наиболее перспективных ПМК построения онтологий является Protégé, главными преимуществами которого являются: доступность (открытый код, бесплатная лицензия), использование распространенных языков описания онтологий [152].

На данный момент наиболее распространенными языками описания онтологий являются RDF (Resource Description Framework) и OWL (Web Ontology Language).

RDF – это универсальный язык для представления знаний, который описывает объекты и отношения между ними, а также семантику данных. Используя простую реляционную модель, он позволяет различным приложениям обмениваться данными.

OWL (Web Ontology Language) – язык представления онтологий, расширяющий возможности XML, RDF, RDF Schema и DAML+OIL. OWL включает в себя расширения уже существующих языков, являясь одной из ключевых технологий для использования в Semantic Web [153–156].

Таким образом, OWL позволяет описать предметную область при помощи онтологии. Язык OWL обладает всеми необходимыми средствами для создания иерархической структуры понятий предметной области и описания взаимосвязей между ними.

На основе анализа языков метаописаний принимаем, что для описания онтологий используем язык OWL. Для метаописаний экземпляров онтологий, которые формализуют информацию о САД-проектах (деталях и структуре конкретных изделий) и будут храниться в БД, применим универсальный язык описания RDF.

Для обработки данных в формате RDF применяется язык запросов SPARQL, который также будет использован в разрабатываемой информационной технологии поиска аналогов изделий на основе онтологического подхода. SPARQL – проект нового стандарта платформы XML, который определяет язык запросов информационных ресурсов в среде Web в терминах их описания средствами стандарта RDF [157]. В сочетании со спецификациями RDF язык SPARQL будет определять полнофункциональную модель данных семантического уровня представления информационных ресурсов Web.

Имеющиеся в настоящее время средства семантического описания информационных ресурсов Web (стандарты RDF и OWL) не обладают какими-либо операционными возможностями, адекватными этому уровню представления информационных ресурсов Web [158]. Стандарт SPARQL восполняет этот пробел, позволяя извлекать данные по запросу из RDF-спецификации, а также конструировать новые компоненты RDF-спецификации.

Таблица 4.3 – Сравнение характеристик существующих ПМК построения онтологий

Характеристика	Protégé	OntoEdit	OilEd	OntoSaurus	Ontolingua	WebOnto	WebODE
Разработка, дата разработки	SMI, Stanford University, 2004	Ontoprize, 2004	IMG, University of Manchester, 2003	ISI, University of Southern California, 2002	KSL, Stanford University, 2002	KMI, Open University, 2001	Ontology Group, Polytechnic University of Madrid, 2003
Доступность	Открытый код	Свободная лицензия	Открытый код	Открытый код, свободный доступ	Свободный доступ	Свободный доступ	Свободный доступ
Тип архитектуры	3-х уровневая архитектура	3-х уровневая архитектура	3-х уровневая архитектура	Клиент-серверная	Клиент-серверная	Клиент-серверная	n-уровневая
Хранение информации	Текстовый файл, база данных	Текстовый файл	Текстовый файл	Текстовый файл	Текстовый файл	Текстовый файл	База данных
Язык проекта	Java	Java	Java	Lisp	Lisp	Java	Java+Lisp

Технология SPARQL позволяет извлекать данные из распределенных источников и может служить в качестве средства интеграции разнородной информации. В спецификации SPARQL отсутствуют недостатки, присущие традиционным языкам запросов, в частности, не накладываются ограничения на формат данных, благодаря чему становится возможным взаимодействие между ресурсами различного типа.

В качестве машины обработки запросов был выбран Corese (Conceptual Resource Search Engine) [159]. Corese предназначен для обработки запросов, основанный на Conceptual Graphs (CG), обеспечивает обработку RDF выражений в рамках CG формализма, Corese поддерживает синтаксис языков OWL (в качестве языка описания онтологий), RDF (в качестве языка описания экземпляров онтологий), SPARQL (язык составления запросов).

Поддержка синтаксиса перечисленных Web-языков (OWL, RDF, SPARQL) и бесплатное распространение программы стало причиной выбора Corese как машины обработки запросов в рамках данной работы.

4.3 Разработка методики поиска аналогов элементов конструкции на основе онтологического подхода

4.3.1 Математическая модель онтологии

Формализовать информацию о предметной области машиностроения в целом и САД-проектах изделий, в частности MSIdOntology, можно с помощью модели онтологии, которую можно представить в виде совокупности трех элементов [138; 139; 145]

$$\text{MSIdOntology} = \{C, R, F\}, \quad (4.1)$$

где C – конечное множество понятий онтологии;

R – конечное множество отношений между понятиями онтологии;

F – конечное множество функций интерпретации.

В соответствии с алгоритмом построения онтологии рассмотрим, например, понятия онтологии, которые образуют иерархию классов $C_h = \{c_i; R_h\}$, связанных между собой подмножеством отношений из $R \subseteq R_h$. Каждый класс c_i характеризуется именем и совокупностью свойств $S = \{s_i\}$, где каждое свойство s_i представляет собой совокупность параметров

$$s_i = \{n_i, t_i, v_i\}, \quad (4.2)$$

где n_i – символьное имя свойства s_i ;

t_i – тип свойства;

v_i – значение свойства.

В частности, класс «Цилиндр» характеризуется совокупностью свойств { («радиус основания», «double - вещественный тип», «значение радиуса»); («длина образующей», «double», «значение длины образующей»), ...}. Данный класс входит в иерархию с базовым классом «Поверхность».

В иерархии классов можно выделить следующие отношения: типа вид/подвид (отношения наследования) и инстанцирования объектов. Как правило, такие отношения существуют в каждой онтологии

$$R_h = \{ \text{subclass, superclass, instance} \}, \quad (4.3)$$

где R_h – подмножество общего множества отношений классов в онтологии;

subclass – класс является наследником;

superclass – класс является базовым;

instance – объект класса.

В частности, класс «Цилиндр» является классом-наследником базового класса «Поверхность» и находится с ним в отношении $R_h = \{ \text{Цилиндр, Поверхность, } 0 \}$. Объекты классов являются экземплярами, которые моделируют конкретные сущности классов. В нашем случае конкретная связь может содержать одну, две поверхности или поверхность и ребро, или другие объекты.

Для обеспечения поиска требуемой совокупности объектов в онтологическом описании конкретной структуры изделия (в сборке) следует задать совокупность объектов с их связями (под сборку), а также ограничения на значения параметров свойств соответствующих классов.

Особенностью предложенного алгоритма поиска аналогов является то, что в нём используется формализованная информация (метаинформация) о CAD-моделях, построенных в SolidWorks, и предметной области машиностроения. Алгоритм поиска включает следующую последовательность этапов.

Первый этап включает подготовку накопленной в БД информации о проектах к поиску. Если проектируемый конструктивный узел задан в виде CAD-модели, то выполняется ее преобразование в метаинформацию, включающую в себя необходимые данные о сборке: типы связей в сборке; детали, участвующие в связях, их типы и название; типы поверхностей, по которым детали соединяются, их геометрические характеристики (длина, радиус, высота, угол и др.) в соответствии с моделью (4.1)...(4.3).

Метаинформация записывается в файл с помощью языка RDF. На следующем этапе для поиска аналогов динамически формируется запрос к БД сборок на языке SPARQL. Затем осуществляется сам процесс поиска аналогов, в котором участвуют: файл метаописания искомой подсборки, файл запроса, база знаний (совокупность файлов RDF-описаний существующих CAD-проектов), а также файлы онтологий в формате OWL. В результате обработки запроса выдается список найденных в базе знаний

проектов (в текстовом виде, либо в виде САD-модели), которые соответствуют метаописанию искомой под сборки и являются её аналогами.

Рассмотрим более подробно методики формирования необходимой для поиска информации в соответствующих форматах описания.

4.3.2 Методика отображения моделей предметных областей на основе применения онтологического подхода

Чтобы формализовать огромное количество информации, появляющееся в области машиностроения, создают международные (или внутригосударственные) стандарты, такие как ГОСТы в области машиностроения, а также ЕСКД и ЕСТД, которые нацелены на обеспечение информацией в виде соответствующих документов участников производственного процесса проектирования и изготовления изделий. Изделие – это любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии [136].

В соответствии с ГОСТ 2.101 предлагается следующая классификация изделий и их структура: детали; сборочные единицы, комплексы, комплекты. Общая схема структуры изделий и их декомпозиция изображена на рисунке 4.4. В частности, деталь – изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала, без применения сборочных операций (например: валик из одного куска металла, литой корпус).



Рисунок 4.4 – Виды изделий и их структура

К сборочным единицам относят:

– изделия, для которых конструкцией предусмотрена разборка их на составные части предприятием-изготовителем;

– совокупность сборочных единиц и (или) деталей, имеющих общее функциональное назначение и совместно устанавливаемых на предприятии-изготовителе в другой сборочной единице (электрооборудование станка, автомобиля, самолета).

Комплекс – два и более специфицированных изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций.

Комплект – два или более изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющих набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера (комплект запасных частей, инструмента и принадлежностей, измерительной аппаратуры).

Приведенные виды изделий образуют общемашиностроительные типы (или классы) элементов конструкций. Каждый тип может быть разбит на ряд подтипов в зависимости от более узкой предметной области, в которой производится проектирование. Экземпляры этих типов, связанные между собой связями, образуют изделие. Совокупность этих экземпляров и связей образуют структуру изделия. Каждый тип и подтип имеют своё название, а экземпляры этих типов – уникальные имена, которые позволяют их идентифицировать в сборке (номера и названия деталей). Аналогично связи также имеют свои названия и уникальные имена экземпляров (или номера). Таким образом, эта информация может быть представлена в виде онтологии машиностроения.

При создании онтологий их описание осуществляется в OWL-формате, используются имена типов деталей и связей, а при формировании метаинформации о сборках (в RDF-формате) необходимо учитывать не только имена типов деталей и связей, но и уникальные имена экземпляров.

Традиционно в машиностроении используются поисковые механизмы общего назначения для поиска аналогов по текстовому описанию или специализированные – для поиска по классификаторам, например ЕСКД. В данной работе исследуется возможность повышения релевантности поиска аналогов изделий на основе их онтологического описания. Рассмотрение последовательности создания объемных моделей изделий в САД-системе позволяет получить описание конструкции на основе применяемых геометрических примитивов (линия, поверхность, плоскость, точка, кромка, ребро, грань и др.), а описание деталей изделия в технических документах производится с использованием машиностроительных терминов (рычаг, опора, вал, ось). Для данных систем понятий возможно построение частных онтологий O_{CAD} и O_{tech} соответственно [133; 160]. Тогда в общем виде

задача поиска аналогов CAD-моделей изделий на основе частных онтологий может быть сформулирована как задача нахождения оценки степени соответствия подонтологий (фрагментов частных онтологий), описывающих эталонную модель искомого элемента конструкции O'_{tech} и возможный ее аналог O'_{CAD} , который анализируется:

$$est(O'_{tech}, O'_{CAD}) \geq EST_{min}, \quad (4.4)$$

где $est(O'_{tech}, O'_{CAD})$ – функция оценки соответствия фрагментов онтологий,

EST_{min} – минимальная, требуемая степень соответствия для аналога.

Решение задачи (4.4) основывается на выполнении следующего условия (4.5): для любого терма (концепта или отношения) $t \in O'_{tech}$ возможно существование соответствующего терма $e \in O'_{CAD}$, который определяется функцией отображения (mapping) $map(t, O'_{tech}, O'_{CAD})$ термов одной онтологии на другую:

$$\forall t \in O'_{tech} (\exists e \in O'_{CAD} : map(t, O'_{tech}, O'_{CAD}) = e). \quad (4.5)$$

Базисом для реализации взаимного отображения частных онтологий в машиностроительных терминах и терминах графических элементов CAD-систем может служить онтология геометрических фигур, в терминах которой отображаются и затем оцениваются указанные частные онтологии.

Существует множество критериев классификации геометрических элементов:

- количество измерений, в которых расположена фигура (линейные примитивы, плоская фигура, объемная фигура);
- виды, расположение и количество ребер;
- виды, расположение и количество граней.

Так как любые физические объекты, в том числе и машиностроительные изделия, представляют собой объемные фигуры, то в качестве главного классификатора было выбрано количество плоскостей, в которых расположены фигуры (линейные примитивы, плоская фигура, объемная фигура). Классификация геометрических элементов по этому признаку представлена на рисунке 4.5. Геометрическая фигура может быть объемной, плоской либо представлять собой линейный примитив. Для того чтобы ограничить количество возможных вариантов, выделены наиболее общие группы фигур, к одной из которых будет относиться рассматриваемый объект.



* - могут быть различные варианты кольца: кольцевой сегмент, кольцевой сектор, полукольцо

Рисунок 4.5 – Классификация геометрических элементов по количеству измерений, в которых расположена фигура

Полученная классификация позволяет структурировать информацию о геометрии детали, в случае распознавания связи нескольких деталей – можно определить форму деталей; поверхности, по которым они соединяются; количество и тип поверхностей сопряжения, другую количественную информацию.

На первой стадии разработки онтологии геометрических фигур выполнена их классификация, исходя из типовых форм геометрических примитивов, ограничивающих тело в пространстве (рис. 4.6), которая позволяет сформулировать принципы классификации.

Дальнейшая формализация онтологии осуществлялась на принципах последовательного изменения размерности пространства, предельных переходов и ограничений, что частично соответствует процессу построения модели в САД-системе. Фрагмент разработанной онтологии представлен на рисунке 4.7 в виде графа последовательного формирования пространственных фигур из элементов путем их добавления (добавить плоскость), введения ограничивающих понятий (терминов: круглый, параллельный, пересечение плоскостей в одной точке), а также численных значений параметров (угол, линейный размер).

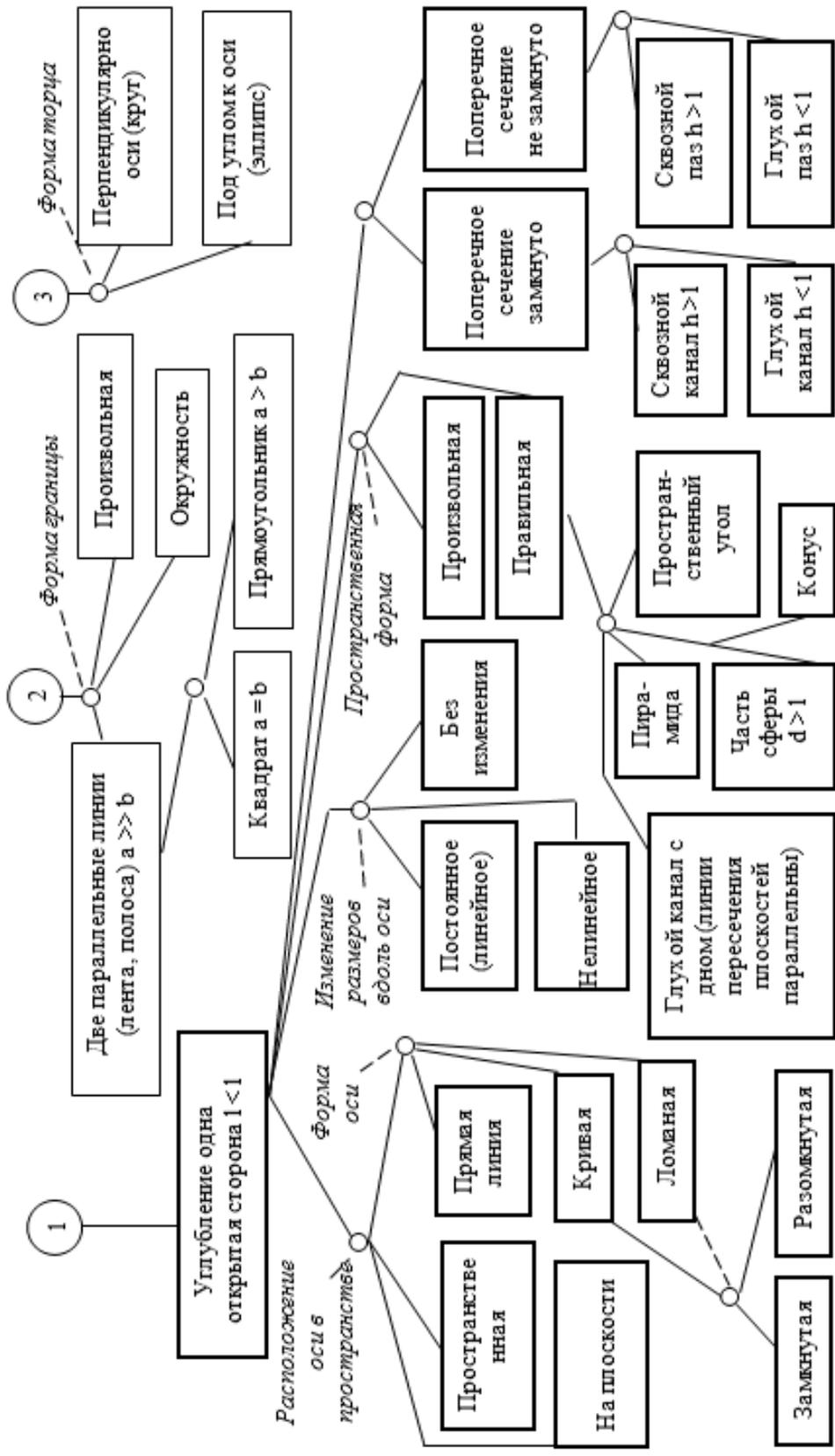


Рисунок 4.6, лист 2

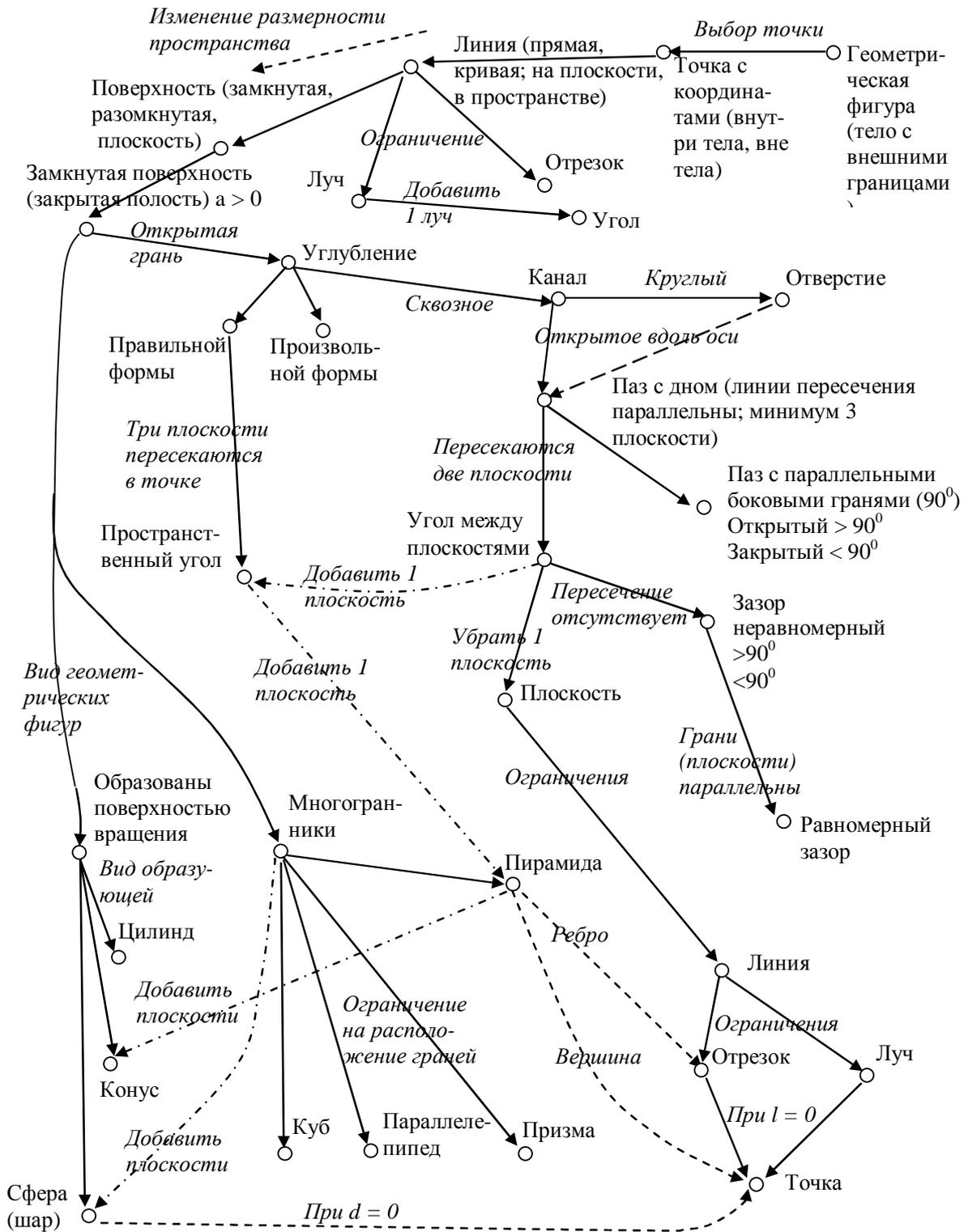


Рисунок 4.7 – Фрагмент общесистемной онтологии геометрических фигур

Вершины разработанного графа – геометрические абстракции, рёбра – операции над геометрическими примитивами. Виды операций, которые использованы: изменение размерности пространства, добавление и ограничение примитивов и т. д.

Для решения поставленной задачи необходимо выделение частных онтологий и установление взаимосвязи между их понятиями. В частности, для пирамиды показано, что отрезок является ребром, а точка – вершиной.

Построение частных онтологий изделий машиностроения основано на общепринятых стандартах машиностроительных изделий, например, ЕСКД (Единая система конструкторской документации) и ЕСТД (Единая система технологической документации). Рассмотрим предметную область проектирования редукторов, как типовых представителей изделий машиностроения. Главным классификатором в данном случае является способность машиностроительного изделия к передаче крутящего момента. Выделяют две разновидности конструктивного исполнения передач: передача жестким элементом и передача крутящего момента за счёт фрикционного взаимодействия.

Связь, передающую крутящий момент жестким элементом, можно классифицировать по следующим показателям [20; 18; 136]:

- 1) тип соединительной детали (штифт, шпонка и их разновидности);
- 2) форма детали (с лыской, призматическая, шлиц, двугранная, трехгранная, N-гранная);
- 3) положение относительно вала (на торце, непосредственно на валу);
- 4) положение относительно оси вала (соосно, аксиально, под углом к оси).

Передача крутящего момента за счёт фрикционного взаимодействия может быть клеммной, конусной или с помощью затяжных колец.

Создание данной онтологии позволит увеличить релевантность результатов поиска аналогов изделия с точки зрения функционального назначения деталей и связей между ними. Таким образом, в процессе поиска будет учитываться не только геометрия деталей и её модель в CAD-системе SolidWorks, но и функциональное назначение детали в предметной области машиностроения.

Построенная онтология машиностроительных изделий представлена на рисунке 4.8 в виде классификации конструктивных решений для передачи крутящего момента на валу.

Структура онтологии CAD-системы SolidWorks отражена в её объектной модели, рассмотренной ранее. Приведём часть онтологии геометрической модели изделия в CAD-системе SolidWorks (рис. 4.9), которую будем использовать в данной работе при создании метаописания CAD-проектов конкретных изделий машиностроения.

