



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ДГТУ)**

Факультет «Технология машиностроения»

Кафедра «Технологии формообразования и художественная обработка материалов»

**ЛЕКЦИИ**

по дисциплине

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

Составитель:

доцент, к.т.н.

И.А. Церна

Ростов-на-Дону, 2021

## **1. Предпосылки развития информационных технологий в машиностроительном производстве**

Прогресс производственной сферы человеческой деятельности неразрывно связан с историей энергетических революций, научно-технических открытий и достижений в области машиностроения, которое к середине XX столетия стало основой индустрии развитых стран, обеспечив их экономическое и военно-техническое могущество.

Во второй половине XX столетия машиностроение вышло на новый виток развития, связанный не только с достижениями в энергетике, но в большей мере с использованием наукоемких («высоких») технологий, основанных на результатах фундаментальных научных исследований в области физики, химии, биологии...

В современном постиндустриальном обществе машиностроительное производство ориентируется не на использование единичных машин, выполняющих отдельные операции, а на создание и эксплуатацию наукоемких технических систем, реализующих законченную производственную функцию.

Практически все технические объекты, созданные на предприятиях любой отраслевой подгруппы машиностроения (ракетно-космической, авиастроительной, автомобилестроительной, станкостроительной) представляют собой многоуровневые системы, составленные из большого количества объектов низших иерархических уровней различной физической природы.

Создание таких систем требует подготовки для машиностроительных предприятий России квалифицированных инженерных кадров, обладающих необходимым набором компетенций в области комплексного решения задач синтеза и анализа технических объектов в единой проектно-расчетной среде в условиях полного компьютерного сопровождения всех этапов жизненного цикла продукции от начала ее проектирования и до конца эксплуатации с использованием эффективных средств современных информационных технологий.

## **2. Тенденции развития машиностроительного производства**

Успешность любого машиностроительного предприятия во многом определяется его способностью обеспечивать выпуск продукции, соответствующей быстро меняющимся запросам отдельных групп потребителей и рынка в целом. Это заставляет промышленные предприятия буквально бороться за повышение качества выпускаемой продукции при одновременном расширении ее номенклатуры, повышении гибкости используемых технологий и оборудования и сокращении сроков подготовки производства.

В этих условиях современное машиностроительное производство приобретает следующие основные тенденции развития [1].

1. Облик изделия во все меньшей степени определяется его разработчиком как авторская инициатива, и во все большей степени зависит от требований его будущего потребителя. Это касается не только комплектации, но и качественных характеристик изделия.

2. Головные предприятия – инициаторы промышленного бизнеса – все больше сосредотачиваются на окончательной сборке изделия, а все большая доля производства приходится на долю компаний-поставщиков.

3. Специализация поставщиков от традиционных принципов – производственно-технологического, конструктивного, сырьевого или территориального – меняется в сторону специализации системного типа. При этом поставщик стремится продавать определенную систему целиком, независимо от того, как она распределена на конечном изделии (например, систему кондиционирования пассажирского салона, гидравлическую систему или пилотажно-навигационный комплекс). Предлагаются также услуги специалистов для установки, регулировки и проверки системы на головном предприятии.

4. Компании предпочитают нанимать специалистов на срок реализации текущей производственной темы и освобождать их после завершения цикла разработки. Доля постоянного штата сотрудников компании-производителя изделия

постепенно уменьшается, а доля контрактников, нанятых конкретно под данный проект, – увеличивается.

5. При выполнении работ поставщики получают возможность использовать вычислительные мощности (сервер) хозяина проекта, работая в режиме удаленных терминалов. Это снижает затраты и риск инвестиций в программы и аппаратную часть для небольших фирм.

6. Предприятие-потребитель продукции все чаще становится прямым инвестором в его разработку. Вместо того чтобы сначала копить деньги, а потом разом покупать то, что предлагается на рынке, заказчик сам авансирует свое будущее приобретение. При этом заказчик забирает у предприятия-изготовителя изделия часть технического и финансового риска. Такое растянутое во времени расходование капиталов и более равномерное распределение рисков благоприятно сказывается на общих финансовых показателях как производителя, так и потребителя.

7. Развитие производственной кооперации приводит к появлению виртуальных предприятий, которые являются временными и создаются на период производства конкретного продукта. При этом все компании, участвующие в виртуальном предприятии, работают как департаменты одной фирмы, с одной инфраструктурой и по единым корпоративным правилам. Границы, языки, локальная специфика и расстояния становятся незаметными для деятельности каждого из них. Предприятия-поставщики, как правило, стоят в очереди к обладателю промышленной инициативы на конкурентной основе.