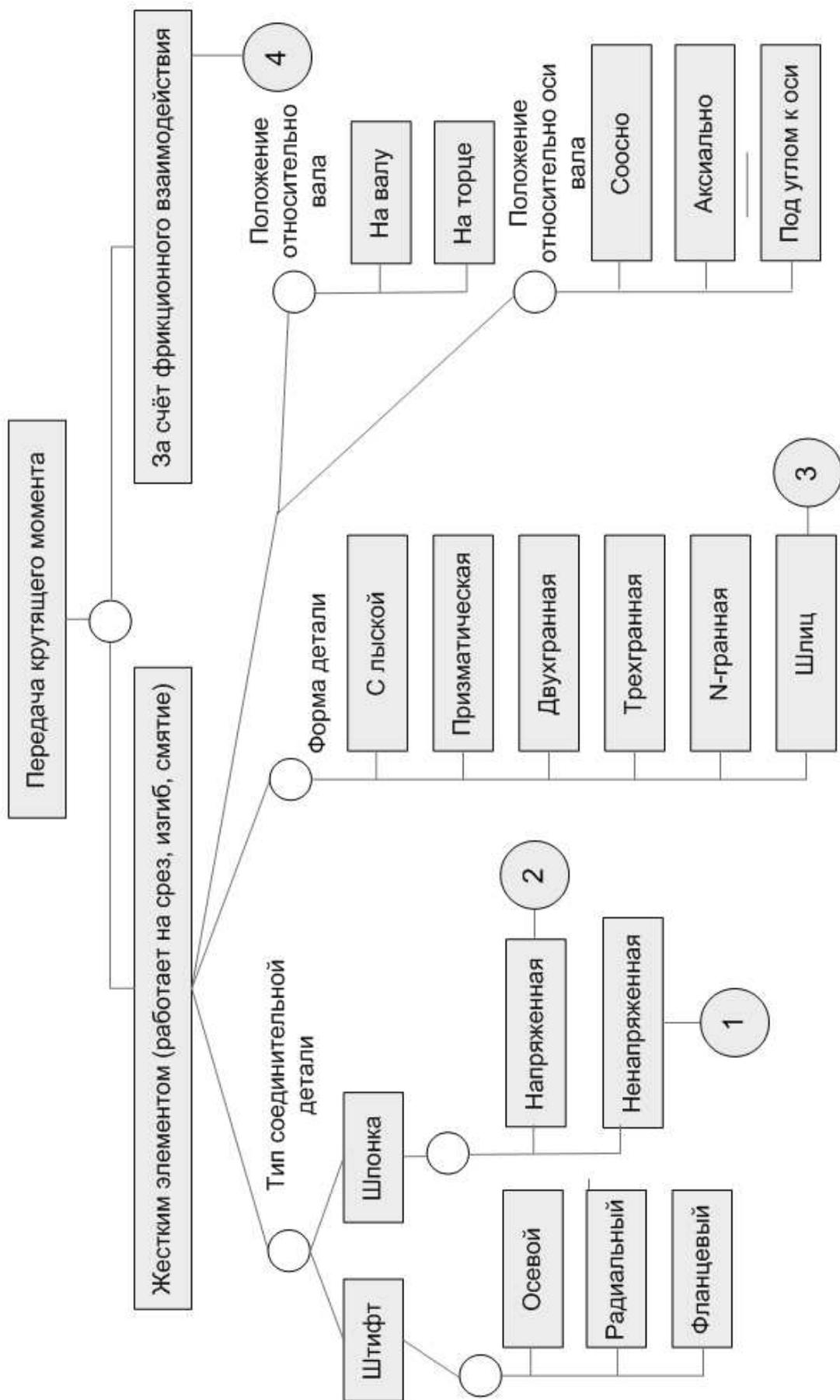


Рисунок 4.8 – Классификация конструктивных решений для передачи крутящего момента на валу

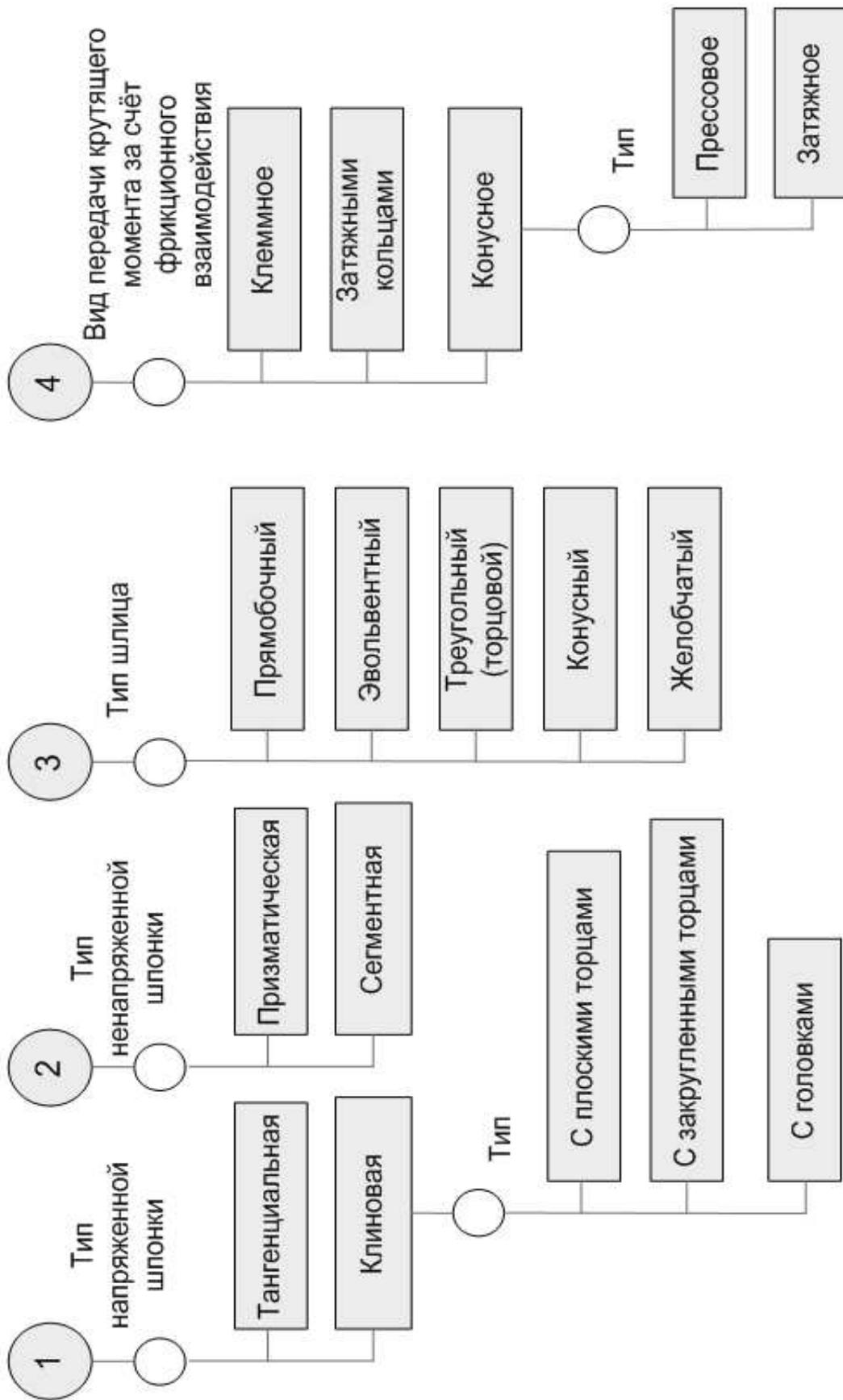


Рисунок 4.8, лист 2

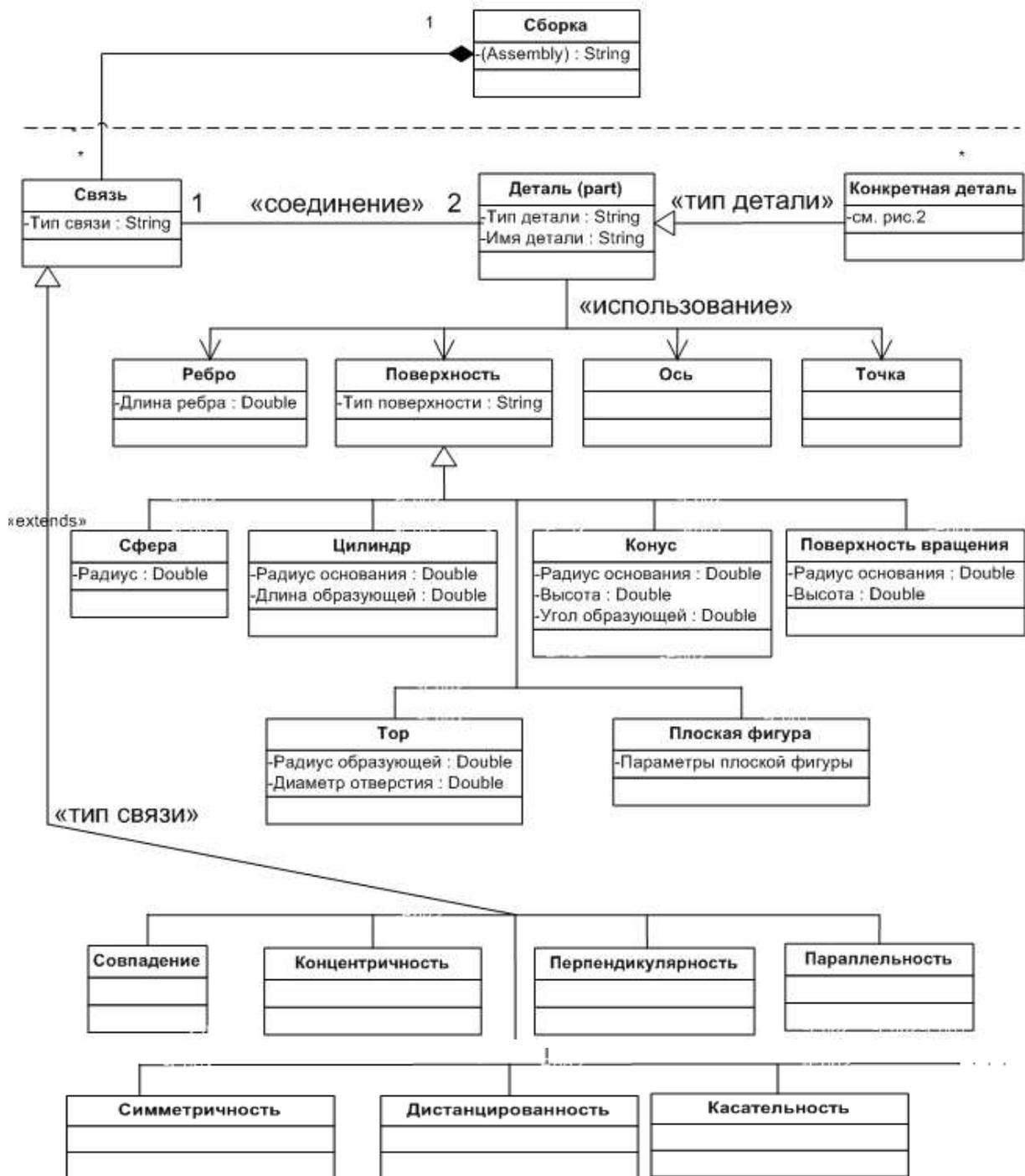


Рисунок 4.9 – Онтологическое представление информации о модели изделия в CAD-системе SolidWorks

Достоинством данной онтологии геометрического моделирования изделия в CAD-системе SolidWorks, ориентированной на прикладную задачу, является то, что она позволяет подключить предметно-ориентированную онтологию машиностроительных элементов и использовать их совместно. При этом базовая техническая онтология геометрических элементов является основой для общего подхода к формализации информации о геометрии деталей.

Для формирования правил логического вывода автоматизированного поиска аналогов проектируемого узла требуется выполнение нескольких условий:

- наличие формализованного описания предметной области;
- наличие критериев, по которым будут строиться правила и осуществляться поиск;
- наличие формализованного языка описания правил.

В качестве формализованного описания предметной области выступает совокупность созданных онтологий, поиск осуществляется с учётом анализа сборки по различным критериям (геометрическая структура, функциональное назначение, структура объектов CAD-системы SolidWorks).

Правило формируется последовательно, декомпозиционно. Рассмотрим следующие правила логического вывода.

Поиск связи. Связь – отношение общности, соединения или согласованности между понятиями [18; 64; 137; 161]. В данной работе принято более частное определение термина связь: связь – бинарное отношение двух деталей. Следовательно, связь определяется тремя свойствами: тип связи, деталь 1, деталь 2. Тип связи регламентируется SolidWorks API – и может принимать значение из ограниченного множества классификации связей SolidWorks API.

Для того чтобы идентифицировать деталь, требуется выполнить анализ её свойств и задать: уникальное имя детали, тип детали, тип сопрягаемого элемента. Стоит отметить, что в зависимости от типа сопрягаемого элемента деталь может иметь дополнительные свойства. В случае, если это – ребро, то оно имеет свойства: длина ребра (размер), форма ребра (прямолинейное, криволинейное); если поверхность – тип поверхности (шаровидная, плоская, конусовидная и т. д.) и т. д.

Полная классификация свойств, основанная на анализе предметной области автоматизированного проектирования изделий отображена в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Классификация свойств в соответствии с принятыми аспектами рассмотрения

Свойство	Класс-предок	Используемая онтология	Пример
Тип связи	Связь	SolidWorks	Совпадение, концентричность
Имя детали	Деталь	SolidWorks	Вал-шестерня, червячный вал
Тип детали	Деталь	Машиностроительная	Вал, шпонка, зубчатое колесо
Тип сопрягаемого элемента	Деталь	Геометрическая	Ребро; поверхность; ось, точка (вспомогательная геометрия)
Тип поверхности	Поверхность	SolidWorks	Конусовидная, шаровидная, плоская
Длина ребра	Ребро	Геометрическая	Количественное значение
Радиус	Конус, тор, сфера	Геометрическая	Количественное значение
Длина образующей	Конус	Геометрическая	Количественное значение
Высота	Цилиндр	Геометрическая	Количественное значение
Угол образующей	Конус	Геометрическая	Количественное значение

В рамках данной работы для реализации и анализа поиска аналогов задействованы только тип свойства: связи, имя детали, тип детали, тип сопрягаемого элемента, тип поверхности. Количественные свойства не рассматривались.

Рассмотрим типовую структуру «Вал в сборе» машиностроительного редуктора (рис. 4.10). Выделим ассоциативные правила для типового соединения детали «Вал» с деталью «Звездочка», которая передаёт крутящий момент.

В этом соединении, как правило, присутствует деталь «Шпонка», которая непосредственно передаёт крутящий момент, хотя может быть и «Штифт» (см. рис. 4.8).

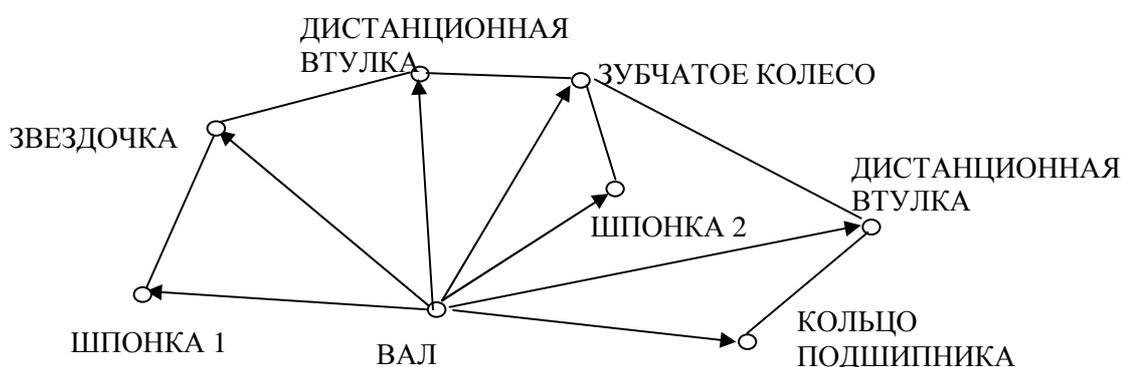


Рисунок 4.10 – Типовая структура части узла «Вал в сборе» машиностроительного редуктора

Ассоциативные правила, описывающие взаимодействия между элементами конструкции, могут существенно помочь при поиске аналогов за счёт выявления типовых структурных решений, например, если есть деталь «Вал» и она связана с деталью «Звездочка», то соединение, как правило, «Концентричное». В этом же узле: если есть деталь «Шпонка», соединенная с деталью «Вал» и она связана с деталью «Звездочка», то соединение с деталью «Вал» и с деталью «Звездочка», как правило, «Совпадение». Наличие таких правил позволяет выявить шаблоны для поиска и дополнить исходную постановку задачи поиска, сформулированную конструктором [122; 124]. Пример шаблона шпоночного соединения представлен на рисунке 4.11. Можно выявить и другие типовые связи, например, при проектировании редуктора понятие вала ассоциировано также с подшипниками, корпусом, дистанционными втулками и др.

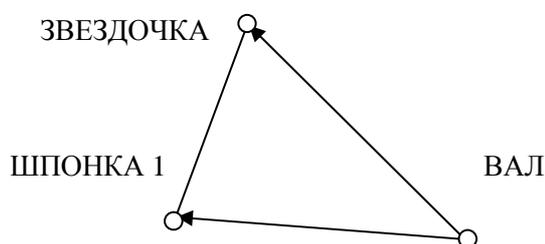


Рисунок 4.11 – Типовая структура шаблона шпоночного соединения

При постановке задач поиска можно существенно повысить уровень абстракции при формировании запросов на основе технологии визуального структурного проектирования (ВСП) [16]. Сущность ВСП заключается в построении графа структуры изделия или его части (подграфа) и автоматизированном построении запроса на поиск аналогов в общих графах структур существующих в БД САД-изделий.

Общепринятый способ проектирования в САД-системе заключается в том, что в базовом элементе (детали) формируют посадочное место по размерам устанавливаемой детали, затем деталь устанавливают в базовую и связывают их в пространстве по базовым геометрическим примитивам (поверхностям, осям, ребрам). В основу патента для способа ВСП [58] положена задача усовершенствования процесса автоматизированного проектирования, которая решается тем, что для устанавливаемой детали предварительно разрабатывается, по крайней мере одна дополнительная деталь, связанная с устанавливаемой по базовым элементам и посадочное место в базовой детали формируют путем вычитания в пространстве дополнительной детали – «виртуального инструмента» из базовой, после чего в базовую деталь устанавливают исходную по общим с дополнительной деталью, базирующим элементам. Дополнительная деталь параметрически связана с устанавливаемой по базовым элементам и хранит информацию о посадочном месте устанавливаемой детали. Таким образом, осуществляется

переход от визуальной схемы к метаописанию и потом к объемной САД-модели. При этом метаописание структуры модели изделия позволяет сформировать и запрос на поиск аналогов.

4.4 Программно-методический комплекс поиска аналогов элементов конструкции на основе онтологического подхода

4.4.1 Разработка логической модели ПМК поиска аналогов элементов конструкции

Выполним функциональную декомпозицию предметной области «Поиск аналогов изделий в БД САД-проектов» и покажем особенности и последовательность операций при использовании онтологического подхода в процессе поиска аналогов изделий. Детализирующая SADT-диаграмма активности «Поиск аналогов изделий» приведена на рисунке 4.12. Спецификация подпроцессов активности «Поиск аналогов изделий в БД САД-проектов» приведена в таблице 4.1.

В соответствии с предложенной методикой на вход в систему подаются внешние потоки данных: «Информация о предметной области», «Запрос на поиск аналогов изделия» и «САД-проект изделия». Они несут исходную информацию для начала подпроцессов «Создание онтологии», «Формализация запроса» и «Создание метаописания САД-проекта» соответственно.

Создание необходимых для работы ПМК онтологий выполняет Инженер по знаниям. В результате формируются онтологии в OWL-формате.

Создание метаописания САД-проектов (в RDF-формате) выполняет ПМК, интегрированный с САД-системой. Результаты работы записываются в БД метаописаний САД-проектов. Разработанные онтологии и БД метаописаний САД-проектов являются информационной базой для поиска требуемых аналогов. После этой подготовительной работы инженер-конструктор формулирует запрос на поиск аналогов на языке SPARQL или с помощью графического интерфейса ПМК.

После выполнения запроса на выходе системы получают внешний поток данных: «Результаты запроса на поиск аналогов». Полученные аналоги рассматриваются конструктором, который оценивает их полезность и релевантность запросу.

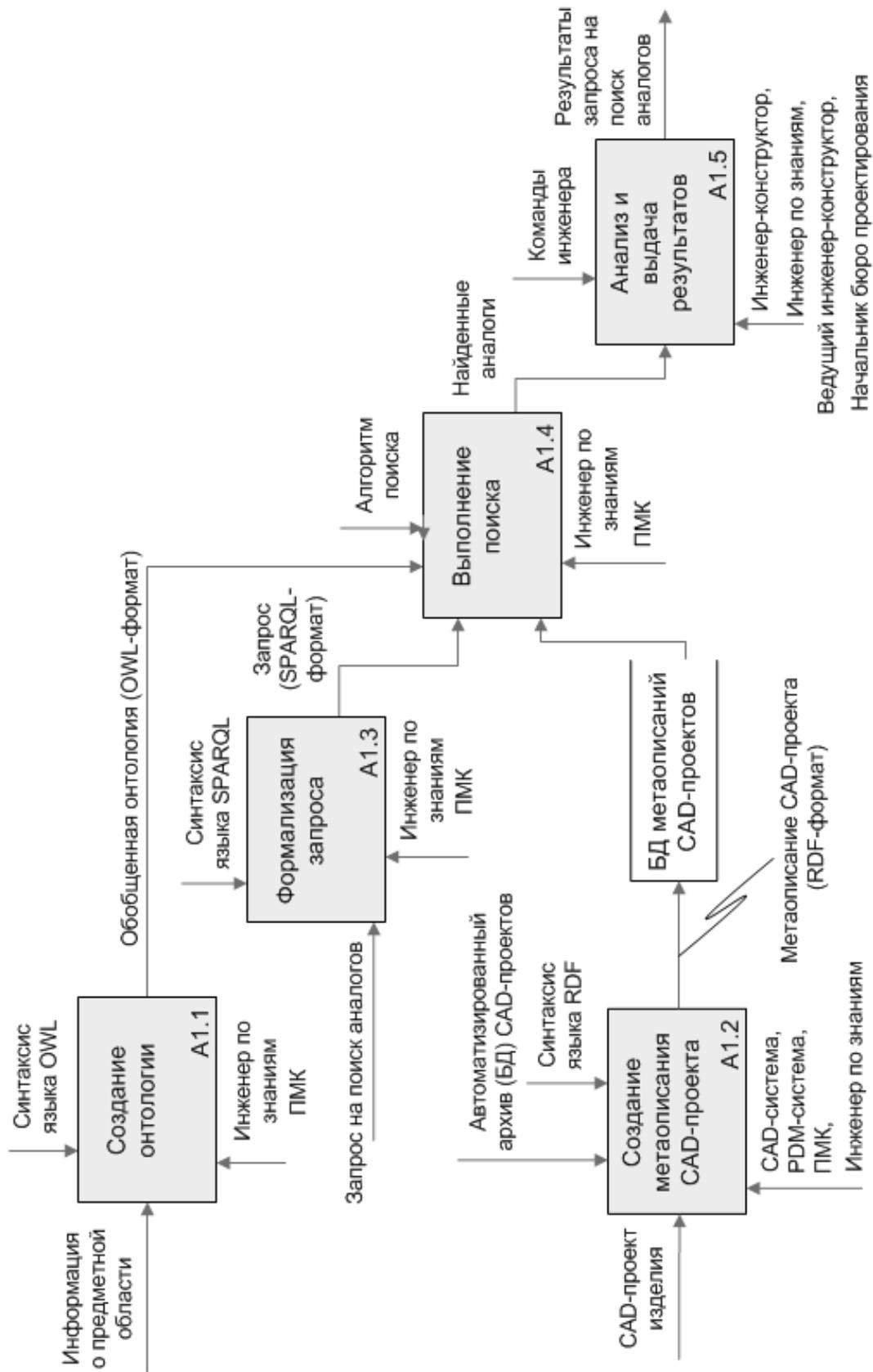


Рисунок 4.12 – Детализирующая диаграмма процесса «Поиск аналогов изделий в БД САД-проектов»

Таблица 4.5 – Описание подпроцессов для процесса «Поиск аналогов изделий в БД CAD-проектов»

№	Наименование операции (активности, деятельности)	Управление активностью		Вход	Выход	Исполнитель
		При каких условиях начинается	Чем регламентируется и завершается			
1	Создание онтологии	Получен запрос на создание онтологии	Синтаксис языка OWL	Информация о предметной области	Обобщенная онтология (OWL-формат)	Инженер по знаниям, ПМК
2	Создание метаописания CAD-проекта	Получен CAD-проект изделия	Автоматизированный архив (БД) CAD-проектов, синтаксис языка RDF	CAD-проект изделия	Метаописание CAD-проекта (RDF-формат)	Инженер по знаниям, ПМК, CAD-система, PDM-система,
3	Формализация запроса	Получен запрос на поиск аналогов	Синтаксис языка SPARQL	Запрос на поиск аналогов	Запрос (SPARQL-формат)	Инженер по знаниям, ПМК
4	Выполнение поиска	Получен запрос в SPARQL-формате	Синтаксис языка SPARQL	Запрос (SPARQL-формат)	Найденные аналоги	Инженер по знаниям, ПМК
5	Анализ выдачи результатов	В результате обработки запроса получены аналоги	Команды инженера	Найденные аналоги	Результаты запроса на поиск аналогов	Инженеры: конструктор; по знаниям, ведущий конструктор, начальник бюро проектирования

В соответствии с выполненным анализом процесса и методикой поиска аналогов в БД САД-проектов изделий машиностроения [132–135] определим требования к ПМК поиска аналогов изделий (элементов конструкции) на основе онтологического подхода. На рисунке 4.13 представлена диаграмма прецедентов поиска аналогов изделий [68; 121].

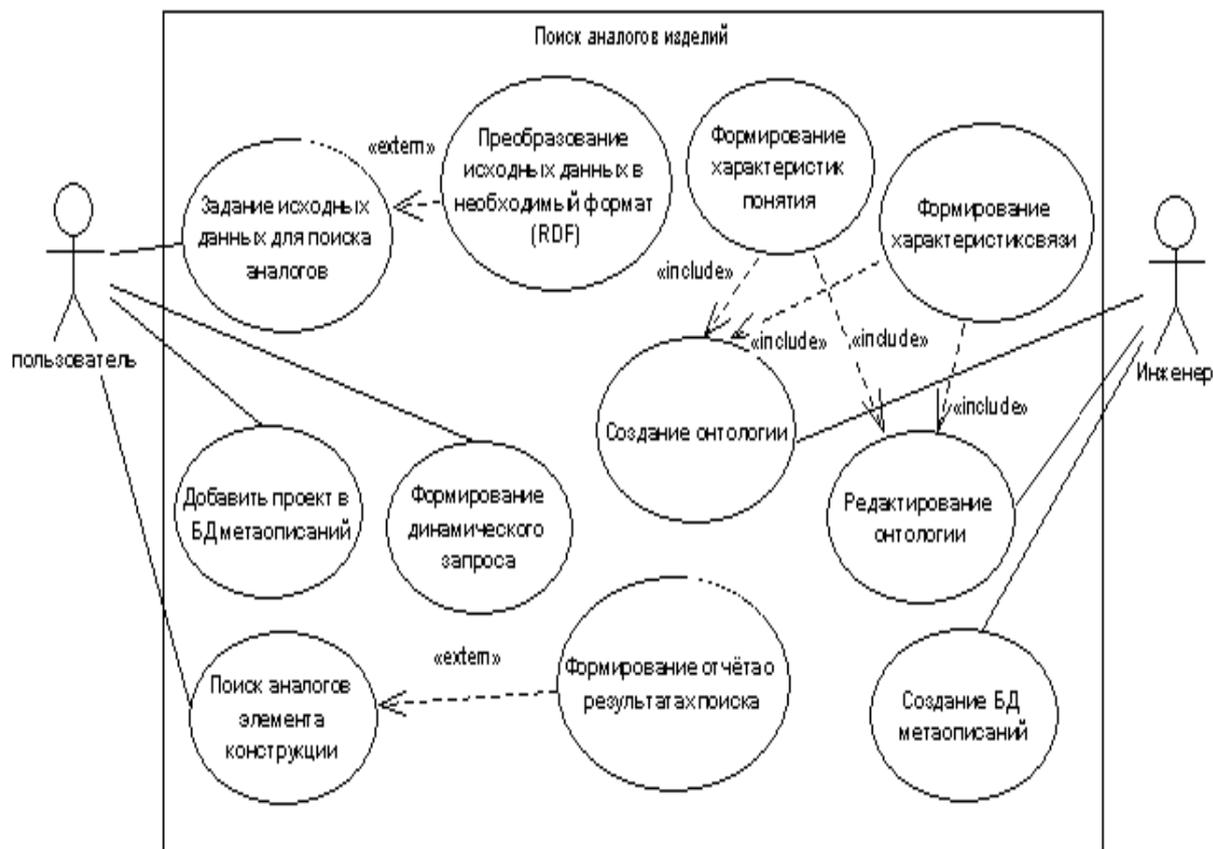


Рисунок 4.13 – Диаграмма прецедентов процесса поиска аналогов элементов конструкции

Основными прецедентами процесса поиска аналогов элементов конструкции при помощи онтологического подхода являются:

- создание онтологий, обеспечивающих процесс поиска (онтологии геометрических элементов, объектов SolidWorks, элементов машиностроительных изделий);
- преобразование исходных данных в необходимый формат, формирование запроса на поиск;
- поиск аналогов элементов конструкции.

Построение (редактирование, дополнение, удаление) онтологий выполняют: инженер, являющийся специалистом в предметной области машиностроительных изделий; инженер по знаниям в области моделей САД-систем (в данном случае – SolidWorks), общепринятых геометрических элементов. Прецедент «Преобразование исходных данных в необходимый

формат» включает в себя алгоритм формирования метаданных о запрашиваемом узле. Прецедент «Поиск аналогов» реализует алгоритм поиска аналогов полученного метаописания исходных данных путём обработки сформированного запроса.

Разрабатываемый ПМК предназначен также для автоматизации прецедента «Преобразование исходных данных в необходимый формат» и включает в себя следующие функциональные возможности:

- ввод исходных данных в формате САD-системы (модель) или текстовом описании;
- преобразование информации о заданном для поиска узле из формата САD-системы в текстовое метаописание, если есть необходимость;
- получение метаинформации о классификации элементов, их свойств и связей, входящих в узел в соответствии с существующими онтологиями;
- автоматическое формирование уникального запроса о требуемом аналоге узла конструкции;
- осуществление интеграции с САD Solidworks, конструктором онтологий Protégé, ПМК обработки запросов Corésé для их использования в качестве модулей ПМК.

Диаграмма классов ПМК поиска аналогов проектируемого узла в БД САD-моделей представлена на рисунке 4.14. Описание классов приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Описание классов ПМК поиска аналогов проектируемого узла в БД САD-моделей

Название	Назначение
1	2
1 Analog Searcher	Класс, контролирующий работу ПМК «AnalogSearcher», организующий совместную работу его модулей и обеспечивающий взаимодействие между ними
2 Converter	Включает в себя функционал преобразования САD-модели узла конструкции в текстовое описание, приведение текстового описания к формату метаданных на языке RDF
3 ConverterStrategy	Реализует конвертацию информации в формат RDF. Шаблон проектирования – “Strategy”
4 CADInterface	Реализует работу с интерфейсом САD-систем. Шаблон проектирования – “Facade”
5 SolidWorks Interface	Наследник класса CADInterface, реализует работу с САD-интерфейсом системы SolidWorks

Продолжение таблицы 4.6

1	2
6 Knowledge BaseInterface	Представляет собой класс, который реализует доступ к базе знаний. Шаблон проектирования – "Facade"
7 CoreseInterface	Наследник класса KnowledgeBaseInterface, реализует работу с интерфейсом программы обработки запросов Corese
8 OntologyInterface	Реализует доступ к модулю формирования онтологий. Шаблон проектирования – "Facade"
9 ProtégéInterface	Наследник класса OntologyInterface, реализует работу с интерфейсом редактора онтологий Protégé
10 QueryConstructor	Класс, реализующий методы построения динамических запросов к БД метаописаний CAD-проектов для поиска аналогов заданного узла

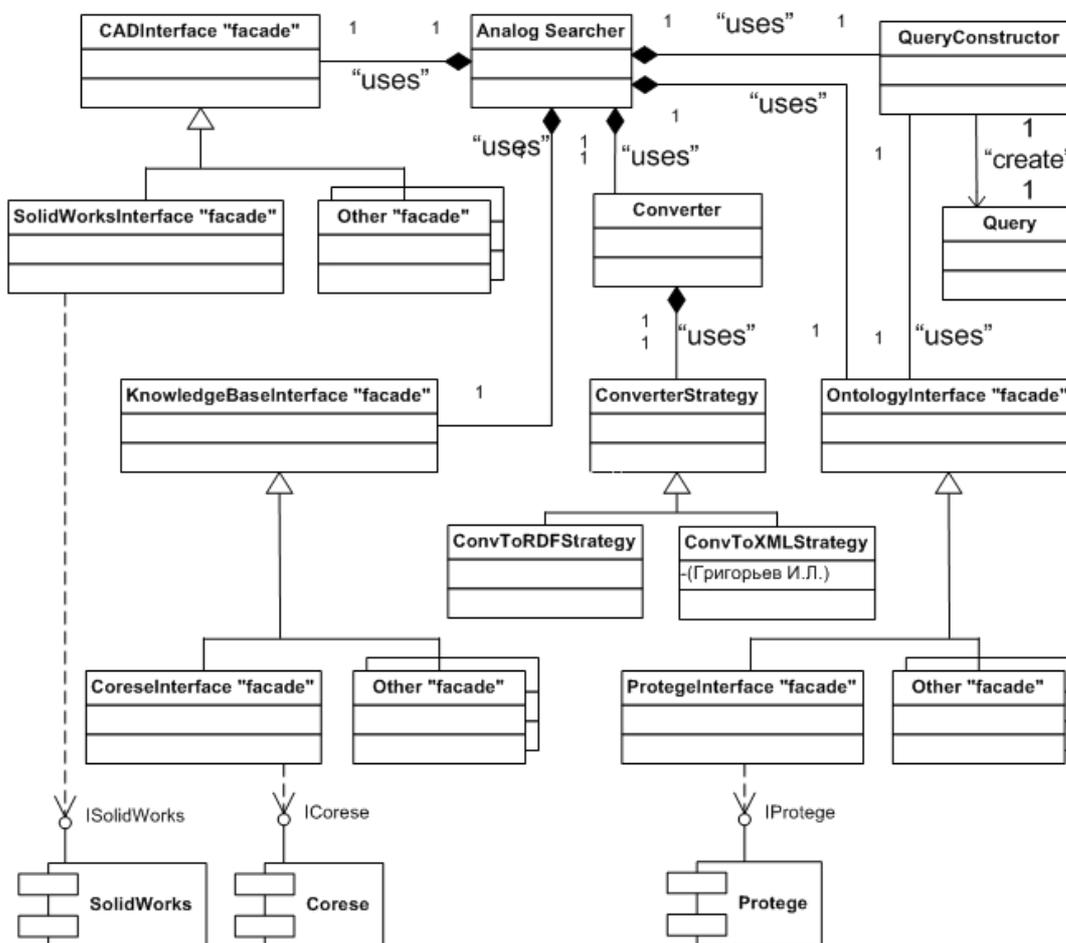


Рисунок 4.14 – Диаграмма классов программно-методического комплекса поиска аналогов проектируемого узла в БД CAD-моделей

Для примера рассмотрим преобразование исходной информации о проектируемом узле в RDF-формат. Диаграмма последовательностей выполнения прецедента «Преобразование исходных данных в метаописание» представлена на рисунке 4.15.

С помощью пользовательского интерфейса инженер вводит исходные данные – информацию о проектируемом узле. Объект класса AnalogSearcher динамически создает объект типа ConvToRDFStrategy, потом создается экземпляр класса Converter, которому передается ссылка на объект ConvToRDFStrategy. Исходная информация о проектируемом узле передается объекту класса Converter, который в свою очередь вызывает функцию «преобразовать» объекта ConvToRDFStrategy и передает ему ссылку на себя. Объект типа ConvToRDFStrategy запрашивает у объекта класса Converter исходную информацию о проектируемом узле и выполняет преобразование исходных данных в RDF-формат. Полученное метаописание на языке RDF возвращается объекту класса Converter, а затем – объекту типа AnalogSearcher.

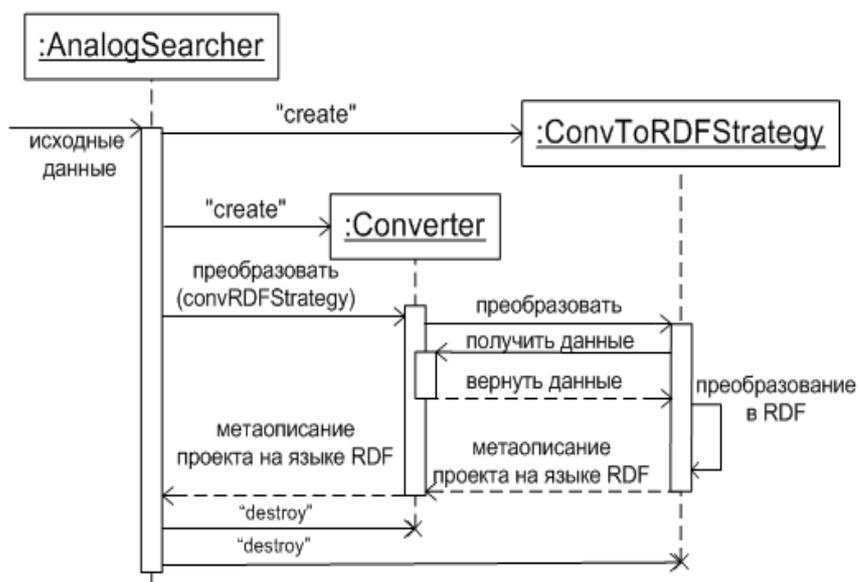


Рисунок 4.15 – Диаграмма последовательностей процесса преобразования исходных данных в метаописание (в RDF-формате)

4.4.2 Разработка физической модели ПМК поиска аналогов проектируемого узла в базе данных метаописаний САД-моделей

На этапе выделения модулей программно-методического комплекса поиска аналогов проектируемого узла в БД САД-моделей стоят задачи:

- распределить задачи по отдельным модулям системы;
- организовать управление базами данных;
- организовать управление глобальными ресурсами.

Построенная диаграмма модулей программно-методического комплекса поиска аналогов представлена на рисунке 4.15.

В таблице 4.7 представлено описание распределения задач по основным модулям, которые входят в систему.

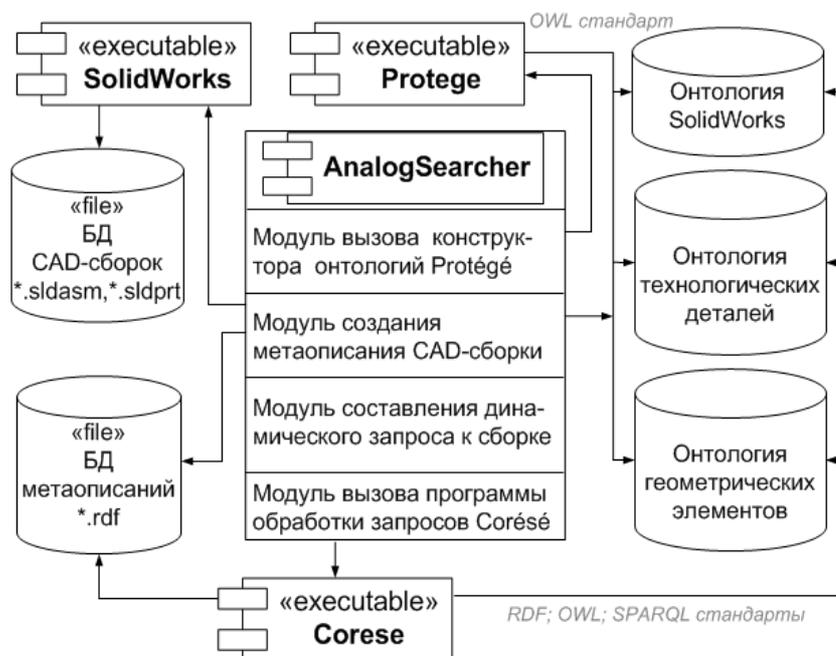


Рисунок 4.16 – Диаграмма модулей ПМК поиска аналогов проектируемого узла в БД CAD-моделей (сборок)

Таблица 4.7 – Функциональные модули системы выполнения процесса поиска аналогов проектируемого узла

Название	Назначение
Модуль создания метаописания CAD- модели	В данном модуле осуществляется интеграция с CAD SolidWorks, преобразование CAD-модели (детали, узла) в метаописание в соответствии с существующими онтологиями
Модуль вызова конструктора онтологий Protégé	Модуль осуществляет соединение с конструктором онтологий Protégé, что позволяет создавать новые онтологии, редактировать, дополнять уже существующие
Модуль вызова программы обработки запросов Corésé	Выполняется интеграция с программой обработки запросов Corésé, которая позволяет реализовать обработку запроса (сформированного в модуле составления динамического запроса к сборке), поиск аналогов метаописания искомой модели (полученного в модуле создания метаописания CAD-модели) в БД существующих метаописаний
Модуль составления динамического запроса к БД метаописаний	Модуль позволяет динамически формировать уникальный запрос к полученным метаданным, что обеспечивает поиск аналогов проектируемого узла в БД существующих метаописаний

Информационной базой разрабатываемого программного продукта будут являться трехмерные (3D) модели, созданные в САD-системах, предназначенные для анализа и преобразования в метаописание данных о проектах, а также база знаний в виде онтологий, которые будут содержать необходимые данные предметной области. В информационную базу также войдут правила формирования запросов, основанные на информации, хранящейся в построенных онтологиях. Более подробное описание информационного обеспечения программно-методического комплекса представлено в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Информационное обеспечение ПМК поиска аналогов проектируемого узла в БД САD-моделей

Наименование	Назначение	Способы хранения
1 Онтология системы SolidWorks	Представляет собой модель объектной системы SolidWorks	Файл в формате OWL на постоянном носителе
2 Онтология геометрических элементов	Иерархическая структура, включающая в себя основные геометрические фигуры (линейные, плоские, объемные) в соответствии с классификаторами, являющимися мировыми стандартами	Файл в формате OWL на постоянном носителе
3 Онтология машиностроительных деталей	Классификация машиностроительных деталей, их свойств, связей между ними, основанная на общепринятых стандартах: ГОСТы, ЕСКД	Файл в формате OWL на постоянном носителе
4 БД САD-моделей изделий	Представляют собой коллекцию существующих, вошедших в архив конструктора узлов, хранящихся в виде САD-моделей	Файлы в формате САD-систем на постоянном носителе
5 БД метаописаний моделей (сборок)	Представляют собой коллекцию существующих, вошедших в архив конструктора узлов, хранящихся в формате метаописания	Файлы в формате RDF на постоянном носителе
6 Набор правил для формирования запросов	Конечный набор правил, в соответствии с которыми будут формироваться запросы к БД метаописаний	На постоянном носителе

4.4.3 Синтаксис формирования правил для поиска аналогов изделия в базе данных метаописаний

Для формирования запроса может быть использована любая информация, содержащаяся в онтологиях предметных областей, запрос может быть составлен как по одному параметру модели, так и по любому другому количеству параметров. Операторы, которые могут быть использованы при составлении запроса, представлены в таблице 4.9 [157].

Таблица 4.9 – Операторы, которые могут быть использованы при составлении запроса

Оператор	Описание оператора
prefix ont: <http://www.semanticweb.org/ontologies/2008/4/Sld tar.owl>	Создание ссылки с именем ont на онтологию, расположенную в http://www.semanticweb.org/ontologies/2008/4/Sld tar.owl
select ?Mate ?Ent1 ?Ent2	После выполнения запроса вывести данные, содержащиеся в полях переменных ?Mate, ?Ent1, ?Ent2 найденных объектов
?Mate rdf:type ont:Mate	Объявление переменной ?Mate типа данных Mate онтологии ont
?Mate ont:hasType ?Type	Объявление переменной ?Type типа данных hasType онтологии ont, класс-наследник ?Mate
filter (regex(?Type, "CONC", "i"))	Отбор ведется по совпадению значения переменной ?Type с константой "CONC"

Для создания и исследования примеров возможных запросов рассмотрим конструкцию, представляющую собой узел вала, соединенного шпонкой и стопорным кольцом с коническим колесом. Данная конструкция в разрезе показана на рисунке 4.17.

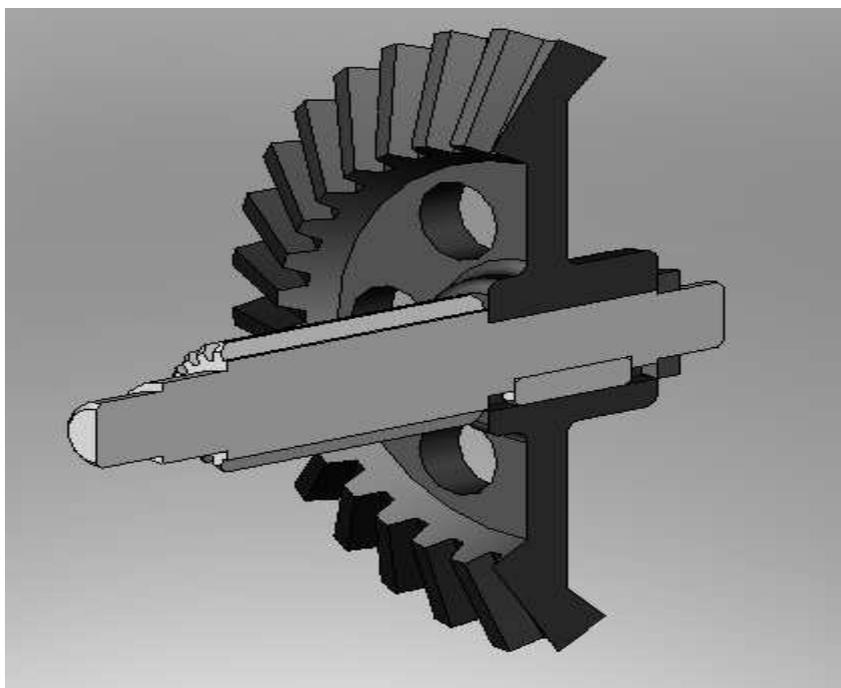


Рисунок 4.17 – CAD-модель конструкции узла вала с коническим колесом

Максимально-развернутый запрос, включающий проверку по всем доступным параметрам метаописания сборки, приведен на рисунке 4.18. Требуется найти все связи типа «Совпадение», где одна деталь – «Вал», а другая – «Коническое колесо», детали связаны по плоским поверхностям.

```
1 prefix ont:<http://www.semanticweb.org/ontologies/2008/4/Sld tar.owl>
2 select ?Mate ?Ent1 ?Ent2 ?EntityType1 ?EntityType2 ?EntElemType1 ?Ent-
3 tElemType2 ?hasFaceType1 ?hasFaceType2
4 where
5 {
6 ?Mate rdf:type ont:Mate
7 ?Mate ont:hasType ?Type
8 filter (regex(?Type, "COINCIDENT","i"))
9 ?Mate ont:Entity1 ?Ent1
10 ?Mate ont:Entity2 ?Ent2
11 ?Ent1 ont:hasEntityType ?EntityType1
12 ?Ent2 ont:hasEntityType ?EntityType2
13 filter((regex(?EntityType1, "Коническое
14 колесо","i")&&regex(?EntityType2, "Вал","i"))||
15 (regex(?EntityType1, "Вал","i")&&regex(?EntityType2, "Коническое
16 колесо","i")))
17 ?Ent1 ont:hasElementType ?EntElemType1
18 ?Ent2 ont:hasElementType ?EntElemType2
19 filter ((re-
20 gex(?EntElemType1,"Face","i")&&regex(?EntElemType2,"Face","i"))||
21 (re-
22 gex(?EntElemType1,"Face","i")&&regex(?EntElemType2,"Face","i")))
23 ?Ent1 ont:Face ?EntFace1
24 ?Ent2 ont:Face ?EntFace2
25 ?EntFace1 ont:hasFaceType ?hasFaceType1
26 ?EntFace2 ont:hasFaceType ?hasFaceType2
27 filter ((re-
28 gex(?hasFaceType1,"Plane","i")&&regex(?hasFaceType2,"Plane","i"))||
29 (re-
30 gex(?hasFaceType1,"Plane","i")&&regex(?hasFaceType2,"Plane","i")))
31 }
```

Рисунок 4.18 – Листинг запроса с использованием всех возможных (допустимых) критериев отбора по параметрам метаописания сборки

Пронумеруем строки запроса на поиск конструктивного аналога и прокомментируем его более детально.

В строке № 1 создаётся ссылка на онтологию, на основе которой будет вестись поиск (Sld tar.owl). В строках № 2...3 указываются данные, которые нужно будет вывести о полученных в результате поиска аналогах. В данном запросе это тип связи (?Mate), наименование детали № 1 (?Ent1), наименование детали № 2 (?Ent2), тип детали № 1 (?EntType1), тип детали № 2 (?EntType2), тип сопрягаемого элемента детали № 1 (?EntElemType1), тип сопрягаемого элемента детали № 2 (?EntElemType2), тип сопрягаемой поверхности детали № 1 (?hasFaceType1), тип сопрягаемой поверхности детали № 2 (?hasFaceType2).

В строке № 6 объявляется переменная ?Mate с типом данных Mate онтологии ont. В строках 7, 9...12, 14, 15, 17...20 объявляются переменные – свойства классов, на первой позиции – имя класса-наследника, на второй – имя самого свойства, на третьей – имя экземпляра свойства. Имя класса-наследника и имя самого свойства описаны в онтологии Sld tar.owl.