8. Для владельцев бизнес-инициативы (обладателей интеллектуальной собственности на производство с применением данной торговой марки) продаваемым товаром становится не только сама продукция, но и право на ее производство. Это право обычно ограничено сроками или объемом выпуска и подразумевает возможность перевода лицензионного производства на удаленные территории с более благоприятными экономическими условиями.

Приведенные тенденции обуславливают такие требования к применяемым информационным технологиям, как обеспечение высокого комплексного уровня автоматизации и организация совместного использования информации о продукте

большим числом географически удаленных друг от друга участников бизнес-процесса с поддержкой всех этапов жизненного цикла изделия.

### **3. Применение PLM-решений в машиностроении**

Управление жизненным циклом продукции осуществляется в рамках концепции PLM (Product Lifecycle Management), суть которой подробно раскрывается в большом количестве аналитических материалов [1-2].

Концепция PLM возникла в отраслях, связанных с разработкой и производством сложных технических систем для авиационно-космической отрасли, оборонно-промышленного комплекса, точного машиностроения и др. Поэтому довольно долго в нашей стране PLM-решения ассоциировались именно с предприятиями данного профиля, и предполагалось, что они оперируют в основном техническими (в первую очередь конструкторскими) данными. Но в последние годы ситуация качественно изменилась.

Теперь уже не имеет значения, что именно понимается под словом «продукция» – штамповочный пресс, литейная машина, металлорежущий станок, летательный аппарат или сложная информационная система.

PLM— это стратегический подход к бизнесу, применяющий набор интеллектуальных инструментальных средств поддержки совместного создания, управления, изменения и использования данных о продукции машиностроительного производства в рамках расширенной модели предприятия. Такая модель привлекает к работе с данными о продукции не только ее производителя, но также контрагентов и конечных заказчиков с обменом данными в рамках единого информационного пространства, включая единые бизнес-процессы и бизнес-приложения. При этом PLM управляет преимущественно цифровыми данными и не является какой-либо конкретной технологией или каким-либо отдельным программным продуктом. Таким образом, речь идет о стратегическом подходе, для реализации которого требуется использовать не одну, а несколько систем в рамках единого интегрированного решения и не исключено, что эти системы могут быть от разных производителей.

PLM-система позволяет также собирать и систематизировать через сервисные центры предприятия-изготовителя эксплуатационные характеристики и данные об отказах, поступающие от потребителей выпущенной продукции. Это позволяет своевременно реагировать на проявление негативных эксплуатационных показателей, совершенствовать конструкции выпускаемых образцов продукции, минимизировать потери от возможных отказов и снижать риски возникновения проблемных ситуаций.

В отечественном машиностроении экспертным сообществом отмечается стабильно высокая заинтересованность промышленных предприятий в расширении использования PLM-решений [3]. Наибольшую активность в этом вопросе проявляют предприятия оборонной промышленности, авиастроения и транспортного машиностроения, имеющие стратегическое значение в промышленной политике страны. Потребности данных отраслей, обусловленные перспективными программами разработки и производства новых видов продукции, порождают цепную реакцию, стимулируя поставщиков первого и второго уровня совершенствовать свои информационные системы для разработки и производства компонентов, необходимых заказчикам. При этом строгая необходимость соответствовать высоким требованиям к качеству, срокам выполнения работ и цене конечной продукции определяет осознанную необходимость предприятий каждого уровня технологической цепочки направлять часть полученных финансовых средств на внедрение необходимых в перспективе элементов цифрового производства.

#### **4. Основные компоненты и преимущества PLM-решений**

Согласно сложившимся представлениям [4] основными компонентами PLM-решений на предприятии являются (рис. 1):

- PDM-системы для хранения и управления данными об изделии;
- CAD-системы для разработки конструкции изделия;
- CAE-системы для инженерных расчетов и анализа проектно-прочностных характеристик изделия;

- CAPP-системы для разработки техпроцессов производства изделия;
- CAM-системы для разработки управляющих программ станков с ЧПУ;
- MPM-системы для моделирования и анализа производства изделия;
- ERP-системы для планирования ресурсов предприятия.