В строках № 8, 13, 16 и 21 описываются условия, в соответствии с которыми будет проводиться поиск. Строка № 8 проверяет тип соединения, если тип проверяемой связи «Совпадение», то функция regex (функция сравнения двух строк) возвращает положительный результат. Аналогично в строках № 13, 16 и 21 ведется проверка типа деталей («Вал», «Коническое колесо»), типа сопрягаемого элемента деталей («Поверхность») и типа поверхности деталей соответственно («Плоская поверхность»). Результаты поиска можно отображать в формате метаописания (рис. 4.19) или в виде САД-модели (рис. 4.20).

```
<result>
<binding name='Mate'><uri> Mate8</uri></binding>
<binding name='Ent1'><uri> Entity15</uri></binding>
<binding name='Ent2'><uri> Entity16</uri></binding>
<binding name='EntType1'><uri>Вал</uri></binding>
<binding name='EntType2'><uri>Коническое колесо</uri></binding>
<binding name='EntElemType1'><uri>Face</uri></binding>
<binding name='EntElemType2'><uri>Face</uri></binding>
<binding name='hasFaceType1'><uri>Plane</uri></binding>
<binding name='hasFaceType2'><uri>Plane</uri></binding>
</result>
```

Рисунок 4.19 – Результаты поиска в формате метаописания

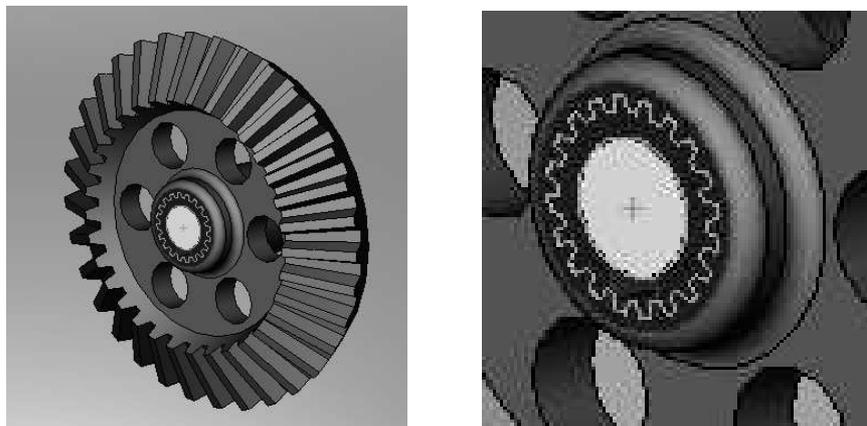


Рисунок 4.20 – Результаты поиска в формате CAD-модели

4.4.4 Описание интерфейса и этапов работы ПМК

Для осуществления интерактивного управления процессом поиска создан ПМК, позволяющий пользователю использовать реализованную функциональность. Интерфейс главной формы ПМК поиска аналогов изделий показан на рисунке 4.21. Для выполнения процесса поиска аналогов изделий необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1 Если есть необходимость редактирования либо создания новой онтологии, пользователю нужно выбрать пункт «Редактор онтологий» главного меню. После нажатия этого пункта меню будет вызван java-редактор онтологий Protégé (рис. 4.22).

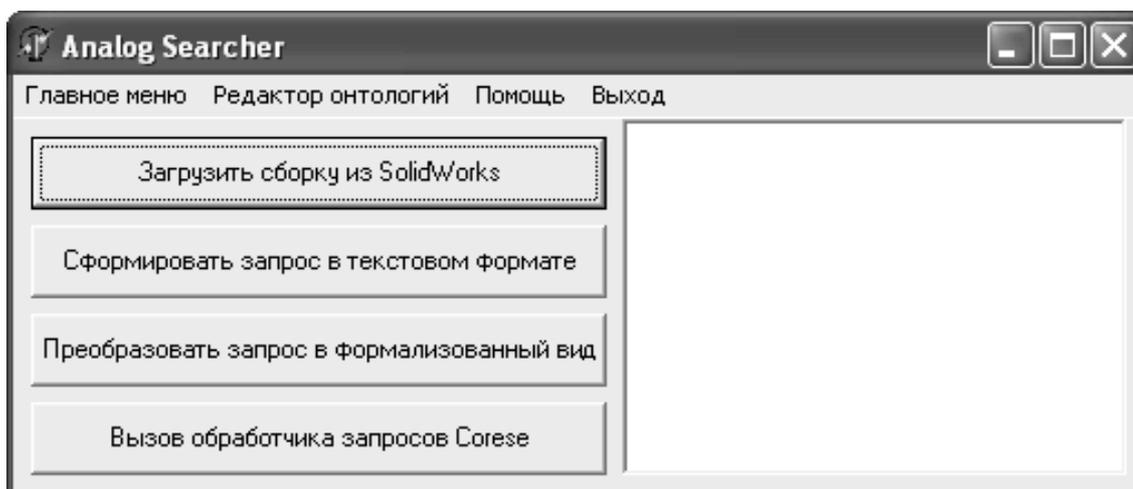


Рисунок 4.21 – Интерфейс главной формы ПМК поиска аналогов изделий

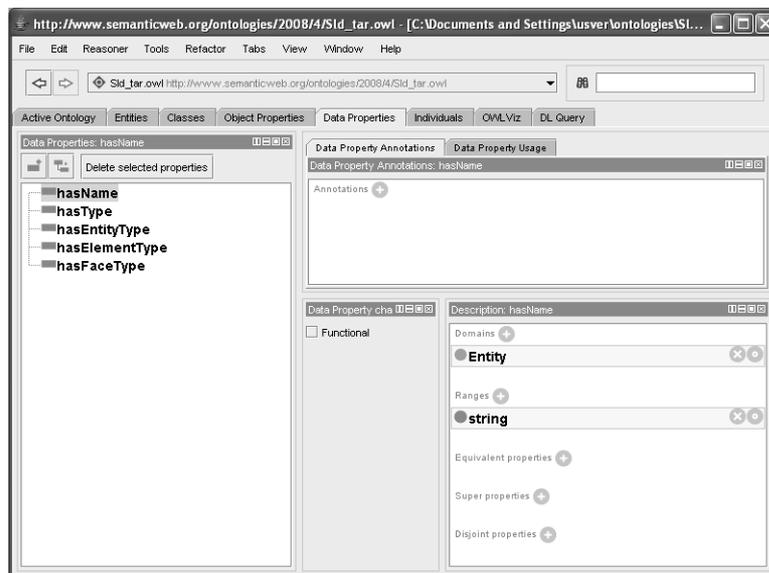


Рисунок 4.22 – Интерфейс редактора онтологий Protégé

2 В случае, если онтологии предметной области уже сформированы, пользователь должен ввести исходные данные о проектируемом узле в ПМК. Ввод данных можно осуществить двумя способами:

– в виде CAD-модели, нужно выбрать пункт «Загрузить сборку из SolidWorks», условием корректного выполнения этого пункта является активированная CAD-система SolidWorks;

– в виде текстовой информации, необходимо выбрать пункт «Сформировать запрос в текстовом формате», откроется диалоговое окно формирования текстового описания связи (рис. 4.23), где нужно будет выбрать вид связи и типы деталей, которые в неё входят.

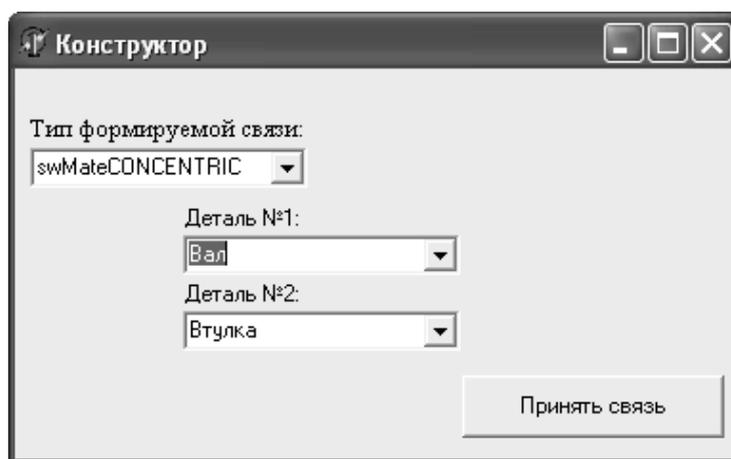


Рисунок 4.23 – Диалоговое окно формирования текстового описания связи

3 Независимо от того, в каком виде введена исходная информация, необходимо выполнить пункт «Преобразовать запрос в формализованный вид», который использует модуль преобразования исходных данных в формат метаданных на языке RDF.

4 Далее следует выбрать пункт «Вызов обработчика запросов» Corese (рис. 4.24), где необходимо будет ввести файл онтологии (в формате OWL), файл полученного метаописания (в формате RDF) и файл запроса (в формате SPARQL), в виде результатов пользователю будут предложены метаописания найденных аналогов проектируемого изделия.

4.5 Результаты исследования поиска аналогов элементов конструкций

Рассмотрим примеры различных сборочных узлов и вариантов запросов, необходимых для поиска аналогов элементов конструкций различной сложности.

Сборка узла «Ролик», которая содержит массив однотипных деталей (болты, шайбы), приведена на рисунке 4.25.

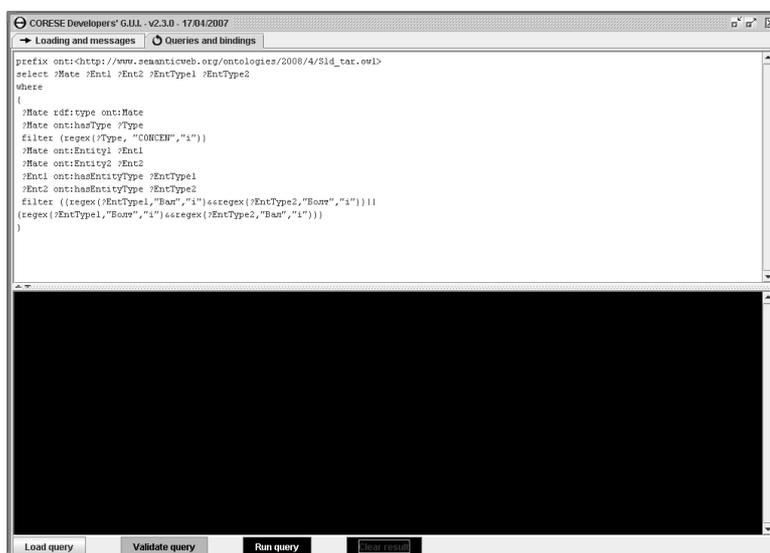


Рисунок 4.24 – Интерфейс ПМК обработки запросов Corese

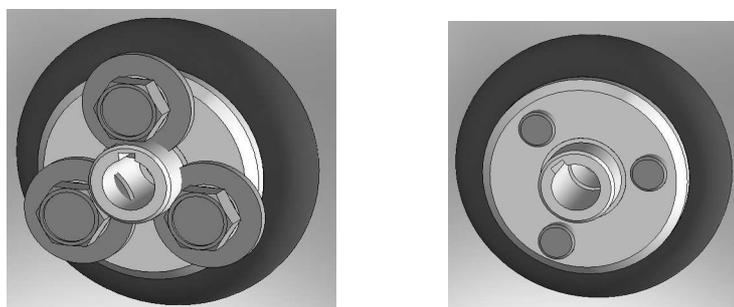


Рисунок 4.25 – Внешний вид проекта узла «Ролик»

Состав CAD-модели узла «Ролик» (дерево сборки SolidWorks) приведен на рисунке 4.26.

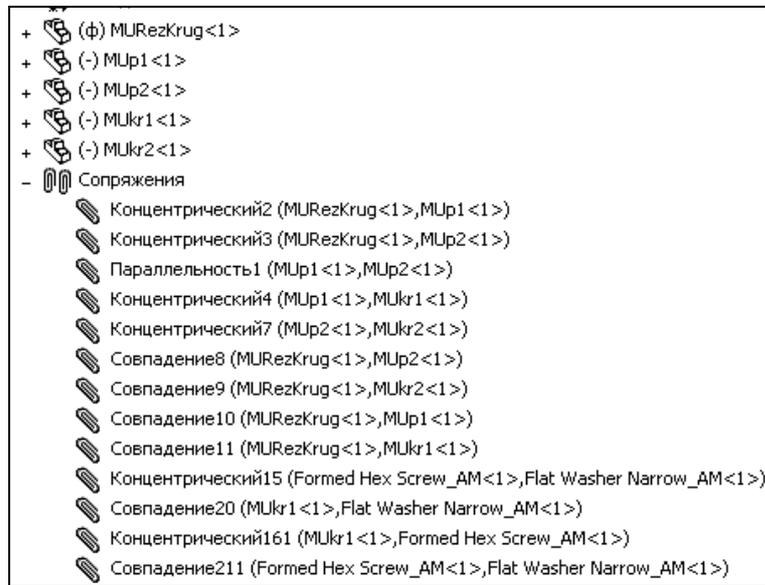


Рисунок 4.26 – Состав CAD-модели узла «Ролик»

В CAD-модели узла «Ролик» присутствуют детали следующих типов:

- тип деталей {MUp1, MUp2, MUKr1, MUKr2, MURezKrug} – «Вал»;
- тип деталей {Flat Washer Narrow AM} – «Шайба»;
- тип деталей {Formed Hex Screw AM} – «Болт».

Сформируем запрос, позволяющий найти все связи концентрического типа между болтами и валами. Текст формализованного запроса имеет вид: тип связи «Концентрический», деталь 1 «Вал», деталь 2 «Болт». Запрос на языке SPARQL приведен на рисунке 4.27.

```

prefix ont:<http://www.semanticweb.org/ontologies/2008/4/Sld tar.owl>
select ?Mate ?Ent1 ?Ent2 ?EntityType1 ?EntityType2
where{
  ?Mate rdf:type ont:Mate
  ?Mate ont:hasType ?Type
  filter (regex(?Type, "CONCEN","i"))
  ?Mate ont:Entity1 ?Ent1
  ?Mate ont:Entity2 ?Ent2
  ?Ent1 ont:hasEntityType ?EntityType1
  ?Ent2 ont:hasEntityType ?EntityType2
  filter ((regex(?EntityType1,"Вал","i")&&regex(?EntityType2,"Болт","i"))||
(regex(?EntityType1,"Болт","i")&&regex(?EntityType2,"Вал","i")))
}

```

Рисунок 4.27 – Запрос к узлу «Ролик» (метаописанию) на языке SPARQL

Результаты обработки полученного запроса представлены в формате метаописания (рис. 4.28) и в виде CAD-модели (рис. 4.29).

```
<result>
  <binding name='Mate'><uri> Mate12</uri></binding>
  <binding name='Ent1'><uri> Entity23</uri></binding>
  <binding name='Ent2'><uri> Entity24</uri></binding>
  <binding name='EntType1'><uri>Вал</uri></binding>
  <binding name='EntType2'><uri>Болт</uri></binding>
</result>
```

Рисунок 4.28 – Результаты обработки полученного запроса в формате метаописания

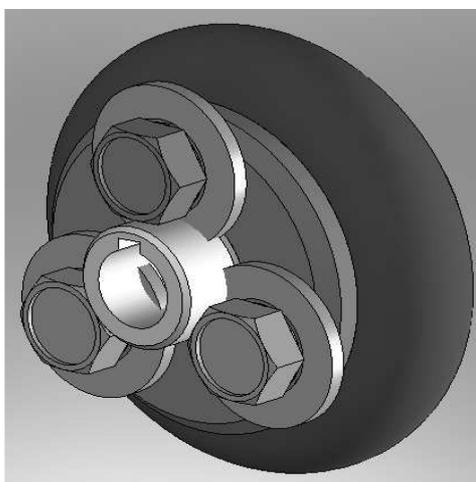


Рисунок 4.29 – Результаты обработки полученного запроса в виде CAD-модели

Составим еще один запрос к сборке «Ролик»: найти все шайбы в сборке. Текст формализованного запроса имеет вид: деталь 1 «Шайба». Запрос на языке SPARQL приведен на рисунке 4.30.

```
prefix ont:<http://www.semanticweb.org/ontologies/2008/4/Sld tar.owl>
select *
where
{
  ?Ent1 ont:hasEntityType ?EntType1
  filter (regex(?EntType1, "Shaiba", "i"))
}
```

Рисунок 4.30 – Запрос к узлу «Ролик» на языке SPARQL

Результаты обработки полученного запроса в формате метаописания представлены на рисунке 4.31.

```
<result>
  <binding name='Ent1'><uri> Entity26</uri></binding>
</result>
<result>
  <binding name='Ent1'><uri> Entity22</uri></binding>
</result>
<result>
  <binding name='Ent1'><uri>Entity20</uri></binding>
</result>
```

Рисунок 4.31 – Результаты обработки полученного запроса в формате метаописания

Сборка узла «Крышка редуктора», которая содержит массив однотипных деталей (болты, шайбы), приведена на рисунке 4.32.

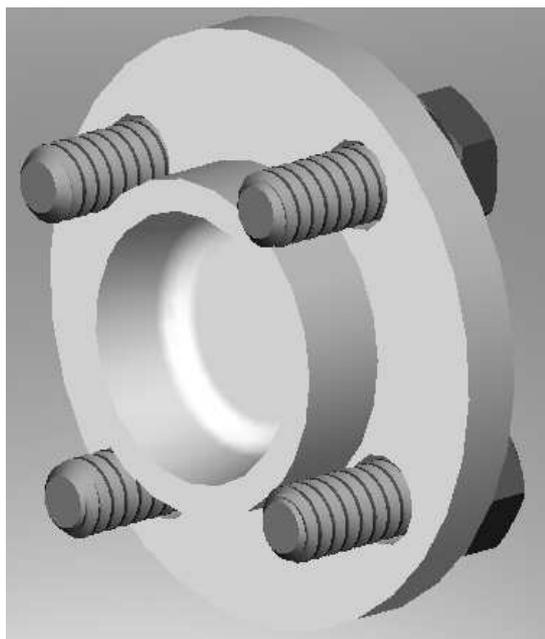


Рисунок 4.32 – Внешний вид проекта узла «Крышка редуктора»

Состав САД-модели узла «Крышка редуктора» (дерево сборки SolidWorks) приведен на рисунке 4.33.

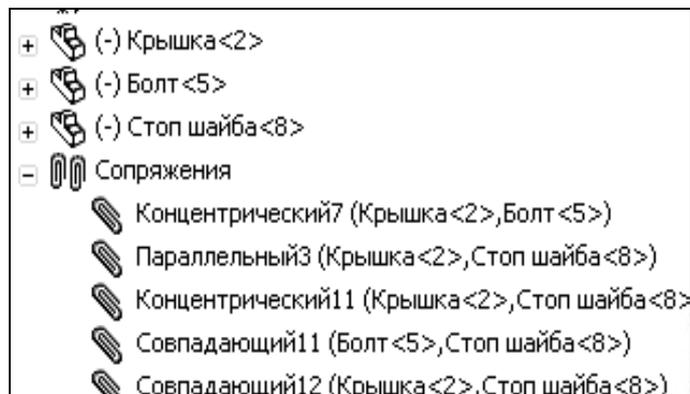


Рисунок 4.33 – Состав CAD -модели узла «Крышка редуктора»

Сформируем запрос, позволяющий найти все крышки с типом связи: параллельный. Текст формализованного запроса имеет вид: тип связи «Параллельность», деталь 1 «Крышка». Запрос на языке SPARQL приведен на рисунке 4.34.

Результаты обработки полученного запроса представлены в формате мета описания (рис. 4.35) и в виде CAD-модели (рис. 4.36).

```

prefix ont:<http://www.semanticweb.org/ontologies/2008/4/Sld tar.owl>
select *
where{
  ?Mate rdf:type ont:Mate
  ?Mate ont:hasType ?Type
  filter (regex(?Type, "CONC","i"))
  ?Mate ont:Entity1 ?Ent1
  ?Ent1 ont:hasEntityType ?EntType1
  filter (regex(?EntType1, "Крышка","i"))
}

```

Рисунок 4.34 – Запрос к узлу «Крышка редуктора» на языке SPARQL

```

<result>
  <binding name='Mate'><uri> Mate2</uri></binding>
  <binding name='Type'><uri>swMatePARALLEL</uri></binding>
  <binding name='Ent1'><uri> Entity3</uri></binding>
  <binding name='EntType1'><uri>Крышка</uri></binding>
</result>

```

Рисунок 4.35 – Результаты обработки полученного запроса в формате метаописания

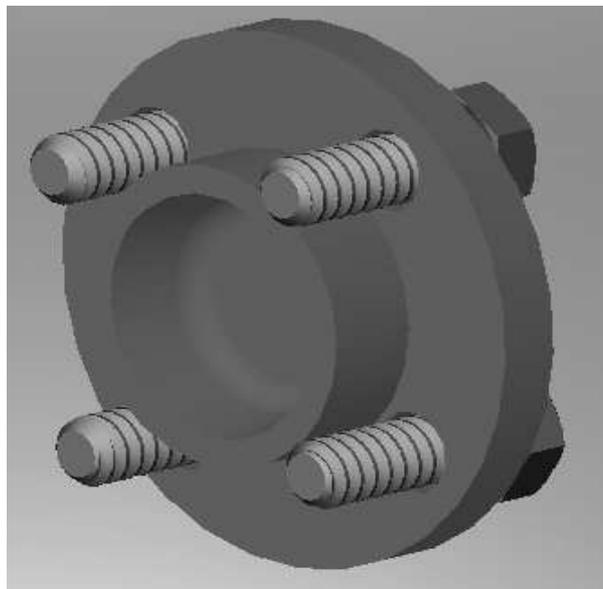
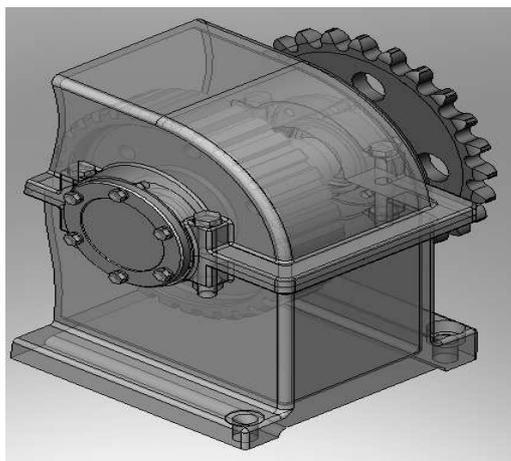
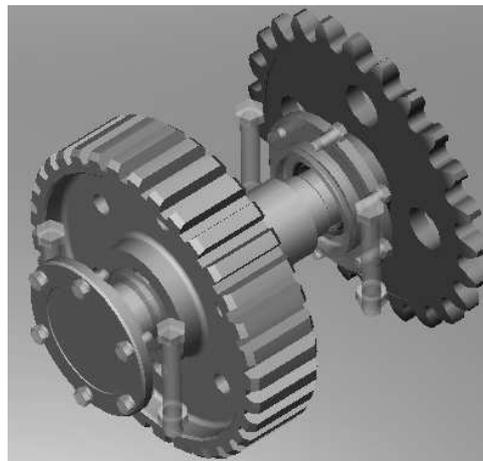


Рисунок 4.36 – Результаты обработки полученного запроса в виде CAD-модели

Сборка узла «Редуктор», которая содержит массив однотипных деталей (болты, шайбы), приведена на рисунке 4.37.



а



б

Рисунок 4.37 – Внешний вид проекта узла «Редуктор»

Состав CAD-модели узла «Редуктор» (дерево сборки SolidWorks) приведен на рисунке 4.38.

Сформируем запрос, позволяющий найти все детали, концентрично связанные с валом. Текст формализованного запроса имеет вид: тип связи «Концентричность», Деталь 1 «Вал». Запрос на языке SPARQL приведен на рисунке 4.39.

Исходная точка	Сопряжения
+ (-) вал<1>	Совпадающий6 (вал<1>,шпонка под звездочку<1>)
+ (-) шпонка под звездочку<1>	Концентрический1 (вал<1>,колесо<1>)
+ (-) шпонка под колесо<1>	Концентрический2 (вал<1>,кольцо_большое<1>)
+ (-) колесо<1>	Совпадающий7 (вал<1>,колесо<1>)
+ (-) кольцо_большое<1>	Совпадающий10 (шпонка под колесо<1>,колесо<1>)
+ крышка<1>	Совпадающий11 (вал<1>,колесо<1>)
+ корпус<1>	Совпадающий17 (корпус<1>,Сверху)
+ (-) крышка глухая<1>	Концентрический7 (крышка<1>,корпус<1>)
+ крышка с отверстием<1>	Концентрический8 (крышка<1>,корпус<1>)
+ (-) кольцо_малое<1>	Концентрический10 (корпус<1>,крышка глухая<1>)
+ (-) шайба10<1>	Концентрический11 (корпус<1>,крышка с отверстием<1>)
+ (-) болт10<1>	Концентрический12 (корпус<1>,крышка с отверстием<1>)
+ (-) болт10<7>	Концентрический13 (вал<1>,кольцо_малое<1>)
+ (-) шайба10<7>	Концентрический15 (вал<1>,крышка глухая<1>)
+ (-) болт16<1>	Совпадающий22 (шайба10<1>,болт10<1>)
+ (-) шайба16<1>	Концентрический16 (шайба10<1>,болт10<1>)
+ (-) гайка16<1>	Концентрический18 (крышка глухая<1>,болт10<1>)
+ (-) звездочка<1>	Концентрический19 (болт10<7>,шайба10<7>)
+ (-) гайка шлицевая<1>	Совпадающий23 (болт10<7>,шайба10<7>)
+ (-) манжета<1>	Концентрический20 (крышка с отверстием<1>,болт10<7>)
	Концентрический22 (крышка<1>,болт16<1>)
	Концентрический24 (корпус<1>,гайка16<1>)
	Концентрический25 (корпус<1>,шайба16<1>)
	Совпадающий25 (шайба16<1>,гайка16<1>)

Концентрический25 (корпус<1>,шайба16<1>)
Совпадающий25 (шайба16<1>,гайка16<1>)
Совпадающий26 (корпус<1>,Сверху)
Совпадающий27 (Справа,корпус<1>)
Совпадающий28 (корпус<1>,Спереди)
Совпадающий29 (колесо<1>,кольцо_большое<1>)
Концентрический26 (вал<1>,звездочка<1>)
Параллельный2 (шпонка под звездочку<1>,звездочка<1>)
Совпадающий33 (вал<1>,звездочка<1>)
Концентрический27 (вал<1>,гайка шлицевая<1>)
Совпадающий34 (звездочка<1>,гайка шлицевая<1>)
Концентрический28 (крышка с отверстием<1>,манжета<1>)
Совпадающий35 (крышка с отверстием<1>,манжета<1>)
Концентрический29 (вал<1>,шпонка под колесо<1>)
Совпадающий36 (вал<1>,шпонка под колесо<1>)
Концентрический30 (вал<1>,шпонка под звездочку<1>)
Совпадающий37 (вал<1>,шпонка под звездочку<1>)
Совпадающий38 (крышка<1>,корпус<1>)
Совпадающий39 (крышка<1>,болт16<1>)
Совпадающий40 (корпус<1>,шайба16<1>)
Совпадающий41 (крышка<1>,крышка глухая<1>)
Совпадающий42 (крышка<1>,крышка с отверстием<1>)
Совпадающий43 (крышка глухая<1>,шайба10<1>)
Совпадающий44 (крышка с отверстием<1>,шайба10<7>)

Рисунок 4.38 – Состав CAD -модели узла «Редуктор»

```

prefix ont:<http://www.semanticweb.org/ontologies/2008/4/Sld tar.owl>
select *
where {
    ?Mate rdf:type ont:Mate
    ?Mate ont:hasType ?Type
    filter (regex(?Type, "CONC", "i"))
    ?Mate ont:Entity1 ?Ent1
    ?Ent1 ont:hasEntityType ?EntityType1
    filter (regex(?EntityType1, "вал", "i"))
}

```

Рисунок 4.39 – Запрос к узлу «Редуктор» (метаописанию) на языке SPARQL

Результаты обработки полученного запроса в формате метаописания представлены на рисунке 4.40.

```
<result> <binding name='Mate'><uri> Mate38</uri></binding>
<binding name='Type'><uri>swMateCONCENTRIC</uri></binding>
<binding name='Ent1'><uri> Entity75</uri></binding>
<binding name='EntType1'><uri>вал</uri></binding> </result>
<result> <binding name='Mate'><uri> Mate36</uri></binding>
<binding name='Type'><uri>swMateCONCENTRIC</uri></binding>
<binding name='Ent1'><uri> Entity71</uri></binding>
<binding name='EntType1'><uri>вал</uri></binding> </result>
<result> <binding name='Mate'><uri> Mate32</uri></binding>
<binding name='Type'><uri>swMateCONCENTRIC</uri></binding>
<binding name='Ent1'><uri> Entity63</uri></binding>
<binding name='EntType1'><uri>вал</uri></binding> </result>
<result> <binding name='Mate'><uri>Mate14</uri></binding>
<binding name='Type'><uri>swMateCONCENTRIC</uri></binding>
<binding name='Ent1'><uri> Entity27</uri></binding>
<binding name='EntType1'><uri>вал</uri></binding> </result>
<result> <binding name='Mate'><uri> Mate13</uri></binding>
<binding name='Type'><uri>swMateCONCENTRIC</uri></binding>
<binding name='Ent1'><uri> Entity25</uri></binding>
<binding name='EntType1'><uri>вал</uri></binding> </result>
```

Рисунок 4.40 – Результаты обработки полученного запроса в формате метаописания

Таким образом, составлены и проверены различные запросы на языке SPARQL к метаописаниям ряда CAD-моделей изделий машиностроения различной сложности. Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенная информационная технология и методика поиска на основе онтологического подхода может эффективно применяться при проектировании изделий машиностроения. Анализ результатов поиска по типу детали и видам связи показал, что они полностью релевантны запросу.

Для исследования времени, необходимого для выполнения запроса, осуществляли поиск деталей, концентрично связанных с валом. В качестве RDF-файла для поиска использовали файл сборки редуктора, метаописание которого составляет 1 035 строк. Увеличение объема метаданных производили путём копирования информации о редукторе в один файл. Время измерялось с помощью внутреннего таймера компьютера. Суммарное время выполнения поиска состоит из времени загрузки входного RDF-файла и времени обработки запроса, затраченного на обработку файла в процессе поиска аналогов.

Анализ показал, что изменение общего времени обработки запроса на поиск деталей, концентрично связанных с валом, от объема обрабатываемого файла метаданных меняется по закону, близкому к линейному в исследованном диапазоне (до 200 тысяч строк).

Таким образом, на основе реализованного ПМК для поиска аналогов в базе данных CAD-проектов машиностроительного предприятия разработаны и проверены типовые запросы к метаописаниям различных изделий.

Выводы по разделу 4

1 Разработана структура метаинформации о CAD-моделях различных изделий, обеспечивающая автоматизацию поиска аналогов изделий в базе данных CAD-проектов машиностроительного предприятия.

2 Разработаны фрагменты частных онтологий: онтология геометрических элементов, онтология машиностроительных изделий, онтология SolidWorks.

3 Разработана информационная технология и методика поиска аналогов узлов конструкций в базе данных существующих метаописаний CAD-проектов (сборок), которая позволяет формализовать поиск и повысить релевантность результатов на основе использования программных инструментов работы с онтологиями и онтологическими метаописаниями сборок. Информационная технология включает следующие основные этапы:

- автоматизированная конвертация базы CAD-моделей в базу метаописаний выполнена на основе интеграции с CAD-системой SolidWorks, изучены и использованы функции и возможности SolidWorks API;

- создание машиностроительной онтологии, объединенной с онтологией CAD-системы для совместного использования в формате OWL;

- формирование запросов на языке SPARQL на поиск аналогов изделий в БД метаописаний в формате RDF;

- автоматизированный поиск аналогов в БД метаописаний CAD-проектов на основе онтологического подхода.

4 Разработан и реализован проект ПМК для поиска аналогов в базе данных метаописаний CAD-проектов машиностроительного предприятия.

5 Исследованы типовые запросы к метаописаниям изделий, время обработки запроса растёт с увеличением объема обрабатываемой метаинформации: для обработки 200 тысяч строк требуется примерно 40 секунд).

РАЗДЕЛ 5

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

5.1 Использование онтологий для разработки информационного обеспечения оперативного планирования

Целью исследования является повышение качества информационного обеспечения для автоматизации процесса оперативного планирования (ОП) в машиностроении с применением онтологического подхода.

Для единичного производства характерна большая номенклатура выпускаемых изделий. Выполнение технологических операций в общем комплексе производственного процесса осуществляется в основном последовательно, что и обуславливает соответствующий производственный цикл. Разнообразию в номенклатуре продукции, часто изменяющейся, усложняет оперативное планирование, контроль и регулирование производственного процесса [162]. Поэтому, очень важно в единичном производстве оптимально распределить изготовление изделий в планируемом периоде, выбрать рациональный способ использования ограниченных ресурсов с целью достижения наибольшей эффективности.

Смена операций, а также различие в длительности операций на смежных рабочих местах вызывает частые перерывы в работе оборудования для его переналадки. Поэтому задачей оперативного планирования является организация равномерного выполнения заказов в соответствии со сроками выпуска продукции.

Суть оперативного планирования отражает критерий оптимальности – минимизация длительности выполнения плана за счет сокращения суммарного времени межоперационного пролеживания деталей. Действительно, поиск оптимального плана – это сведение к минимуму не столько простоя оборудования, сколько времени, в течение которого детали ожидают обработки [163]. Сведение к минимуму времени пролеживания обеспечивается расчетом такого пооперационного времени обработки деталей, при котором наилучшим образом синхронизируется длительность технологических операций и повышается загрузка оборудования. Достижение синхронизации производственного процесса особенно важно для единичного многономенклатурного производства, где на одном и том же производственном участке обрабатываются детали с резко отличающимися циклами обработки и структурой трудоемкости работ. Так как заказы не повторяются, то календарные расчеты планов и графики запуска деталей в производство на сутки отличаются от ранее разработанных планов, например, на день раньше или неделю раньше.

Оперативное планирование в единичном производстве включает в себя:

- расчёт производственного цикла;

- построение календарного графика выполнения заказов;
- расчёт времени опережения в работе цехов;
- расчёт загрузки оборудования;
- ежесменный учёт выполнения заказов.

На рисунке 5.1 представлена структурно-функциональная модель, отражающая бизнес-процесс формирования оперативных планов по реализации месячной производственной программы с учетом возникновения факторов, влияющих на ход производства (отказ оборудования, поломка инструмента).

Выполнение производственной программы цехами предприятия в течение суток должно строго соответствовать сформированным суточным заданиям. В сменно-суточный план включают, в первую очередь, те детали, отсутствие которых задерживает последующие этапы производственного процесса, во вторую очередь – детали, выпуск которых намечен планом на данные сутки (смену) [164]. При планировании учитываются ремонтные работы отдельного оборудования, непредвиденные неявки рабочих и другие случайные моменты для возможного изменения порядка выполнения заданий.

Сменно-суточные задания составляются с учетом отклонений от оперативных планов и наличия резервов производства. Устранение значительных отставаний от оперативных планов выполняется за счет резервов, которые выделяются из общих резервов предприятия в пределах ресурсов, предусмотренных годовым планом.

Контроль выполнения суточного задания позволяет оценить загрузку цеха, процент готовности заказа, а также размер незавершенного производства в случае поломки оборудования. Объектами учета являются сроки выполнения этапов работ; последовательность движения деталей (узлов); наличие брака; сроки сдачи готовой продукции. Осуществляется учет на основе первичной информации (акты сдачи этапов работ, накладные, наряды). Для наглядности хода работ на основании данных плана строятся графики в виде диаграмм Ганта.

- Использование онтологий для изучения предметной области позволяет:
- увидеть целостную картину предметной области;
 - представить материал по изучению ПО в единой форме;
 - восстановить логические связи между основными понятиями ПО.

Важным моментом при разработке онтологии предметной области является построение иерархий понятий. При выборе подходящей иерархии необходимо учитывать не только то, насколько она полно описывает предметную область и связанные с ней информационные ресурсы, но и насколько удобно пользователю с ее помощью осуществлять навигацию по информационному пространству и вести содержательный поиск.

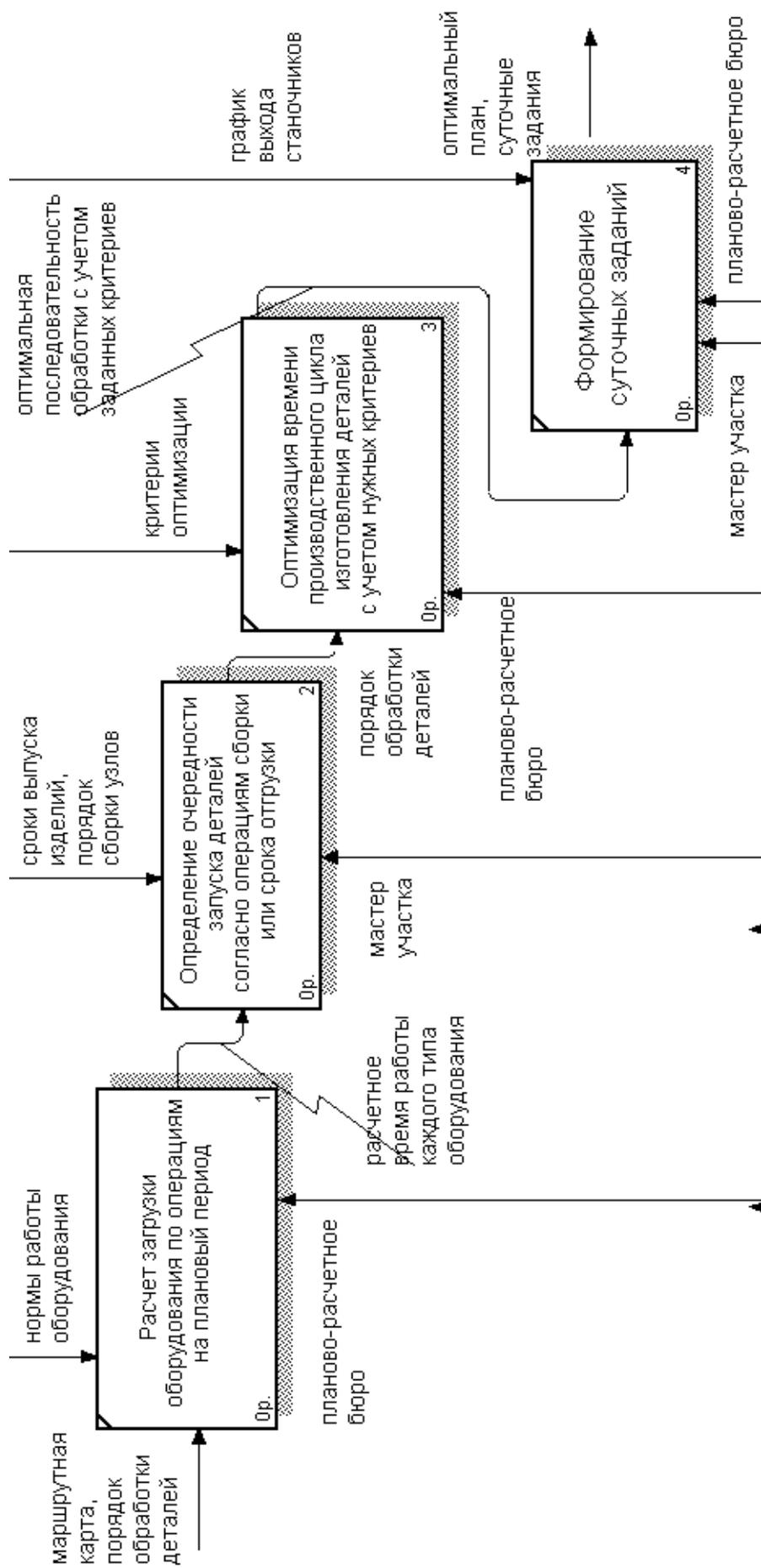


Рисунок 5.1 – Бизнес-процесс формирования оперативного плана для цеха единичного производства

При построении иерархии понятий нужно учитывать, что в дальнейшем на ее основе будет выполняться следующая работа:

- автоматически строится схема базы данных (генерация структуры таблиц БД, ограничений на вводимые данные);
- создаваться формы для заполнения таблиц данными (экземплярами классов понятий и отношений онтологии);
- определяться схема навигации по информационному пространству (по отношениям онтологии);
- генерироваться формы поисковых запросов (по классам и отношениям онтологии) [162].

Модель онтологии определяет четыре класса терминов: группы (классы), понятия, характеристики и области возможных значений. Группа – это объединение концептуально связанных групп или понятий. Понятия делятся на простые, не имеющие внутренней структуры, и составные (обладают набором характеристик) [165]. На рисунке 5.2 представлен фрагмент расширенной системы понятий для концепта «планово-учетная единица продукции».

На основе анализа предметной области по оперативному планированию производственных работ в механических цехах разработана диаграмма классов (рис. 5.3). Основные классы соответствуют выделенным концептам, сформированной онтологии. Добавлен класс «Состояние работоспособности», который связан с классом «Оборудование» (при составлении оперативных планов очень важно учитывать текущее состояние оборудования).

Опишем связи в разработанной диаграмме классов. План работы, который подается в цех для изготовления деталей, содержит информацию по планово-учетным единицам продукции, которыми могут быть отдельные заказы, узлы, партии деталей или отдельные детали в зависимости от типа производства в цехе (единичное, позаказное, мелкосерийное). Заказы могут состоять из нескольких узлов, каждый из которых может включать несколько деталей. Цех включает несколько участков, на которых находится множество станков, выполняющих производственные операции. Каждая деталь имеет определенный маршрут обработки согласно технологическому процессу.

Маршрут обработки содержит последовательность операций с указанием времени выполнения каждой операции. Каждая операция выполняется на определенном оборудовании (станках), которое может выполнять этот вид операции. На участке цеха может находиться несколько станков, которые могут выполнять одну и ту же технологическую операцию. Делается это для того, чтобы ускорить процесс выпуска готовой детали. Таким образом, разработанная диаграмма классов отображает структуру работы цеха.

Подробное описание классов для оперативного планирования производственных работ в механическом цехе представлено в таблице 5.1.

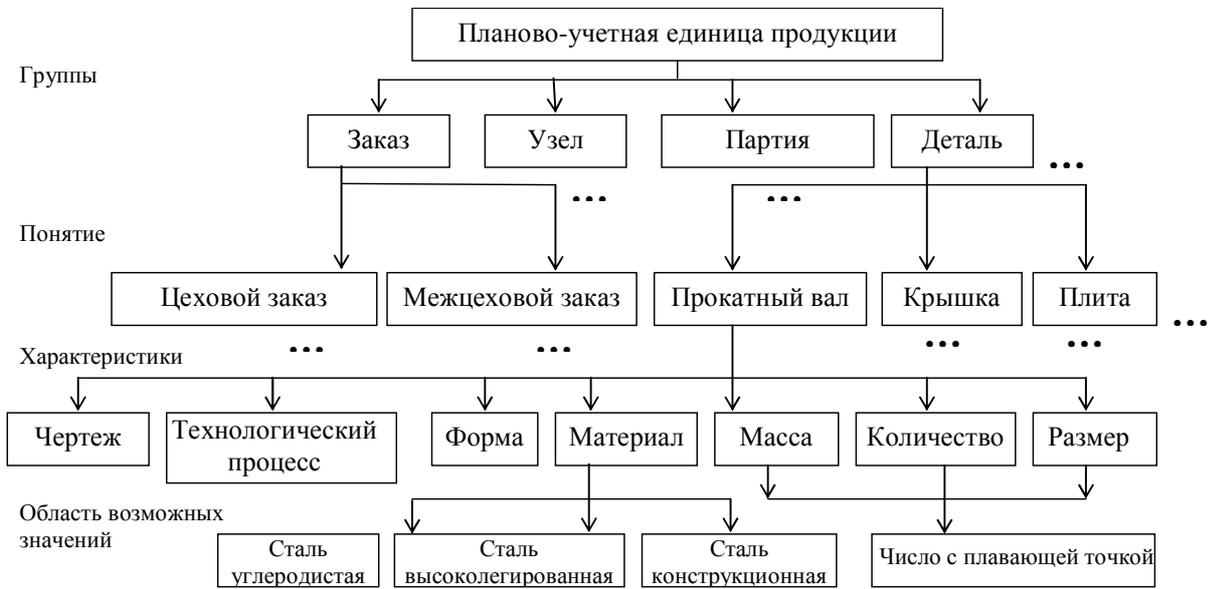


Рисунок 5.2 – Модель системы понятий для концепта «планово-учетная единица продукции» в терминах универсальной модели онтологии

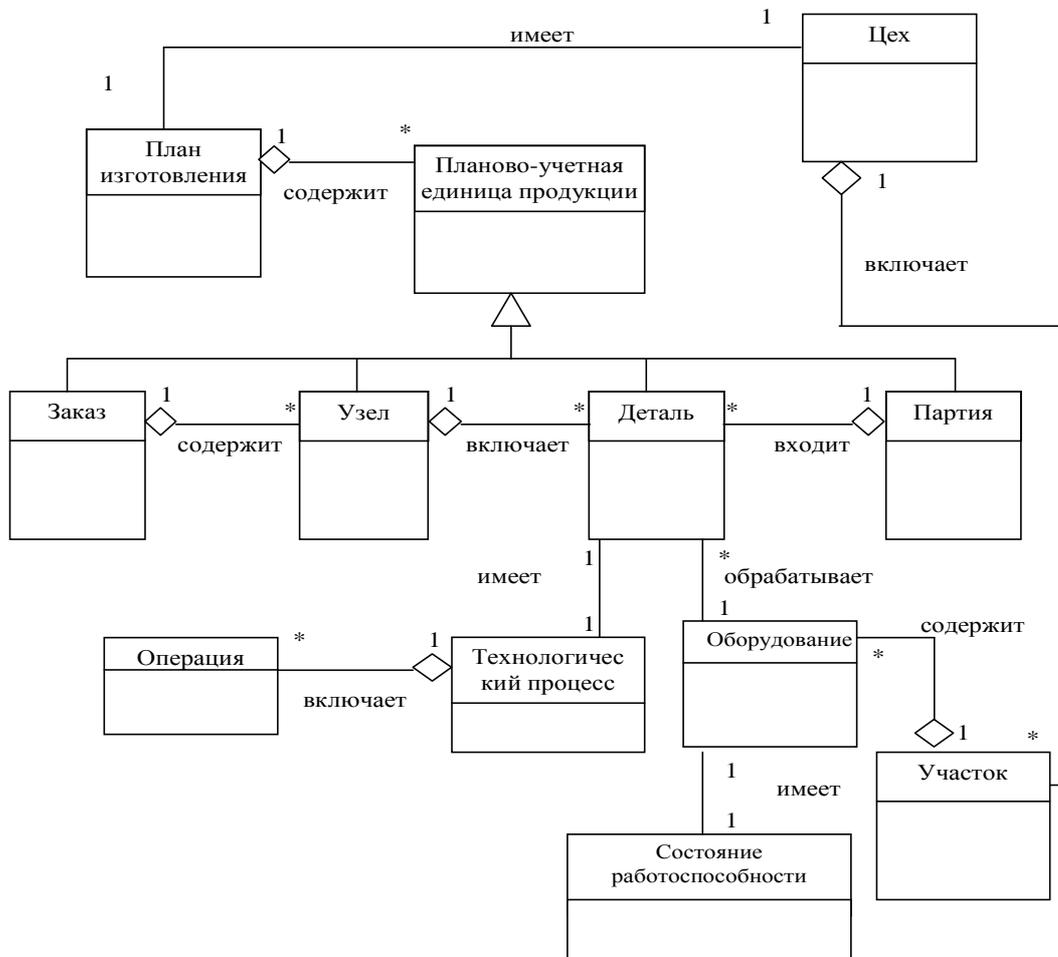


Рисунок 5.3 – Диаграмма классов для оперативного планирования производства заказов, состоящих из узлов и деталей

Таблица 5.1 – Описание классов и их обязанностей

Название класса	Описание
1	2
Цех	Класс, хранящий информацию о цехе. Содержит информацию об участках, входящих в конкретный цех
План изготовления	Содержит информацию о планово-учетных единицах продукции, которые входят в конкретный план с указанием сроков начала и окончания выполнения. Содержит номер цеха, для которого он предназначен
Планово-учетная единица продукции	Знает информацию об объектах, для которых составляется оперативный план изготовления заказов
Заказ	Класс, хранящий перечень узлов, входящих в конкретный заказ. Наследуется от класса Планово-учетная единица. Включается в План изготовления. Атрибуты: уникальный номер заказа; название; описание заказа; срок выполнения
Узел	Класс, хранящий перечень деталей, входящих в конкретный узел. Наследуется от класса Планово-учетная единица. Атрибуты: уникальный номер узла; название; срок сборки. Предоставляет информацию для класса Заказ
Операция	Класс, хранящий перечень данных по технологической операции. Предоставляет информацию для класса Технологический процесс
Деталь	Класс, хранящий информацию о конкретной детали. Наследуется от класса Планово-учетная единица. Атрибуты: номер детали; название; номер чертежа; масса, материал; размеры; номер ТП. Предоставляет информацию для классов Узел и Партия
Партия	Класс, хранящий информацию о партии деталей. Наследуется от класса Планово-учетная единица. Атрибуты: номер партии; количество деталей; срок готовности. Знает информацию о деталях, которые включены в одну партию
Технологический процесс	Хранит информацию о последовательности обработки каждой детали, в соответствии с технологией изготовления детали, т.е. перечень операций, необходимых для обработки детали (точение, фрезерование, сверление, шлифование). Атрибуты: номер ТП, шифр, номер операция, название операции, длительность, инструмент, тип оборудования. Связан с классом Деталь – предоставляет ТП каждой детали

Продолжение таблицы 5.1

1	2
Участок	Содержит информацию о том, какие типы оборудования и в каком количестве находятся на определенном участке цеха. Предоставляет информацию для класса Цех
Оборудование	Класс, содержащий полный перечень оборудования с характеристиками и сведениями о своей работоспособности (состояние ремонта, обработки, простоя). Предоставляет информацию для класса Участок. Знает, какую деталь необходимо обработать
Состояние работоспособности	Класс содержит информацию о состоянии оборудования. Атрибуты: номер состояния, название, время начала и время окончания (указывается для состояния обработки или ремонта)

5.2 Использование ООП и технологий визуального структурного проектирования для моделирования процессов оперативного планирования

Задачу оперативного планирования можно разделить на следующие подзадачи:

1 Подготовить алгоритм оптимизации расписания работы на уровне производственного процесса участка цеха. Возможные критерии оптимизации расписания:

- минимальные простои оборудования;
- минимизация времени ожидания обслуживания деталей;
- равномерная загрузка станков;
- соблюдение директивных сроков.

2 Составить модуль оптимизации, реализующий решение задач формирования оптимальных планов производства с возможностью визуального представления графика работ для участка цеха.

3 Использовать имитационное моделирование для оценки выполнимости полученного расписания работ с учетом возможных отказов оборудования [166].

Разработка программного продукта для расчета оптимального плана изготовления продукции в цехе выполнялась на основе использования объектно-ориентированной модели. При проектировании программной системы были разработаны основные классы, представленные на диаграмме классов (рис. 5.4).