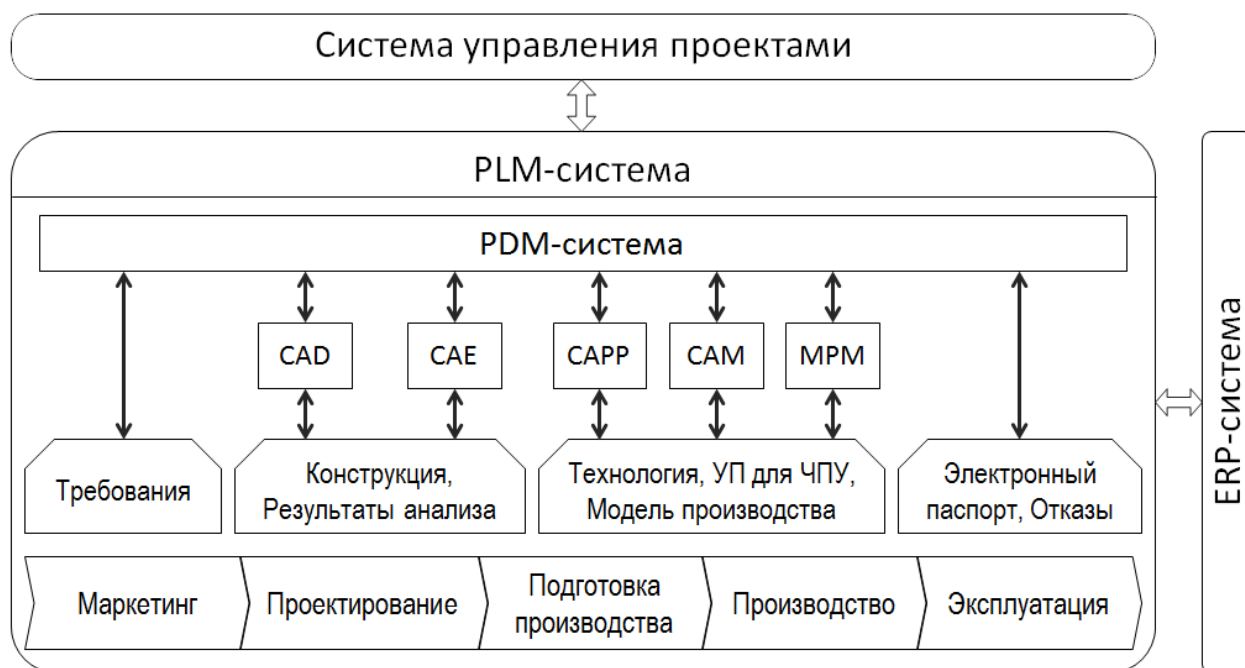


Рис. 1. PLM-система и ее место в информационной структуре предприятия

PDM-системы (Product Data Management) — организационно-технические системы управления всей информацией об изделии. С их помощью отслеживаются большие массивы данных и инженерно-технической информации об этапах проектирования и производства изделий, а также осуществляется поддержка их эксплуатации, сопровождения и утилизации. Такие данные, относящиеся к одному изделию и организованные PDM-системой, называются цифровым макетом. PDM-системы интегрируют информацию любых форматов и типов, предоставляя её пользователям уже в структурированном виде с привязкой к особенностям современного промышленного производства. Они работают не только с текстовыми документами, но и с геометрическими моделями и данными, необходимыми для функционирования автоматических линий и станков с ЧПУ [5].

CAD-системы (Computer Aided Design) — системы компьютерной поддержки проектирования. Создают электронное описание конструкции изделия, которое в машиностроении реализуется на основе твердотельных моделей его деталей и сборочных единиц. Эти модели в дальнейшем используются в CAE, CAM и CAPP-системах и поэтому являются основным элементом конструкторской документации машиностроительных PLM-систем.

CAE-системы (Computer Aided Engineering) — системы компьютерной поддержки инженерных расчетов. Одни представители этих систем обеспечивают совмещение процедур синтеза твердотельной модели изделия с вычислением его проектных и прочностных характеристик, а другие — анализ напряженно-деформированного состояния изделия по его готовой твердотельной модели методом конечных элементов с оптимизацией эксплуатационных показателей в ходе вычислительных экспериментов.

CAPP-системы (Computer Aided Production Planning) — системы компьютерной поддержки технологической подготовки производства. Являются программными продуктами, помогающими автоматизировать процесс подготовки производства, а именно проектирование технологических процессов с разработкой маршрута изготовления по готовой модели изделия, выполненной в CAD-системе. В этот маршрут входят сведения о последовательности технологических операций изготовления детали и сборочных операциях (при необходимости), а также об оборудовании, используемом на каждой операции, и о приспособлениях и инструменте, при помощи которого на этих операциях выполняется обработка. Обычно технологическая подготовка производства заключается в проектировании технологических процессов на новые изделия, или адаптация технологических процессов по уже имеющейся базе типовых технологических процессов [6].

CAM-системы (Computer Aided Manufacturing) — системы компьютерной поддержки подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ. Исходным объектом для создания программы управления станком является твердотельная модель изделия, разработанная в CAD-системе. Результат моделирования вводится в станок в виде данных о размерах заготовки, параметрах ее обработки, траекториях



движения детали и режущего инструмента, команд управления подачей и другими движущимися системами станка. Современные САМ-системы используются при разработке сложных технологических процессов, а в металлообработке применяются, в основном, как средство синтеза программ для управления станками с ЧПУ и моделирования процессов обработки. Система рассчитывает траектории и относительное движение инструмента и заготовки. Благодаря наличию специального программного модуля, называемого постпроцессором, при построении управляющей траектории САМ-система учитывает особенности кинематики конкретного станка, на котором осуществляется обработка [7].

MPM-системы (Manufacturing Process Management) — системы управления производственными процессами позволяют определить, как именно изделие должно изготавливаться. Пакеты программных приложений MPM-систем решают задачи оптимизации последовательности сборки; координации движения оборудования; расчета производительности, коэффициента использования и балансировки загрузки сборочных линий; анализа производственных затрат. В результате их работы обеспечивается технологический процесс, содержащий полное описание изготовления, сборки, испытаний и упаковки изделия. Такое описание техпроцесса выступает основой для совместной работы технологов, производителей, поставщиков и субподрядчиков [8].

ERP –системы (Enterprise Resource Planning) — конкретный программный пакет, реализующий организационную стратегию интеграции производства и операций управления трудовыми ресурсами, финансового менеджмента и управления активами, ориентированную на непрерывную балансировку и оптимизацию ресурсов предприятия и обеспечивающую общую модель данных и процессов для всех сфер деятельности.

В качестве характерной особенности ERP-стратегии отмечается принципиальный подход к использованию единой транзакционной системы для подавляющего большинства операций и бизнес-процессов организации, вне зависимости от функциональной и территориальной разобщённости мест их возникновения и прохождения, обязательность сведения всех операций в единую базу

для последующей обработки и получения в реальном времени сбалансированных планов.

Необходимость всеобъемлющего применения ERP-системы в территориально-распределённых организациях требует поддержки в единой системе множества валют и языков. Более того, необходимость поддерживать несколько организационных единиц (несколько юридических лиц, несколько предприятий), несколько различных планов-счетов, учётных политик, различных схем налогообложения в едином экземпляре системы оказывается необходимым условием для применения в холдингах и транснациональных корпорациях [9].

Можно выделить следующие ключевые преимущества использования PLM-решений [10]:

- сокращение сроков проектирования и производства;
- сокращение количества ошибок;
- усиление контроля за качеством;
- сокращение издержек;
- сопровождение интеллектуальной собственности предприятия;
- обеспечение данными АСУП/ERP-систем.

## **5. Нисходящее и восходящее проектирование**

Традиционное инженерное проектирование предполагает использование накопленного опыта решения конструкторских задач и расчетных методик, реализуемых в конкретных предметных областях проектной деятельности, в сочетании с интуицией разработчиков.

Современное инженерное проектирование получило развитие после появления вычислительной техники и начала ее использования для формализации проектных процедур.

Теория современного инженерного проектирования характеризуется собственной системой основных понятий, терминов, классификаций, способов оценки разрабатываемых объектов, содержанием и последовательностью решения

проектных задач [11]. Особенностью этих задач в машиностроении является обязательное и обстоятельное количественное обоснование принимаемых инженерных решений, что определяет их ярко выраженный расчетный характер и неразрывную глубокую связь проектных процедур синтеза и анализа.

Объекты проектирования в машиностроении характеризуются сложностью конструкций, которые представляют собой многоуровневые системы, составленные из большого количества подсистем различной физической природы.

На примере кривошипного пресса можно убедиться, что конструкция данного объекта содержит составную станину с гидравлическим устройством разгрузки, главным и дополнительным многозвенными исполнительными механизмами, пневматической системой включения, зубчатым многоступенчатым приводом, несколькими электродвигателями и др.