На рисунке 5.5 представлено полученное расписание на один день работы в виде диаграммы Ганта, по оси X представлено время, по оси Y – перечень станков, которые участвуют в обработке деталей.

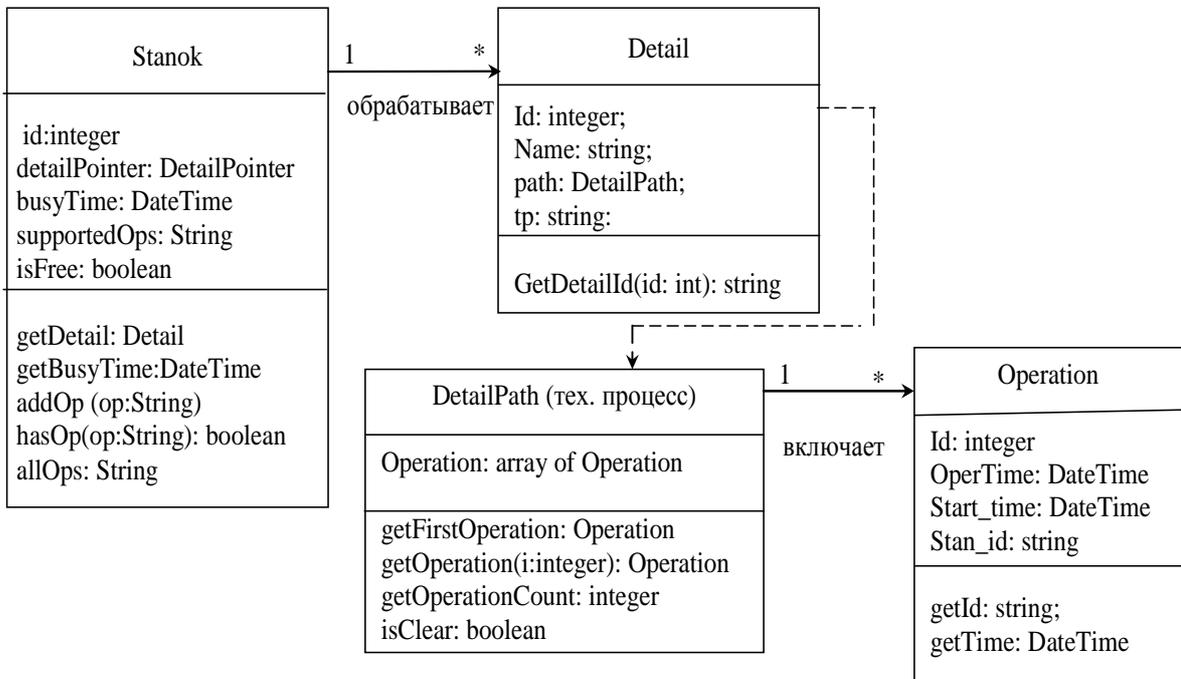


Рисунок 5.4 – Диаграмма классов программной системы для расчета оптимального плана обработки деталей

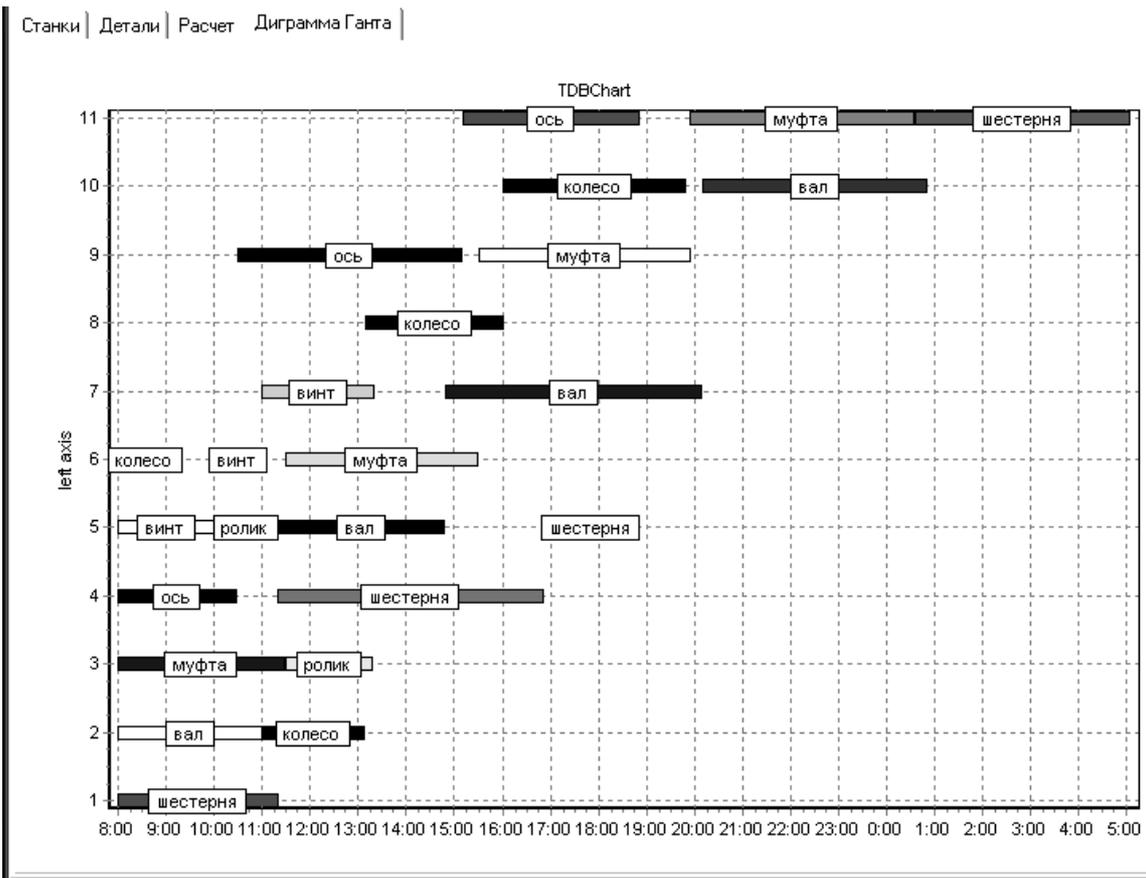


Рисунок 5.5 – График обработки деталей на один день в виде диаграммы Ганта на основе рассчитанного плана изготовления 7 деталей на 11 станках

Каждый блок на диаграмме соответствует определенной операции обработки детали, последовательность которых указана в технологическом маршруте. Чтобы отследить, что в полученном расписании нет накладок, на каждом блоке написано название детали. Для отображения графика используется компонент DVChart, тип линии – Gantt.

Наибольшая загрузка оборудования приходится на первую смену. На рисунке 5.6 представлен отчет по загрузке станков на основе полученного плана.

	А	В	С
1	Показатели расписания по станкам цеха №		2
2		на	10.10.2009
3			
4	код станка	Наименование	% загрузки
5	1	расточной	15,81
6	2	расточной	24,5
7	3	токарный	25,3
8	4	токарный	37,94
9	5	токарно-карусельный	41,9
10	6	сверлильный	29,25
11	7	фрезерный	36,36
12	8	фрезерный	13,44
13	9	фрезерный	43,08
14	10	шлифовальный	40,32
15	11	шлифовальный	60,87
16			
17	среднее		33,52

Рисунок 5.6 – Формирование отчета для анализа расписания по загрузке станков (экспорт в MS Excel)

Для моделирования производственного процесса на участке цеха разработаем имитационную модель с учетом влияния на процесс производства случайных факторов, например отказа оборудования. В результате имитации имеется возможность оценить следующие параметры производственного процесса: коэффициент загрузки всех видов оборудования; длину очереди перед каждым станком; перечень деталей, перемещаемых на другой станок в случае отказов; длительность производственного цикла. Решив задачу с использованием оптимизационной модели и получив время производственного цикла, с помощью имитации появляется возможность оценить вероятность выполнения графика работ, т. е. завершения всех производственных работ в срок, с учетом отказов оборудования [167].

На основе результатов имитационной модели можно корректировать оптимизационную модель, например: указать приоритеты запуска деталей или использовать дополнительный станок с другого участка.

Построение имитационной модели включает создание сценария производственного процесса, который описывает все фазы изготовления деталей. Каждой фазе соответствует свой блок программы на GPSS (рис. 5.7).

Структурная схема концептуальной модели обработки деталей, которые отличаются маршрутами прохождения в производственной системе, может быть представлена в виде связанных блоков, как на рисунке 5.8.



Рисунок 5.7 – Пример последовательности фаз моделирования производственных работ на участке цеха

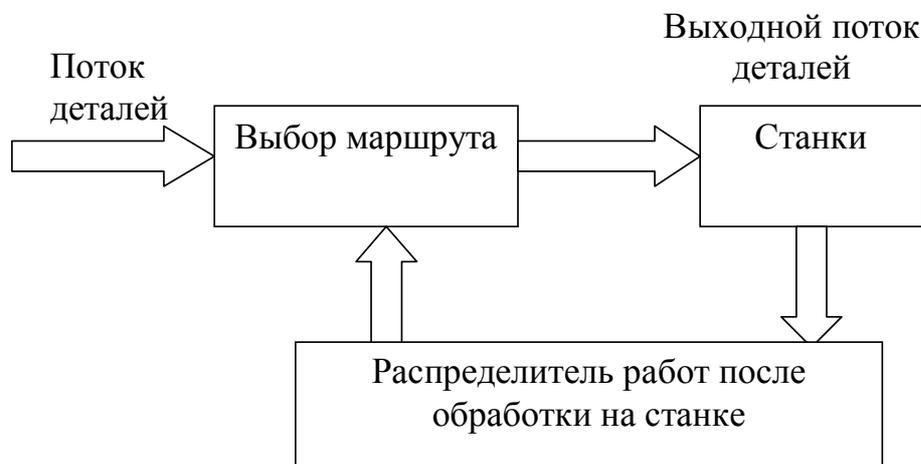


Рисунок 5.8 – Схема концептуальной модели обработки единичных деталей

На рисунке 5.9 приведена схема моделирования изготовления деталей с учетом допустимого плана производственных работ.

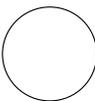
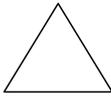
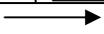
Управление производственным процессом включает в себя техническую подготовку производства, оперативный контроль хода производства и анализ выполнения плановых заданий. Система моделирования производственного процесса должна быть разработана на основе принципа диалога пользователя с системой, чтобы обеспечить взаимодействие лица принимающего решение и имитационной модели хода производства. Это позволит в любой момент времени вмешиваться в процесс моделирования, изменять параметры моделирования (добавлять или изменять используемое оборудование, отменять выполняемые заказы и планировать новые), оценивать текущую информацию о ходе моделирования и состоянии системы.



Рисунок 5.9 – Моделирование производственного процесса изготовления деталей с учетом допустимого плана работ

Моделирование производственного процесса представляет собой непрерывный процесс обработки событий, наступающих в системе. Динамические процессы в имитационной модели представлены в виде взаимодействия следующих составляющих – устройств, очередей и событий [168; 169]. Для формирования и оперативного изменения имитационной модели целесообразно использовать идеографический подход [170; 171]. В таблице 5.2 приведены идеографические элементы Id_v , с помощью которых можно визуальным образом представить технологический процесс обработки деталей в механическом цехе.

Таблица 5.2 – Список идеографических элементов

Вид элемента	Изображение	Описание	Идентификатор
 Станок с очередью		Станок токарный	St
		Станок фрезерный	Sф
		Станок шлифовальный	Sш
		Станок сверлильный	Sc
		Станок расточной	Sp
 Распределитель деталей после обработки на станке		Распределитель после токарных станков	Rt
		Распределитель после фрезерных станков	Rф
		Распределитель после шлифовальных станков	Rш
		Распределитель после сверлильных станков	Rc
		Распределитель после расточных станков	Rp
 Распределитель деталей на станки		Распределитель на токарные станки	Rt
		Распределитель на фрезерные станки	Rф
		Распределитель на шлифовальные станки	Rш
		Распределитель на сверлильные станки	Rc
		Распределитель на расточные станки	Rp
		Связь между элементами	SS
		Поток деталей	Pд

Технология построения и использования имитационной модели основана на событийном способе имитации динамики обслуживания деталей на производственных участках. Выделены основные группы элементов: станки и распределители деталей (распределитель деталей на станок для обработки, распределитель после обработки на станке).

Производственная система S , которая моделируется, состоит из множества объектов $Ob_v (v = \overline{1, V})$:

$$S = Ob_v .$$

Так как идеографический элемент описывает только один определенный объект системы S , то множество $Id = \{Id\}$ описания имитационной модели M не имеет равнозначных элементов [165]:

$$\forall Id_v \in Id \vee \forall Ob_v \in Ob \exists! Id_v \equiv Ob_v, \\ M = Id_v.$$

Имитационная модель M производственного процесса в цехе представляется объединением идеографических элементов Id_v в идеографическую сеть Is .

Каждый элемент описывается:

- планом отображения $По$ (графическое отображение преобразования переменных входа (X), переменных выхода (Y) и внутренних переменных, хранящих информацию о состоянии элемента);
- планом содержания $Пс$ (выражение, которое определяет процесс преобразования множества переменных данного элемента $Y = F(X)$).

Также для каждого элемента указывается количество входов и выходов и определяется с каким элементом возможна связь ($sv\{Id_a, Id_b\}$, $\{Id_a, Id_b\} \in Id$). Так для элементов группы станков возможно по одному входу и выходу, так как они могут быть связаны только с распределителями работ. В свою очередь, распределители могут иметь несколько входов и выходов, так как могут получать потоки работ с разных распределителей и соответственно направлять детали на разные станки. При анализе структуры участка механического цеха определено, что для распределителей достаточно иметь до 5 входов и 5...8 выходов (наибольшее число выходов возможно для распределителей на токарные, расточные и фрезерные станки, так как на участках их больше всего).

Идеографическая модель технологического процесса строится с учетом структуры цеха на основе использования разработанной палитры идеографических элементов, последовательность размещения которых контролируется в соответствии с возможными вариантами взаимосвязи двух соседних элементов.

Каждый идеографический элемент имеет свои характеристики. Так, транзакт (деталь) i описывается следующим выражением:

$$i = (\{TO_i\}; ms_i; d; L_d; (H_d, B_d) / D_d),$$

где TO_i – множество технологических операций для i -ой детали ($TO_i \in J$);

J – множество технологических операций, $J = \{j : j = \overline{1, g}\}$.

g – количество операций для обработки деталей;

ms_i – масса i -ой детали;

d – плановый срок (директивное время);

H_d – высота детали;
 B_d – ширина детали;
 D_d – диаметр детали.

Для плоских деталей указывается высота и ширина детали, для тел вращения – диаметр.

Элемент станок k определяет выражение

$$k = (\{DP_k\}; ms_{max}; H_s; L_s; Sr; Pz; N_s),$$

где DP_k – множество выполняемых деталей-переходов,

ms_{max} – максимально допустимая масса обрабатываемых деталей;

H_s – максимальная высота устанавливаемой заготовки;

L_s – допустимая длина рабочей области;

Sr – состояние работоспособности (свободно/занято/ремонт или соответственно 0/1/E);

Pz – текущий процент загрузки;

N_s – мощность станка;

Элемент распределитель R определяют выражения (5. 1) и (5.2):

$$R = \{B_d \leq L_{s\ k}, D_d \leq D_k, H_d \leq H_{s\ k}, ms \leq ms_{max\ k}, Rs \geq Ro, Sr = 0\}, \quad (5.1)$$

где D_k – допустимый диаметр обработки детали на k -том станке;

Rs – разряд выполняемых работ на станке;

Ro – разряд выполняемой операции согласно технологическому маршруту (учет черновой, чистовой обработки, условия достижения нужного качества поверхности после обработки).

$$\tilde{I}_k = \left(\bigcup_{i=1}^{mm} \bigcup_{j=1}^{gg} PO_{ij} \right) \cap DP_k, \quad (5.2)$$

где \tilde{I}_k – определение множества деталей, сгруппированных по операциям для обработки на k -ом станке;

PO_{ij} – множество переходов (j -ых операций) обработки i -ой детали,

$PO = \{po : po = \overline{1, e}\}$;

DP_k – множество выполняемых деталей-переходов на k -ом станке ($DP_k \in \{PO\}$).

Каждому элементу соответствует определенный блок программы на GPSS [8; 9], например:

– для потока деталей используем следующую запись

`GENERATE x1,x2,,50 // x1, x2` – определяют интервалы поступления транзактов;

– элемент группы «станок» с очередью и наличием взаимозаменяемого оборудования можно представить:

QUEUE OCHI

TRANSFER Both,SS1,SS4 // определение однотипного оборудования

SS1 SEIZE STAN1

DEPART OCHI

ADVANCE FN\$TOK // использование функции ТОК для задания времени задержки транзакта (для точения)

RELEASE STAN1

– элемент группы «распределитель» после станка можно представить в виде (например, для распределителя после токарной обработки):

TRANSFER FN,Raspr tok // переход к оператору, метка которого равна значению функции Raspr tok

– элемент группы «распределитель» на станок с учетом проверки на допустимый размер, например, диаметр детали меньше или равен 500 мм (информация хранится в параметре транзакта № 4), можно представить в виде:

TEST LE P4,1000,FREZ2 // переход по условию в случае невыполнения к оператору FREZ2 (станок фрезерный 2-ой).

На рисунке 5.10 представлена идеографическая модель производственного процесса (ПП).

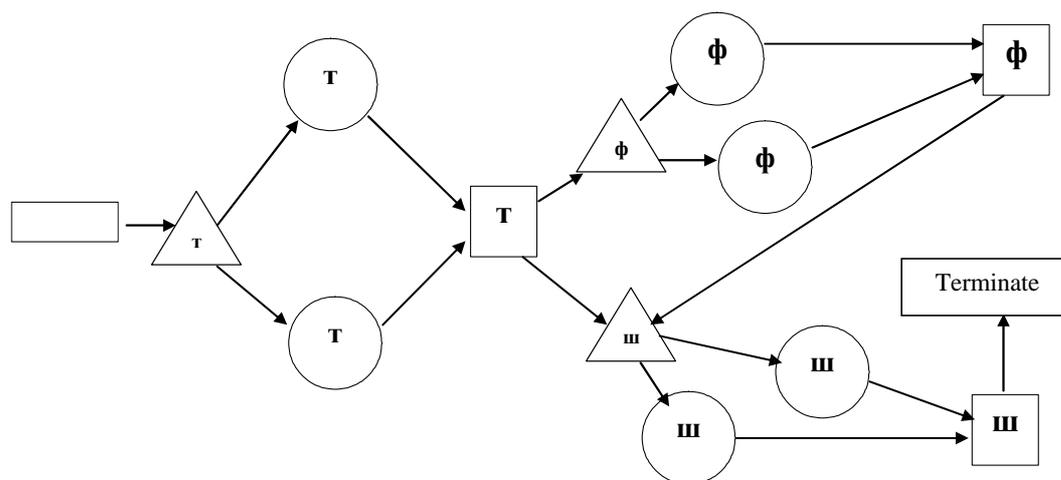


Рисунок 5.10 – Графическое представление производственного процесса с помощью идеографических элементов

Для реализации имитационной модели используем разработанные идеограммы основных типов механообрабатывающего оборудования (станков) и распределителей – устройств, распределяющих потоки деталей между оборудованием.

Сформировав схему производственного процесса изготовления деталей на участке цеха с помощью идеограмм (как показано на рис. 5.10), получаем код на языке GPSS в виде текстового файла. Последующая имитация выполняется в GPSS World. Окно формирования схемы ПП на основе имеющегося оборудования цеха приведено на рисунке 5.11.

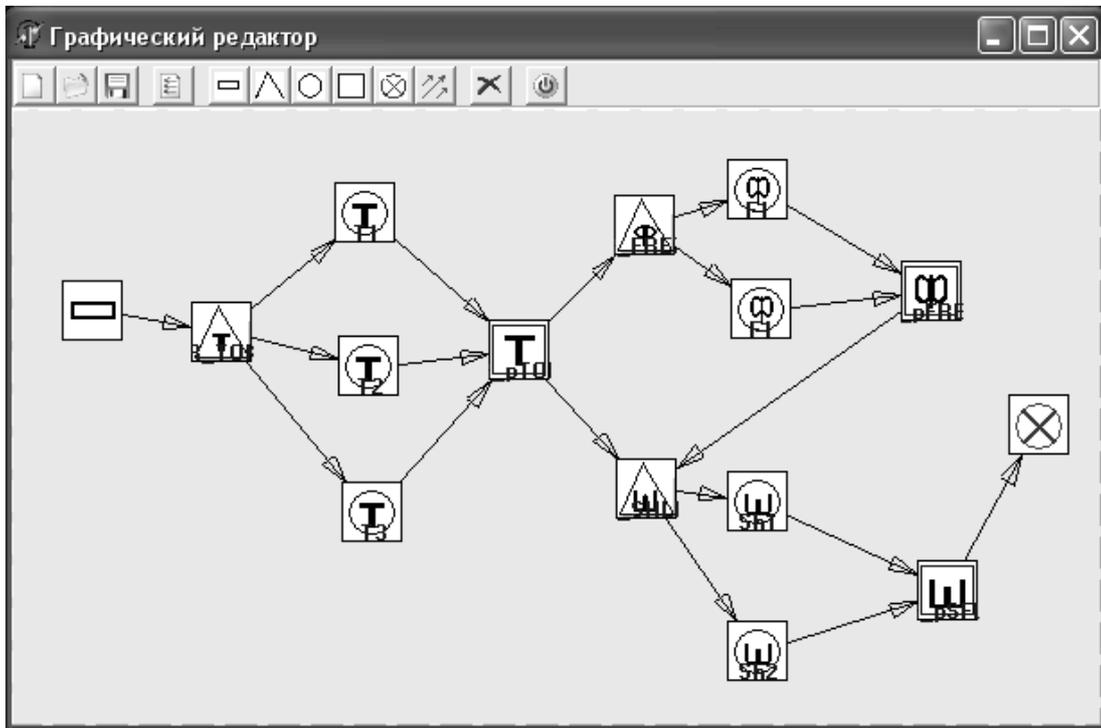


Рисунок 5.11 – Формирование схемы производственного процесса

На панели инструментов в созданном редакторе представлены пиктограммы функциональных кнопок (создание новой или открытие созданной ранее схемы ПП, сохранение разработанной схемы ПП, кнопка редактирования справочника элементов) и кнопки выбора основных элементов (поток деталей, распределитель работ на станок, станок, распределитель работ после обработки на станке, признак окончания модели), стрелки для связи двух элементов, кнопка удаления элемента, формирования и записи модели в текстовый файл на языке gprss [172].

Разработан справочник всех элементов, информация о которых хранится в БД (рис. 5.12).

При помещении элемента на палитру, например, элемента «станок», открывается окно выбора конкретного вида элемента (рис. 5.13), например, «токарный станок» (данные по всем имеющимся станкам хранятся в таблице базы данных с указанием информации о допустимых параметрах обработки деталей). Аналогично, если пользователь выбирает элемент «распределитель на станок», в окне будут представлены только имеющиеся распределители (рис. 5.14).

В параметрах оператора будут подставлены соответствующие значения на основе создаваемой связи между элементами и данными, полученными от пользователя.

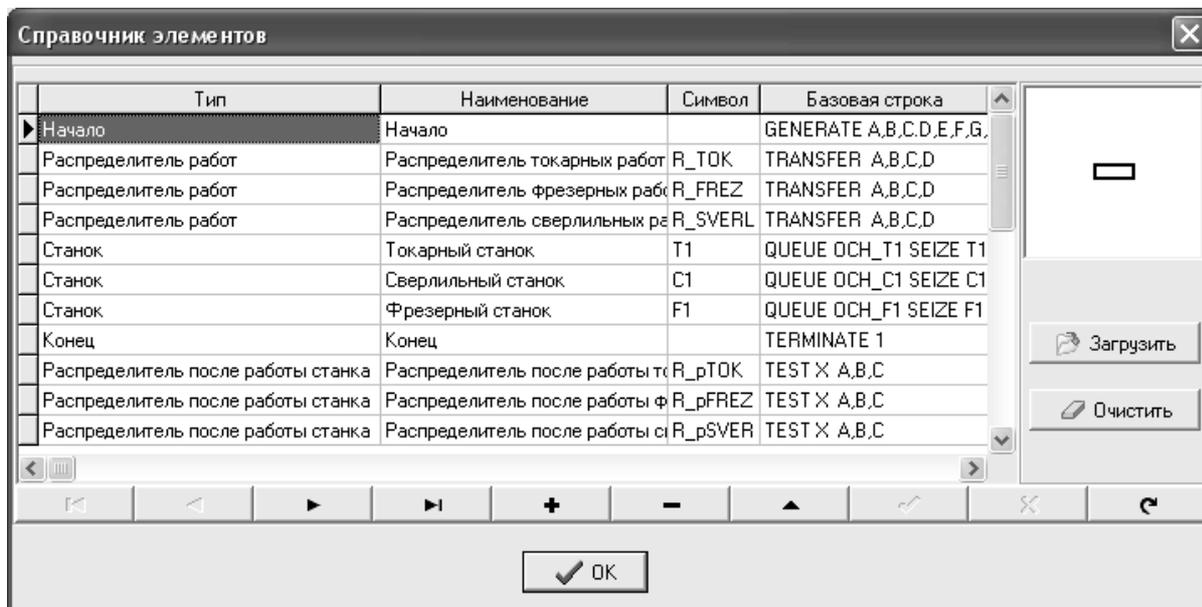


Рисунок 5.12 – Справочник элементов для моделирования производственного процесса



Рисунок 5.13 – Окно выбора типа станка

Алгоритм реализации оптимизационно-имитационного подхода включает расчет оптимального плана производственного процесса, а затем моделирование в среде GPSS World.