Задача проектирования кривошипного пресса, таким образом, распадается на задачи проектирования большого количества элементов меньшей сложности, образующих функционально законченные подсистемы, которые рассматриваются как самостоятельные объекты проектирования низшего иерархического уровня. При этом пресс в целом рассматривается как объект высшего иерархического уровня.

В зависимости от очередности решения задач проектирования на различных иерархических уровнях различают нисходящее и восходящее проектирование. Проектирование является нисходящим, если решение инженерных задач на высших иерархических уровнях предшествует решению задач на низших уровнях. При восходящем проектировании последовательность решения задач получается обратной.

При нисходящем проектировании объект разработки создается в условиях, когда его подсистемы конструктивно не сформированы и, следовательно, сведения об их свойствах носят предположительный характер.

При восходящем проектировании подсистемы низшего иерархического уровня создаются раньше, чем формируется конструкция объекта разработки и, следовательно, предположительный характер носят свойства этого объекта как системы высшего иерархического уровня.

Таким образом, оба способа проектирования не предоставляют разработчику всей исходной информации, необходимой для получения оптимального решения с первого подхода к поставленной задаче. Следовательно, обычной практикой является повторение проектных процедур синтеза и анализа конструкции объекта разработки с последовательным приближением результатов к оптимальному для заказчика варианту. То есть инженерное проектирование имеет явный итерационный характер.

В реальной инженерной практике проектирование объектов машиностроительного производства осуществляется сочетанием восходящего и нисходящего способов, но последний имеет преимущественное использование. Восходящее проектирование имеет ограниченное применение при разработке подсистем с унифицированными элементами, например, систем включения кривошипных прессов. При этом интуиция разработчика, подкреплённая богатым опытом решения проектных задач, по-прежнему остается важным слагаемым успеха.

## **6. Типовая последовательность проектных процедур**

Выявленный итерационный характер инженерного проектирования приводит к тому, что наряду с исходным и окончательным описаниями объекта разработки возникают его промежуточные описания. Эти промежуточные проектные решения используются для оценки соответствия свойств разрабатываемого объекта параметрам технического задания (ТЗ).

Формализованная совокупность действий, результатом которых является получение проектного решения, называется *проектной процедурой*. Проектная процедура называется *типовой*, если она предназначена для неоднократного применения при проектировании объектов различного типа. К типовым проектным процедурам относятся анализ и синтез проектируемых объектов (рис. 2) [11].

Синтез заключается в создании описания объекта, анализ – в определении свойств объекта по его описанию. Одновариантный анализ позволяет установить соответствие принятого проектного решения техническим требованиям, многовариантный – улучшить проектное решение путем его целенаправленного

изменения. Такое улучшение можно выполнять до получения работоспособного, или наилучшего (оптимального), с точки зрения проектировщика, варианта проектного решения либо до тех пор, пока не появится убежденность в невозможности получения проектного решения при имеющемся ТЗ.

Таким образом, принципы системного подхода к проектированию изделий машиностроения основаны на взаимосвязи процедур анализа, оптимизации и синтеза с явным характером «вложенности». При этом анализ в отличие от других процедур присутствует всегда, и поэтому как проектная процедура является основой процесса проектирования.