Согласно составленному плану работ получаем результаты имитации с учетом отказов оборудования. На основе полученных данных пользователь имеет возможность принимать решение о работе оборудования производственных участков в текущем периоде по рассчитанному расписанию.

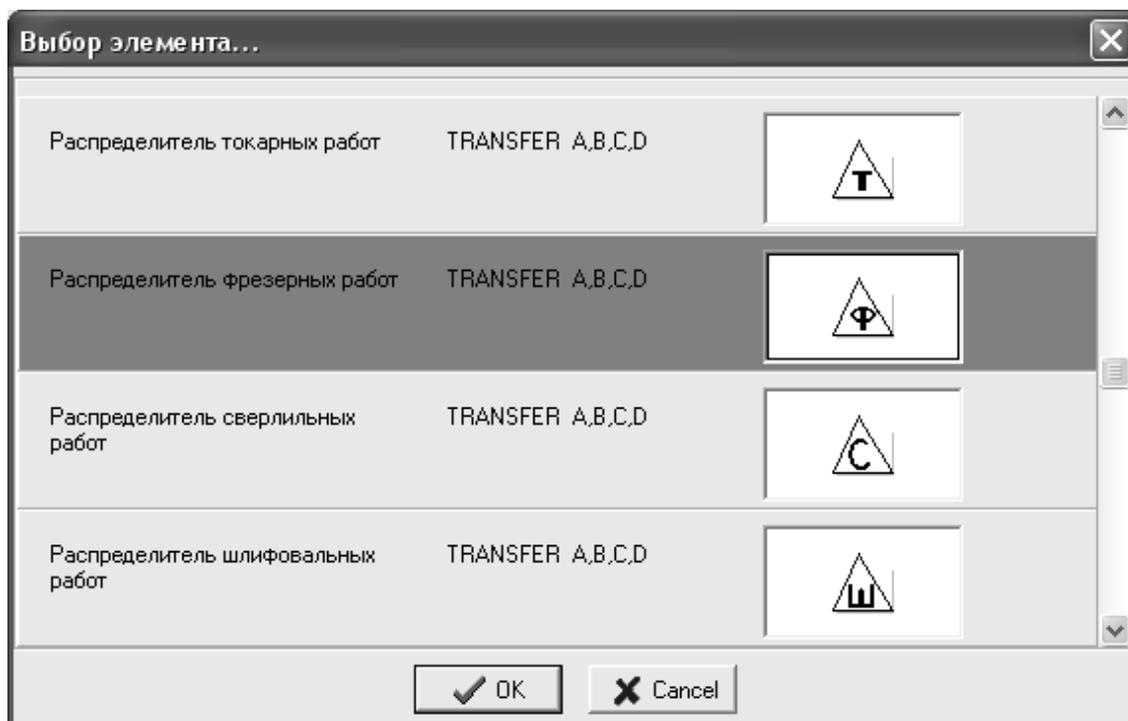


Рисунок 5.14 – Окно выбора нужного распределителя

Таким образом, решение задачи планирования работ в цехе выполняется поэтапно, т. е. результаты первой задачи по составлению оптимального расписания ПП используются в качестве входных данных следующей задачи, т. е. для моделирования работы производственных участков. Если результаты не устраивают пользователя, вносятся изменения во входные данные модуля планирования. При составлении имитационной модели формируется функция обработки деталей с указанием времени выполнения операций на каждом станке. Также на основе анализа статистической информации отказов станков для каждой единицы оборудования задается функция отказов и предусматривается в случае поломок перемещение деталей на однотипный станок.

Рассмотрим пример решения задачи по формированию оптимального плана для некоторой производственной программы на сутки, состоящей из 7 деталей (основная информация представлена в табл. 5.3). Обработка деталей может выполняться на 11 единицах оборудования (согласно плану на рисунке 5.15):

- 2 расточных станка (выполняющие соответственно работы 3-го и 4-го разрядов);
- 3 токарных станка (выполняющие соответственно работы 3-го, 4-го и 5-го разрядов);
- 1 сверлильный станок (выполняющий работы 4-го разряда);
- 3 фрезерных станка (выполняющие соответственно работы 3-го, 4-го и 5-го разрядов);
- 2 шлифовальных станка (выполняющие соответственно работы 4-го и 5-го разрядов).

Таблица 5.3 – Данные по обработке деталей

Операция	Длительность операций (p_{ij}), мин / разряд работ (Ro_{ij})						
	Вал	Муфта	Шестер- ня	Ось	Колесо	Винт	Ролик
Растачивание	180/4	–	200/3	–	130/4	–	80/4
Точение	210/5	210/3	330/4	150/4	–	120/5	110/5
Сверление	–	240/3	120/4	–	70/3	60/4	–
Фрезерование	320/3	265/5	280/5	170/4	140/3	–	–
Шлифование	280/4	280/5	270/5	220/5	230/4	–	–

На основе оптимального плана обработки указанных деталей (рис. 5.16) получили, что обработка всех деталей будет окончена в 3-ей смене к 5:05 часам. Наибольшая загрузка оборудования в 1-ой смене, что соответствует реальной производственной ситуации (не работают шлифовальные станки). Во 2-ую смену должны работать следующие типы станков – сверлильный, фрезерные и шлифовальные, в 3-ую смену – только шлифовальные. Анализируя оптимальный план, можно видеть, что 11-ый станок (шлифовальный) должен начинать работу в 15:10, но целесообразно сместить обработку детали «ось» на 16:00 (на начало 2-ой смены), если не появятся другие работы для указанного станка. Так как у станка, согласно плану, имеется резерв времени 60 мин., то перемещение детали не повлияет на конечное время изготовления цехового заказа (работы на шлифовальном станке должны быть окончены к 5:05).

Согласно составленному плану, все детали на обработку поступают одновременно, за исключением детали «ролик» (поступает на обработку в 10:00, т. е. время задержки 120 мин.). Эти данные необходимы для имитационной модели при генерировании транзактов (деталей). Так как детали имеют разные маршруты и времена обработки на станках, то от порядка продвижения деталей в модели зависит время завершения изготовления цехового заказа.

Получили время изготовления 23 час (1 385 мин), в отличие от 21 часа по плану (с 8:00 до 5:05). Был разыгран отказ 9-го станка (фрезерный, в имитационной модели FREZ3), который должен произойти через 1.6 час (с учетом времени, которое прошло после последнего ремонта), т. е. через 100 мин. Учитывая, что рабочая смена начинается в 8:00, то отказ произойдет в 9:40. Время ремонта разыграно – 3.83 час (230 мин), т.е. до 13:30. Из-за отказа станка происходит задержка в обработке детали «ось», которая далее продвигается на шлифование.

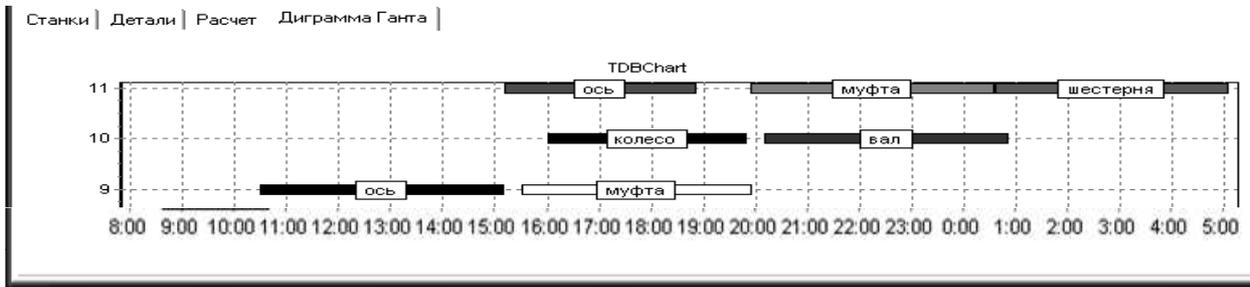
TIME	END TIME								
0.0	1385.000								
FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME	AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
T2	3	0.397	230.000	1	0	0	0	0	0
T1	1	0.121	210.000	1	0	0	0	0	0
RAS1	1	0.115	200.000	1	0	0	0	0	0
RAS2	2	0.121	105.000	1	0	0	0	0	0
T3	2	0.132	115.000	1	0	0	0	0	0
CV1	5	0.328	114.000	1	0	0	0	0	0
FREZ1	2	0.265	230.000	1	0	0	0	0	0
FREZ2	1	0.098	170.000	1	0	0	0	0	0
SH2	5	0.806	280.000	1	0	0	0	0	0
FREZ3	2	0.314	272.500	1	0	0	0	0	0
SH1	2	0.323	280.000	1	0	0	0	0	0
QUEUE	MAX	CONT.	ENTRY	ENTRY(0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE.(-0)	RETRY	
OCH_T2	2	0	3	1	0.210	121.667	182.500	0	
OCH_T1	1	0	1	1	0.000	0.000	0.000	0	
OCH_RAS1	1	0	1	1	0.000	0.000	0.000	0	
OCH_RAS2	1	0	2	1	0.074	64.000	128.000	0	
OCH_T3	1	0	2	2	0.000	0.000	0.000	0	
OCH_CV1	1	0	5	2	0.171	59.200	98.667	0	
OCH_FREZ1	1	0	2	1	0.072	62.500	125.000	0	
OCH_FREZ2	1	0	1	1	0.000	0.000	0.000	0	
OCH_SH2	2	0	5	1	0.697	242.000	302.500	0	
OCH_FREZ3	1	0	2	1	0.078	67.500	135.000	0	
OCH_SH1	1	0	2	1	0.035	30.000	60.000	0	
OTKAZ_FREZ3		0		321.602					
P_REMONT_FREZ3		0		320.000					
TIME_OTKAZ_FREZ3		0		1.602					
REMONT_FREZ		0		3.831					

Рисунок 5.15 – Результаты моделирования обработки деталей согласно составленному плану (единица модельного времени = 1 мин.)

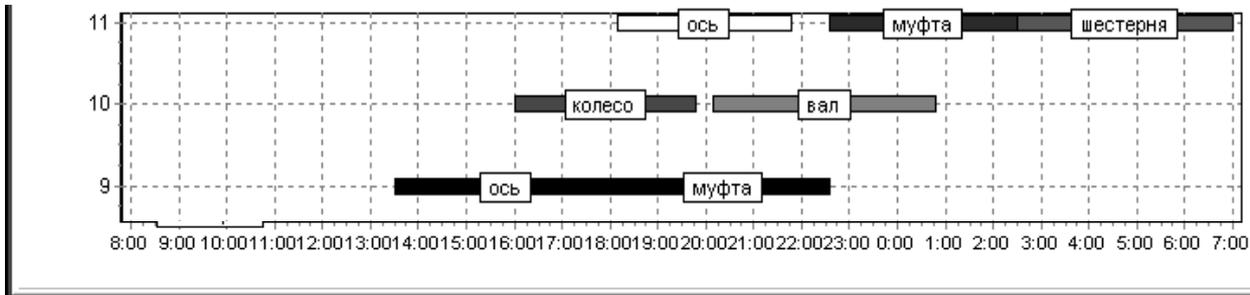
Таким образом, шлифовальный станок начинает работать на 2 часа позже (с учетом того, что должен был начинать работу в 16:00) и время окончания будет в 7:00, а не в 5:05. Наглядно эту ситуацию можно проанализировать с помощью диаграмм на рисунке 5.16.

В результате имитации оцениваем следующие параметры производственного процесса с учетом влияния случайных факторов:

- коэффициент загрузки всех видов оборудования;
- длину очереди перед каждым станком;
- количество обработанных деталей;
- длительность производственного цикла.



а



б

а – согласно первоначальному плану, б – после имитационного моделирования

Рисунок 5.16 – График обработки деталей для анализа работы 9-го (фрезерного) и 11-го (шлифовального) станков

Использование оптимизационно-имитационной модели обеспечивает формирование эффективного плана реализации производственной программы цеха и подтверждает выбор рационального варианта расписания работы оборудования за счет возможной проверки результата решения задачи, полученного на основе модели оптимизации, с помощью имитации.

Полученные данные помогают пользователю анализировать результаты и принимать обоснованные решения для улучшения производственной ситуации с целью повышения эффективности работы участка и уменьшения потерь времени. На основе данных системы диспетчеризации производства о происходящих событиях и отклонениях от составленного оперативного плана можно смоделировать ситуацию, проиграть несколько вариантов ее развития и добиться такого расписания работ, когда сбои в производственном процессе повлекут незначительные отклонения в плане.

Использование имитационной модели и графическое представление полученных результатов в виде диаграммы Ганта по выполнению заданного набора работ на предстоящую смену (сутки) также позволяет оценить является ли данное решение приемлемым и выполнимым в реальных производственных условиях.

Разработанное программное обеспечение позволяет решать задачу планирования работ на производственных участках не только на одни сутки, но и на более длительный период, что способствует эффективному управлению процессом производства, снижению потерь времени из-за простоев оборудования.

Выводы по разделу 5

1 Для моделирования бизнес-процесса формирования оперативных планов по реализации месячной производственной программы с учетом возникновения факторов, влияющих на ход производства, использована модель IDEF0, которая рассмотрена как промежуточный результат построения онтологии ПО. Рассмотрена онтология графического интерфейса ПМК для поддержки принятия решения при планировании, в основу алгоритма работы положена минимизация длительности выполнения плана или суммарного времени межоперационного пролеживания деталей. Управление проектированием пользовательского интерфейса осуществляется разработчиком интерфейса. Модели онтологий регламентируют набор правил для выбора понятий, их характеристик и значений, определяющих вид каждого компонента пользовательского интерфейса.

2 Предложена онтологическая модель планирования производства машиностроительных изделий и планирования загрузки оборудования. Модель является частью реализации оптимизационно-имитационной модели, чье использование обеспечивает формирование эффективного плана реализации производственной программы цеха и подтверждает выбор рационального варианта расписания работы оборудования за счет возможной проверки результата решения задачи, полученного на основе модели оптимизации, с помощью имитации.

3 Реализован программно-методический комплекс онтологического моделирования предметной области.

4 Выполнена реализация имитационной модели, полученные данные помогают пользователю анализировать результаты и принимать обоснованные решения для улучшения производственной ситуации с целью повышения эффективности работы оборудования и уменьшения потерь времени. На основе данных системы диспетчеризации производства о происходящих событиях и отклонениях от составленного оперативного плана можно смоделировать производственную ситуацию, проиграть несколько вариантов ее развития и добиться такого расписания работ, когда сбои в производственном процессе повлекут незначительные отклонения в графике.

5 Разработано программное обеспечение, которое позволяет решать задачу планирования работ на производственных участках не только на одни сутки, но и на более длительный период, что способствует эффективному управлению процессом производства, снижению потерь времени из-за простоев оборудования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Егоров, М.** Концепция создания иерархической интегрированной САПР предприятия в едином информационном пространстве корпорации / М. Егоров // САПР и Графика – 2001. – № 11. – С. 25–32.
- 2 **Норенков, И. П.** Основы автоматизированного проектирования / И. П. Норенков. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 336 с.
- 3 **Павлов, В. В.** CALS-технологии в машиностроении. Математические модели / В. В. Павлов. – М. : ИЦ МГТУ "Станкин", 2002. – 328 с.
- 4 **Загидуллин, Р. Р.** Управление машиностроительным производством с помощью систем MES, APS, ERP / Р. Р. Загидуллин. – Старый Оскол : ТНТ, 2011 – 372 с. – ISBN 978-5-94178-272-7.
- 5 **Ли, К.** Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – СПб : Питер, 2004. – 560 с.
- 6 **Алямовский, А. А.** SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2004. – 432 с.
- 7 **Сатунин, А.** SAP ERP. Построение эффективной системы управления / А. Сатунин, Е. Карсова, Т. Качинская. – М. : Альпина Бизнес Букс, Альпина Паблишерз, 2008. – 356 с.
- 8 **Кондаков, А. И.** САПР технологических процессов / А. И. Кондаков. – М. : Академия, 2008. – 272 с.
- 9 **Крючков, А.** Еще раз о прорывных технологиях автоматизации предприятий / А. Крючков, Г. Евгеньев // САПР и Графика. – 2001. – № 8. – С. 15–17.
- 10 **Корячко, В. П.** Теоретические основы САПР / В. П. Корячко, В. М. Курейчик, И. П. Норенков. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
- 11 **Градиль, В. П.** Справочник по Единой системе конструкторской документации / В. П. Градиль, А. К. Моргун, Р. А. Егошин ; под. ред. А. Ф. Раба. – Х. : Прапор, 1988. – 255 с.
- 12 **ГОСТ 3.1001-81.** Единая система технологической документации. Общие положения. – М.: Издательство стандартов, 2003. – 8 с.
- 13 Справочник по САПР / Под ред. В. И. Скурихина. – К. : Техника, 1988. – 375 с.
- 14 **Коходницький, М. П.** Теорія САПР складних систем / М. П. Коходницький. – Житомир, 1999. – 273 с.
- 15 **Тарасов, А. Ф.** Развитие и эффективность применения автоматизированной конструкторско-технологической подготовки производства / А. Ф. Тарасов, В. С. Севастьянов, С. А. Казаков // Мир технологий. – 2002. – № 7. – С. 52–55.
- 16 Системные методы в автоматизации проектирования изделий машиностроения : монография / А. Ф. Тарасов, Г. Б. Билык, П. И. Сагайда, М. А. Винников, С. А. Короткий. – Краматорск : ДГМА, 2005. – 260 с.

- 17 Сучасні технології у машинобудуванні : зб. наук.статей / за заг. ред. А. І. Грабченка. – Харків : НТУ ХПІ. – 2006. – Т. 2. – 486 с.
- 18 **Быков, В. П.** Методическое обеспечение САПР в машиностроении / В. П. Быков. – Л. : Машиностроение, 1989. – 255 с.
- 19 **ГОСТ 23501.108-85.** Системы автоматизированного проектирования. Классификация и обозначение. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 13 с.
- 20 **Тарасов, А. Ф.** Повышение ресурса элементов приводов металлургических машин на основе оптимизации процессов электромеханического взаимодействия / А. Ф. Тарасов, И. Н. Задорожня // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ, 2006. – № 1Е(6). – С. 191–195.
- 21 SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов и др. – СПб : БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
- 22 **Басов, К. А.** Ansys в примерах и задачах / К. А. Басов. – М. : КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.
- 23 **Вдовин, С. И.** Методы расчета и проектирования на ЭВМ процессов штамповки листовых и профильных заготовок / С. И. Вдовин. – М. : Машиностроение, 1988. – 160 с.
- 24 Повышение интеллектуальности САПР в заготовительном производстве / А. Ф. Тарасов, А. П. Листопад, С. А. Короткий, М. А. Винников // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 99–103.
- 25 Обзор различных систем CAD/CAM/CAE/GIS/. – Режим доступа: <http://www.cad.dp.ua/obzors/cads.php>
- 26 ArtCAM. – Режим доступа: <http://www.artcam.ru/>
- 27 **Кузнецов, С.** Открытый мир программного обеспечения / С. Кузнецов. – Открытые системы. – 2006. – № 08. – С. 5–11.
- 28 **Ложечкин, А. В.** Интеграция приложений для электронной коммерции с использованием BizTalk Server 2000 / А. В. Ложечкин. – М. : Русская редакция, 2002. – 368 с.
- 29 **Игнатович, Н.** IBM MQSeries: архитектура системы очередей сообщений / Н. Игнатович. – Открытые системы. – 1999. – № 9–10. – 125 с.
- 30 **Игнатович, Н.** Брокер интеграции приложений / Н. Игнатович. – Открытые системы. – 2003. – № 9. – 125 с.
- 31 **Yusuf, K.** Enterprise Messaging Using JMS and IBM WebSphere / K. Yusuf. – Prentice Hall, 2004. – 352 p.
- 32 **Perry, M.** Developing Solutions in Websphere Mq Integrator / M. Perry. – IBM. 2002. – 476 p.
- 33 **Вендров, А. М.** Проектирование программного обеспечения экономических информационных систем / А. М. Вендров. – М. : Финансы и статистика, 2000. – 345 с.
- 34 **Cook, Steve.** Designing Object Systems: Object-oriented modeling with syntropy. / Steve Cook, John Daniels. – Prentice Hall, 1994. – 289 p. – Режим доступа: <http://www.syntropy.co.uk/syntropy/designing-object-systems.pdf>

- 35 **Вейс, В.** SAP R/3. Программирование на языке АВАР/4 / В. Вейс, Р. Кречмер. – Лори, 2007. – 360 с.
- 36 **Орлов, С.** Технологии разработки программного обеспечения : учебник / С. Орлов. – СПб. : Питер, 2002. – 464 с.
- 37 **Деннинг, А.** ActiveX для Windows 95, Windows NT для профессионалов / А. Деннинг. – СПб : Питер, 1998. – 624 с.
- 38 **Елманова, Н.** Delphi и технология COM / Н. Елманова, С. Трепалин, А. Тенцер. – СПб : Питер, 2003. – 698 с.
- 39 **Роджерсон, Д.** Основы COM / Д. Роджерсон. – М. : Русская Редакция, 2000. – 400 с.
- 40 **Дейтел, Х. М.** Технологии программирования на Java. Том 2. Распределенные приложения. / Х. М. Дейтел, П. Дж. Дейтел, С. И. Сантри. – М. : Бинум-пресс, 2003. – 464 с.
- 41 **Будилов, В. А.** Основы программирования для Интернета. / В. А. Будилов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
- 42 **Дейтел, Х. М.** Технологии программирования на Java. Том 1. Графика, JavaBeans. / Х. М. Дейтел, П. Дж. Дейтел, С. И. Сантри. – М. : Бинум-пресс, 2003. – 560 с.
- 43 **ИД "Равновесие"** Библиотека программиста XML и JAVA2 для профессионалов / ИД "Равновесие". – СПб : Питер, 2005. – 387 с.
- 44 **Тику, Ш.** Эффективная работа: SolidWorks / Ш. Тику. – СПб : Питер, 2004. – 768 с.
- 45 **Дударева, Н.** SolidWorks 2007 на примерах / Н. Дударева, С. Загайко. – СПб : БХВ-Петербург, 2007. – 528 с.
- 46 Autodesk Inventor API. Первые шаги /Спецификация. – Режим доступа: [http://ru.wikibooks.org/wiki/Autodesk Inventor API. Первые шаги/Спецификация](http://ru.wikibooks.org/wiki/Autodesk_Inventor_API.Первые_шаги/Спецификация).
- 47 **Стремнев, А.** Практические аспекты использования Autodesk Inventor API. – Режим доступа: <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=20656&iid=941#> Варианты использования API Autodesk Inventor.
- 48 **Евченко, К.** Геометрическое ядро Parasolid в САД/САМ-системах Delcam plc: новые возможности / К. Евченко, П. Разинков // Журнал «САПР и Графика». – 2010. – № 1. – С. 10–12.
- 49 **Кочан, И. Н.** T-FLEX DOCs 2010 – выгодное решение для комплексной автоматизации. – Режим доступа: <http://www.tfex.ru/pdf/public/1616.pdf>.
- 50 **Богуславский, А.** Си++ и компьютерная графика / А. Богуславский. – М. : КомпьютерПресс, 2003. – 352с.
- 51 Siemens PLM Software JT Files Overview. – Режим доступа: http://www.pln.automation.siemens.com/zh-tw/Images/JT-Validation-Panel_tcm943-115283/pdf.
- 52 **Малюх, В. А.** Введение в современные САПР / В. А. Малюх. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 192 с.
- 53 **Григорьев, Л. Л.** Автоматизированное проектирование в холодной штамповке / Л. Л. Григорьев. – Л. : Машиностроение, 1984. – 280 с.

54 **Тарасов, А. Ф.** Комплексный подход к проектированию технологии и штамповой оснастки для листовой штамповки / А. Ф. Тарасов, С. А. Короткий // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – Вип. № 17. – С. 308–313.

55 **Хилл, Френсис.** Open GL Программирование компьютерной графики / Френсис Хилл. – СПб. : Питер, 2006. – 1088 с. – ISBN 5-316-02219-6.

56 **Тарасов, А. Ф.** Особенности проектирования инструмента для тангенциальной обкатки трубчатых заготовок в среде delcam PowerSHAPE / А. Ф. Тарасов, В. А. Паламарчук, Е. В. Горбач, М. Л. Корнева // Вісник Національного технічного університету ХПІ : збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ ХПІ, 2010. – № 57. – С. 288–292, С. 75–79.

57 **Замрий, А. А.** Практический учебный курс. CAD/CAE система ARM WinMachine / А. А. Замрий. – М. : АМП, 2008 – 144 с. – ISBN 5-901346-07-6.

58 **Пат. України 16711 UA МПК В01D 9/00.** Спосіб створення об'ємних моделей виробів у системі автоматизованого проектування / Тарасов О. Ф., Вінников М. О., Короткий С. О., Тарасов С. О. – № u200602535 ; опубл. 15.08.2006, Бюл. № 8.

59 Пневмоударная и статикодинамическая штамповка сложнорельефных листовых деталей упругими средами : монография / Е. А. Фролов, А. Я. Мовшович, И. В. Манаенков, А. Ф. Тарасов, Л. Л. Роганов. – Харків : Видавничий центр НТУ «ХПІ», 2010. – 286 с. – ISBN 978-966-476-12.

60 **Вендров, А. М.** CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем / А. М. Вендров. – М. : Финансы и статистика, 1998. – 176 с.

61 Автоматизированное проектирование программных систем на основе объектно-ориентированного подхода : курс лекций с примерами применения для студентов специальности 8.080402 «Информационные технологии проектирования» дневной и заочной форм обучения / сост. : А. Ф. Тарасов, А. А. Тарасов. – Краматорск : ДГМА, 2005. – Ч. I. – 100 с.

62 Автоматизированное проектирование программных систем на основе объектно-ориентированного подхода : курс лекций с примерами применения для студентов специальности 8.080402 «Информационные технологии проектирования» дневной и заочной форм обучения. / сост. : А. Ф. Тарасов, С. А. Короткий, А. А. Тарасов. – Краматорск : ДГМА, 2005. – Ч. II. – 76 с.

63 **Тарасов, А. Ф.** Принципы организации информации о системе для эффективной обработки на ЭВМ / А. Ф. Тарасов, Г. Б. Билык., М. А. Винников // Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем : сборник. – Краматорск : ДГМА, 1999. – С. 52–56.

64 **Тарасов, А. Ф.** Технология проектирования оборудования и оснастки на основе визуального структурного подхода / А. Ф. Тарасов, М. А. Винников, С. А. Короткий // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии. – Краматорск – Славянск, 2000. – С. 311–315.

65 **Тарасов, А. Ф.** Объектно-ориентированная технология проектирования штамповой оснастки / А. Ф. Тарасов // Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем : сб. статей. В 2 т. – Краматорск : ДГМА, 1997. – Т. 1. – С. 40–47.

66 **Билык, Г. Б.** Методика принятия проектных решений при разработке оборудования и оснастки ОМД / Г. Б. Билык, М. А. Винников, С. А. Короткий // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии : сборник. – Краматорск, 2000. – С. 481–484.

67 **Fowler, Martin.** Domain Specific Languages / Martin Fowler. Published Sep 23, 2010 by Addison-Wesley Professional. – ISBN 987-0-321-71292-3.

68 **Буч, Г.** Язык UML: Руководство пользователя / Г. Буч, Д. Рамбо, А. Джекобсон; пер. с англ. – М. : ДМК, 2000. – 432 с.

69 **Васильев, Д. И.** Основы проектирования деформирующего инструмента / Д. И. Васильев, М. А. Тылкин, Г. П. Тетерин. – М. : Высш. шк., 1984. – 223 с.

70 **Тарасов, А. Ф.** Повышение ресурса элементов приводов металлургических машин на основе оптимизации процессов электромеханического взаимодействия / А. Ф. Тарасов, И. Н. Задорожня // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ, 2006. – № 1Е(6). – С. 191–195.

71 Справочник конструктора штампов: листовая штамповка / под общ. ред. Л. И. Рудмана. – М. : Машиностроение, 1988. – 496 с.

72 **Евстратов, В. А.** Основы технологии выдавливания и конструирования штампов / В. А. Евстратов. – Х. : Вища шк.; Изд-во при Харьк. ун-те, 1987. – 144 с.

73 **Михаленко, Ф. П.** Стойкость разделительных штампов / Ф. П. Михаленко – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.

74 **Matuszewski, H.** Untersuchung den Größe der Schnitt – und Rückzugskraft und des Größenverhältnisses zueinander als Funktion von verschiedenen Parametern beim Lochen, Von Blechen / H. Matuszewski. – “Forschungsber - Landes Nordrhein – Westfalen”, 1980. – № 2994, VI. – 242 p.

75 **Hogmark, S.** Mechanism of tool wear during cutting of austenitic stainless steel sheets / S. Hogmark., O. Vingsbo. – Wear, 1978. – 51, № 1. – P. 85–104.

76 **Мірзак, В. Я.** Аналіз схем компенсації похибок системи “прес - штамп” / В. Я. Мірзак, А. П. Качанов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : сборник. – Краматорск : ДГМА, 2000. – С. 456 – 461.

77 **Harding R, Hugo** How to improve metal stamping die performance / Hugo Harding R. – “Sheet Metal Ind.”, 1971. – 48, № 2. – P. 120–126, 131–135.

78 Исследование зависимости стойкости и износа штампов от их твердости после термической обработки / Л. А. Митропольская, В. Ф. Шульгин, В. И. Грищенко и др. // Исследования в области пластического формоизменения металлов : сборник. – Ростов н/Д : Изд-во Рост. ин-та сельхоз. машиностроения, 1975. – С. 73–79.

79 **Короткий, С. А.** Систематизация технологических процессов получения листовых деталей с локальным нагружением зоны деформирования / С. А. Короткий, А. Ф. Тарасов // Вісник ДДМА. – № 3Е (14). – 2008. – С. 100–104. – Режим доступа: <http://www.nbuiv.gov.ua>.

80 Технологичность конструкции изделия : справочник / Ю. Д. Амиров [и др.]. – М. : Машиностроение, 1990. – 768 с.

81 **Мендельсон, В. С.** Технология изготовления штампов и пресс-форм / В. С. Мендельсон, Л. И. Рудман. – М. : Машиностроение, 1982. – 207 с.

82 Кузнецу-штамповщику : справ. пособие / Л. Н. Соколов [и др.]. – Донецк : Донбасс, 1986. – 144 с.

83 **Романовский, В. П.** Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – Л. : Машиностроение, 1971. – 782 с.

84 **Скворцов, Г. Д.** Основы конструирования штампов для холодной листовой штамповки. Конструкции и расчеты / Г. Д. Скворцов. – М. : Машиностроение, 1972. – 360 с.

85 **Тарасов, А. Ф.** Расчет напряженно-деформированного состояния в элементах штампов с использованием пакета конечноэлементного анализа COSMOS / Works / А. Ф. Тарасов, С. А. Короткий // Кузнечно-штамповочное производство. – 2004. – № 8. – С. 27–30.

86 **Тарасов, А. Ф.** Влияние конструкции штампа на деформацию элементов штампового блока и рабочего инструмента штампа / А. Ф. Тарасов, С. А. Короткий // Кузнечно-штамповочное производство. – 2006. – № 2. – С. 34–37.

87 Пат. 31436 UA МПК В21D 28/00. Спосіб зміцнення контуру листових деталей / Тарасов О. Ф., Короткий С. О. – № u200713239; заявл. 28.11.2007; опубл. 10.04.2008 ; Бюл. № 7.

88 **Козлов, Е. К.** Аналитический метод определения упругих деформаций штамповых плит прессов / Е. К. Козлов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1986. – № 6. – С. 26–27.

89 Тензометрия в машиностроении. Справочное пособие / под ред. Р. А. Макарова. – М. : Машиностроение, 1975. – 288 с.

90 **Короткий, С. А.** Моделирование и экспериментальное исследование упругих деформаций штамповой оснастки / С. А. Короткий // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ, 2008. – С. 148–153.

91 **Тарасов, А. Ф.** Сквозное автоматизированное проектирование штамповой оснастки с технологической подготовкой производства / А. Ф. Тарасов, С. А. Короткий // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении. – Краматорск – Хмельницкий : 2002. – С. 504–507.

92 **Жарков, В. А.** Математическое моделирование вытяжки сложных деталей / В. А. Жарков // Кузнечно-штамповочное производство. – 2000. – № 7. – С. 30–32.

93 Застосування методу верхньої оцінки і методу кінцевих елементів для аналізу процесу рівноканального кутового пресування через матрицю

із закругленою зовнішньою стінкою кута сполучення каналів / О. В. Періг, С. О. Короткий, О. М. Лаптев, С. В. Подлесний. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 94–98.

94 **Кухарь, В. В.** Моделирование формоизменения металла при осадке цилиндрических заготовок выпуклыми продолговатыми плитами / В. В. Кухарь, С. А. Короткий, В. А. Бурко // Вестник Хмельницкого национального технического университета. – Хмельницкий, 2008. – № 5 – С. 204–208.

95 **Короткий, С. А.** Моделирование и экспериментальное исследование заклепочного соединения повышенной прочности / С. А. Короткий, А. Ф. Тарасов, М. Л. Корнева // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КДПУ, 2008. – Вип. 5/2008 (52), частина 2. – С. 54–56.

96 Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов : справочник / В. И. Мяченков, В. П. Мальцев, В. П. Майборода и др; под общ. ред. В. И. Мяченкова. – М. : Машиностроение, 1989. – 520 с.

97 **Манилык, Т.** Практическое применение программного комплекса ABAQUS в инженерных задачах // Т. Манилык, К. Ильин. – М. : МФТИ, Тесис, 2006. – 67 с.

98 **Смирнов-Аляев, Г. А.** Механические основы пластической обработки металлов / Г. А. Смирнов-Аляев. – Л. : Машиностроение, 1968. – 271 с.

99 **Колмогоров, В. Л.** Механика обработки металлов давлением учебник для вузов / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1986. – 688 с.

100 **Огородников, В. А.** Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – К. : Вища школа, 1983. – 175 с.

101 **Сторожев, М. В.** Теория обработки металлов давлением : учебник для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.

102 **Сивак, И. О.** Пластичность металлов при объемном напряженном состоянии / И. О. Сивак, Е. И. Коцюбивская // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 73–76.

103 **Илюкович, Б. М.** Теоретические основы обработки металлов давлением / Б. М. Илюкович, В. С. Баакашвили, Р. В. Бединейшвили. – Тбилиси: «Сабчота Сакартвело», 1979. – 663 с.

104 **Тарасов, А. Ф.** Моделирование разделительных операций на основе оценки степени использования ресурса пластичности материала в среде системы конечно-элементного анализа ABAQUS / А. Ф. Тарасов, С. А. Короткий // Нові матеріали та технології в металургії та машинобудуванні : наук. журнал. – Запоріжжя. – 2010. – № 1. – С. 114–117.

105 **Тарасов, А. Ф.** Моделирование и экспериментальное исследование способа пробивки листовой заготовки на контурной накладке / А. Ф. Тарасов, С. А. Короткий // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : збірник наукових праць. – Краматорськ; Київ. – 2006. – № 20. – С. 217–221.

106 **Тарасов, А. Ф.** Анализ способов повышения надежности штамповой оснастки / А. Ф. Тарасов, С. А. Короткий // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении. – Краматорск, 2001. – С. 124–127.

107 **Пат. 41191 UA МПК В21D 39/03.** Спосіб одержання заклепувального з'єднання підвищеної міцності / Тарасов О. Ф., Короткий С. О. – № u200814107; заявл. 08.12.2008; опубл. 12.05.2009, Бюл. № 9.

108 **Пат. 19856 Україна, МПК В 21 D 28/24.** Спосіб одержання отворів з фаскою та підвищеною якістю зрізу / О. Ф. Тарасов, С. О. Короткий. – № u200504655; заявл. 18.05.2005; опубл. 15.01.07, Бюл. № 1. – 2 с.

109 **Атрошенко, А. П.** Технология горячей вальцовки / А. П. Атрошенко. – Л. : Машиностроение, 1969. – 176 с.

110 **Биба, Н. В.** Расчет процессов вальцовки и прокатки в калибрах в конечно-элементной системе QForm / Н. В. Биба, С. А. Стебунов, Ю. А. Гладков. – М. : ООО «КванторФорм», 2004. – С. 1–7.

111 **Скрябин, С. А.** Технология горячего деформирования заготовок из алюминиевых сплавов на ковочных вальцах / С. А. Скрябин // Монография. – Винница : А. Власюк, 2007. – 284 с.

112 Автоматизация разработки чертежа вальцованной заготовки / Чайка Д. С., Тарасов А. Ф., Сидоров А. А., Винников М. А. // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : сб. наук. Праць. – Луганськ : СНУ ім. В.Даля, 2011. – № 1 (12). – С. 315–323.

113 Особенности проектирования инструмента для тангенциальной обкатки трубчатых заготовок в среде delcam PowerSHAPE / А. Ф. Тарасов, В. А. Паламарчук, Е. В. Горбач, М. Л. Корнева // Вісник Національного технічного університету ХПІ : збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ ХПІ, 2010. – № 57. – С. 288–293.

114 Моделирование рабочей поверхности инструмента для тангенциальной обкатки труб / А. Н. Обухов, А. Ф. Тарасов, В. А. Паламарчук, В. Г. Серета, Е. В. Горбач // Вісник Національного технічного університету ХПІ : збірник наукових праць. Тематичний випуск. – Харків : НТУ ХПІ, 2010. – № 57. – С. 75–79.

115 **Сторожев, М. В.** Теория обработки металлов давлением : учебник для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.

116 **Гаврилова, Т. А.** Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. – СПб : Питер, 2000. – 384 с.

117 **Дюк, В.** Data Mining: учебный курс (+CD) / В. Дюк, А. Самойленко. – С Пб : Питер, 2001. – 386 с.

118 **Голиков, Н. В.** Применение онтологий. – Институт вычислительных технологий СО РАН. – Режим доступа: <http://www.ict.nsc.ru/ws/YM2006/10628/golikov.htm>.

119 **Тарасов, А. Ф.** Онтологический поход к построению логических моделей программных систем / А. Ф. Тарасов, О. А. Лябик. // Вестник ДГМА. – Краматорск, 2006. – № 1Е(6). – С. 50–54.

120 **Лябик, О. А.** Автоматизированное проектирование программного обеспечения с использованием онтологий предметных областей / О. А. Лябик // Сучасна інформаційна Україна: інформатика, економіка, філософія : матеріали третьої Міжнародної науково-практичної конференції. – Донецьк, 2009. – С. 160–164.

121 **Рамбо, Д.** UML : специальный справочник / Д. Рамбо, А. Якобсон, Г. Буч. – СПб : Питер, 2002. – 656 с.

122 **Ларман, К.** Применение UML и шаблонов проектирования / К. Ларман ; пер. с англ. – 2-е издание. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2002. – 624 с.

123 **Гамма, Э.** Приёмы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования / Э. Гамма, Р. Хелм, Р. Джонсон, Дж. Влиссидес. – СПб : Питер, 2001. – 368 с.

124 **Шаллоуей, А.** Шаблоны проектирования. Новый подход к объектно-ориентированному анализу и проектированию / А. Шаллоуей, Д. Трот ; пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2002. – 288 с.

125 **Листопад, А. П.** Разработка автоматизированной системы поддержки проектирования изделий машиностроения / А. П. Листопад, Ю. А. Швецов, А. Ф. Тарасов, Л. Ю. Кочерова и др. // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. праць. – Краматорськ, 2000. – С. 515–518.

126 **Тарасов, А. Ф.** Разработка САПР рабочих гидроцилиндров пресс-молотов / А. Ф. Тарасов // Надёжность режущего инструмента и оптимизация технологических систем : сборник. – Краматорск : ДГМА, 1996. – Т. 1. – С. 40–47.

127 **Тарасов, А. Ф.** Разработка методики синтеза с помощью ЭВМ новых конструктивных схем машин на примере рабочих гидроцилиндров и силовых рам пресс-молотов / Тарасов А. Ф., Роганов Л. Л. // Сборник научных статей. – Краматорск : ДГМА, 1996. – Вып. 3. – С. 66–75.

128 **Лорьер, Ж.-Л.** Системы искусственного интеллекта / Ж.-Л. Лорьер ; пер. с франц. – М. : Мир, 1991. – 568 с.

129 **Джексон, П.** Введение в экспертные системы / П. Джексон; пер. с англ. – М. : Вильямс, 2001. – 624 с.

130 **Гаврилова, Т. А.** Извлечение и структурирование знаний для экспертных систем / Т. А. Гаврилова, К. В. Червинская. – М. : Радио и связь, 1992. – 260 с.

131 Базы данных. Интеллектуальная обработка информации. / И. В. Корнев [и др.] – М. : Нолидж, 2001. – 496 с.

132 **Винников, М. А.** Поиск аналогов элементов изделий в хранилищах САД-проектов на основе онтологий / М. А. Винников, С. А. Тарасов, Е. А. Шаровар // Надёжность режущего инструмента и оптимизация технологических систем. – Краматорск : ДГМА, 2006. – С. 63–68.

133 **Тарасов, А. Ф.** Методика поиска аналогов в базах объемных моделей изделий, созданных в САД- системах / А. Ф. Тарасов, М. А. Винников, С. А. Тарасов, С. В. Курташ // Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем. – Краматорск : ДГМА, 2005. – С. 52–57.

134 **Винников, М. А.** Поиск аналогов узлов конструкций в базе данных САД-на основе онтологического подхода / М. А. Винников, С. А. Тарасов, С. А. Короткий. – Краматорск : ДГМА, 2008. – 6 с.

135 Информационная технология поиска аналогов изделий в хранилищах метаданных о САД-проектах / А. Ф. Тарасов, М. А. Винников, С. А. Тарасов, О. А. Лябик // Наукові праці ДонНТУ, серія «Обчислювальна техніка та автоматизація». – Донецьк, 2010. – Вип. 171. – С. 118–127.

136 **Орлов, П. И.** Основы конструирования / П. И. Орлов. – М. : Машиностроение, 1972. – Кн. 2. – 525 с.

137 **Норенков, И. П.** Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем / И. П. Норенков. – М. : Высш. школа, 1986. – 304 с.

138 **Жыжырий, Е. А.** Математическое обеспечение систем поиска, основанных на онтологиях / Е. А. Жыжырий, С. С. Щербак. – Режим доступа: http://shcherbac.net/mat_obez/

139 **Пейчева, В. В.** Модели баз знаний технологического назначения Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні / В. В. Пейчева, Ю. А. Потоцкая // Зб.наук.праць : в 2-х ч. – Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2004. – Ч. 1. – С. 218–226.

140 **Бабин, Д. В.** Повышение эффективности извлечения знаний на основе интеллектуального анализа и структурирования информации / Д. В. Бабин, С. М. Вороной, Е. В. Малащук // Искусственный интеллект. – 2005. – № 3. – С. 259–264.

141 **Тиори, Т.** Проектирование структур данных. В 2 кн. / Т. Тиори, Дж. Фрай ; пер. с англ. – М. : Мир, 1985. – 287 с.

142 **Флорес, И.** Структуры и управление данными / И. Флорес; пер. с англ. – М. : Финансы и статистика, 1982. – 319 с.

143 **Мюррей, Д.** SolidWorks // Д. Мюррей. – М. : ЛОРИ, 2001. – 458 с.

144 **Guarino, N.** Formal ontology and Information systems / N. Guarino // Proc. Of Principles and Methods. – Data & Knowl. Engineering, 1998. – № 25. – P. 161–197.

145 **Клещев, С. А.** Математические модели онтологий предметных областей. Часть 1. Существующие подходы к определению понятия «онтология» / С. А. Клещев, И. Л. Артемьева // Научно-техническая информация. – 2001. – № 2. – С. 65–86. – (Серия «Информационные системы и процессы» ; вып. 2).

146 **Рофэйл, Э.** COM и COM+. Полное руководство / Э. Рофэйл. – М. : ВЕК, 2000. – 560 с.

147 **Верников, Г. Г.** Стандарт онтологического исследования IDEF5 / Г. Г. Верников // Корпоративный менеджмент. – 2000. – № 10. – С. 48–53.

148 **Peraketh, В.** Ontology Capture Method (IDEF5) / В. Peraketh, С. P. Menzel, R. J. Mayer // Interim technical report. – Mar 92-Sep 94. – 196 p.

149 **Шалфеева, Е. А.** Классификация структурных свойств онтологий / Е. А. Шалфеева // Искусственный интеллект. – 2005. – № 3. – С. 67–77.

150 **Кучеренко, Е. И.** Некоторые аспекты анализа развития нечетких онтологий / Е. И. Кучеренко, Д. А. Павлов // Искусственный интеллект. – 2005. – № 3. – С. 162–169.

151 World Wide Web Consortium (W3C). – Режим доступа: <http://www.w3.org/>

152 Protege User Manual. – Режим доступа: <http://protege.stanford.edu/>

153 Resource Description Framework (RDF). – Режим доступа: <http://www.w3.org/RDF/>

154 **Шрайбман, В.** Выражение семантики данных. RDF против XML. – Режим доступа: <http://www.citforum.ru/internet/xml/rdf/xml/>

155 The Extensible Markup Language (XML). – Режим доступа: <http://www.w3.org/XML/>

156 RDF/XML Syntax Specification. – Dave Beckett (University of Bristol), Brian McBride (Hewlett Packard Labs)

157 SPARQL Query Language for RDF / Eric Prud'hommeaux, W3C; Andy Seaborne. – Hewlett-Packard Laboratories, Bristol. – Режим доступа: <http://www.w3.org/TR/rdf-spargal-guery/>

158 OWL Web Ontology Language Guide. W3C. – Режим доступа: <http://www.w3.org/TR/owl-guide/>

159 Corese User Manual — 23/02/2007 – Режим доступа: [http://www-sop.inria.fr/acacia/soft/corese/manual/index 2 2 2.html](http://www-sop.inria.fr/acacia/soft/corese/manual/index%202%202.html)

160 Mafra- a mapping framework for distributed ontologies / Alexander Maedche, Boris Motik, Nuno Silva, and Raphael Volz. – In Proceedings of the ECAW 2002, 2002.

161 **Зыков, А. А.** Основы теории графов / А. А. Зыков. – М. : Наука, 1987. – 384 с.

162 **Родионов, Б. Н.** Организация, планирование и управление машиностроительным предприятием / Б. Н. Родионов– М. : Машиностроение, 1990. – 328 с.

163 **Таран, С. В.** Модель оптимальной загрузки оборудования в единичном производстве/ С. В. Таран // Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – 2008. – № 3Е(14).– С. 155–159.

164 **Тюленев, Л. В.** Организация и планирование машиностроительного производства : учебное пособие / Л. В. Тюленев. – СПб. : Бизнес-пресса, 2001. – 304 с.

165 **Грибова, В. В.** Управление проектированием и реализацией пользовательского интерфейса на основе онтологий / В. В. Грибова, А. С. Клещев // Проблемы управления. – 2006. – № 2. – С. 58–62.

166 **Таран, С. В.** Модель оптимального расписания работы механического цеха по изготовлению единичных изделий / С. В. Таран // Интеллектуальні системи в промисловості і освіті. Друга міжнародна науково-технічна конференція. – Сумы, 2009. – С. 75–76.

167 **Таран, С. В.** Оптимизационно-имитационный подход для составления оперативных планов в единичном производстве/ С. В. Таран // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : збірник наукових праць. – Краматорськ; Киев. – 2008. – № 23. – С. 272–277.

168 **Томашевский, В.** Имитационное моделирование в среде GPSS / В. Томашевский, Е. Жданова. – М. : Бестселлер, 2003. – 416 с.

169 **Кудрявцев, Е. М.** SPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем / Е. М. Кудрявцев. – М. : ДМК Пресс, 2004. – 320 с.

170 **Кузьменко, В. М.** Спеціальні мови програмування. Програмні та інструментальні засоби моделювання складних систем : навч. посібник / В. М. Кузьменко. – Харків : ХТУРЕ, 2000. – 322 с.

171 **Кузьменко, В. М.** Інформаційна технологія імітаційного моделювання на основі ідеографічного підходу/ В. М. Кузьменко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ : ДДМА, 1999. – № 9. – С. 64–70.

172 **Таран, С. В.** Использование идеографического подхода для разработки имитационной модели изготовления изделий машиностроения / С. В. Таран // VI международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании». – Болгария : Варна, 2010. – Т. 2 (Ч. 2). – С. 167–169.

Наукове видання

**ТАРАСОВ Олександр Федорович,
ВІННИКОВ Максим Олександрович,
КОРОТКИЙ Сергій Олександрович та ін.**

**РОЗРОБЛЕННЯ ІСАПР ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДІВ
ІНЖЕНЕРІЇ ЗНАНЬ**

ВИРІШЕННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАВДАНЬ

Монографія

(Російською мовою)

Редагування

І. І. Дьякова

Комп'ютерне верстання

О. М. Болкова

Формат 60 × 84/16. Ум. друк. арк. 12,32.
Обл.-вид. арк. 15,46. Тираж 300 пр. Зам. № 1231.

Видавець

Донбаська державна машинобудівна академія
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 1633 від 24.12.2003

Виготівник

ЦТPI «Друкарський дім»
84306, м. Краматорськ, вул. Олекси Тихого, 1-б,
тел.: (06264) 6-73-34, (066) 076-76-21.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 5071 від 23.03.2016