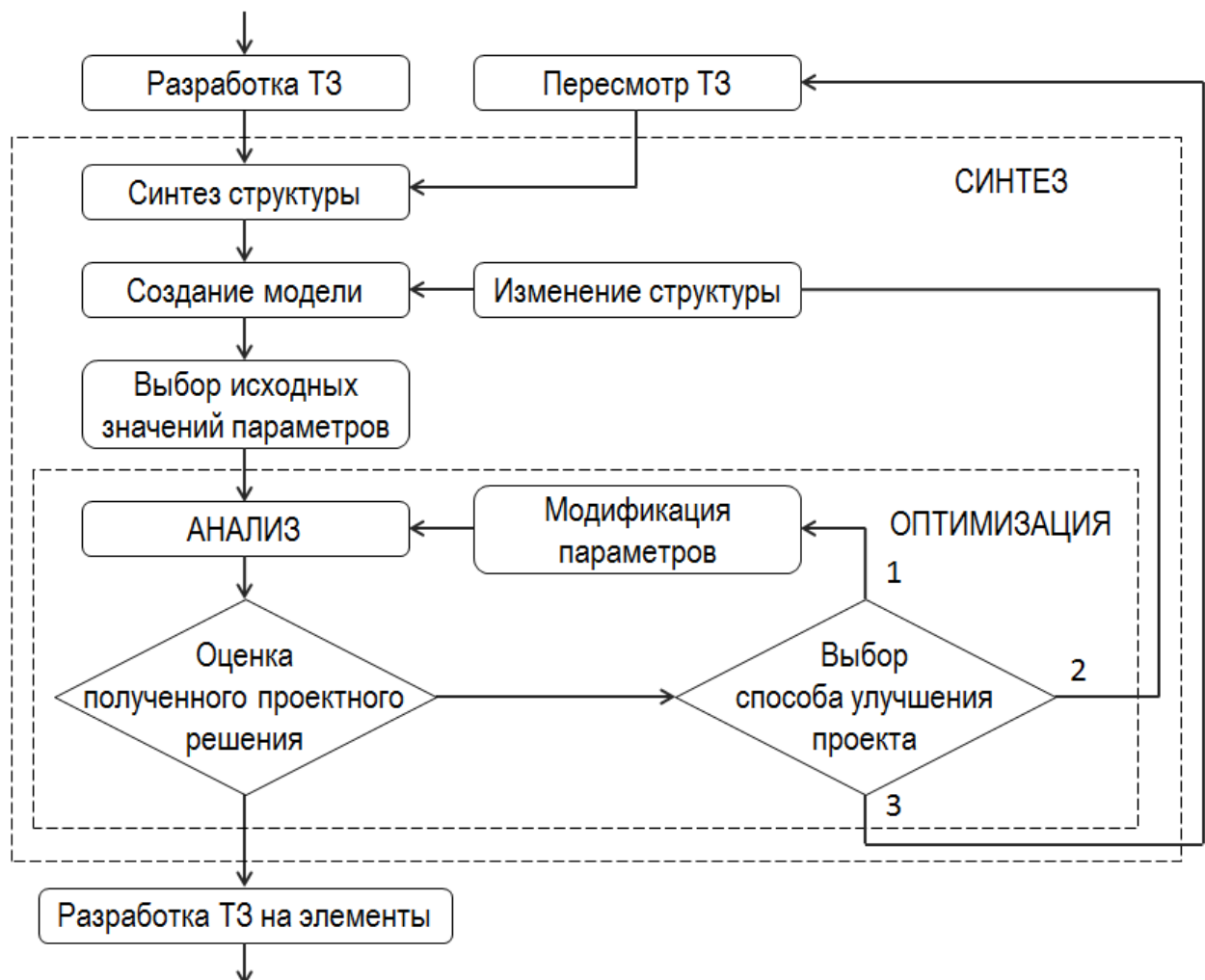


Рис. 2. Типовая последовательность проектных процедур  
при нисходящем проектировании

## **7. Технологии параметрического, прямого и синхронного моделирования**

Средствами реализации процедур синтеза и анализа в современном инженерном проектировании являются CAD/CAE-системы, входящие в состав рассмотренных основных компонент PLM-решений, используемых машиностроительными предприятиями (рис. 1).

Синтез объектов машиностроительного производства осуществляется в CAD-системах твердотельным моделированием их деталей и сборок, которые далее используются в CAE-системах для анализа полученных проектных решений. Поэтому развитие технологий твердотельного моделирования является предметом постоянного внимания инженерного сообщества, а выбор CAD-системы с той или иной технологией моделирования требует продуманного подхода.

До недавнего времени в твердотельном моделировании выделяли две технологии: параметрическое моделирование с деревом построения и прямое моделирование без дерева построения.

Параметрическое моделирование с деревом построения создает модели в пошаговом режиме, который отображается деревом построения, описывающим поэлементный состав модели в последовательности выполненных операций. Элементы модели управляются геометрическими связями и размерами, которые задаются как значениями, так и уравнениями. Это обеспечивает предсказуемость автоматических обновлений модели при редактировании и надежность сохранения проектного замысла. Однако этот вид моделирования имеет и недостатки:

- поэлементный состав модели необходимо планировать для закладки в нее параметров, управляющих ее редактированием по требуемым показателям, но характер редактирования не всегда удастся предвидеть;
- редактирование модели предполагает поиск в дереве построения родительского (для данного изменения) элемента с выявлением его параметров, подлежащих варьированию, что приводит к заметным затратам времени, особенно в моделях с длительной историей построения;

- модели подсистем объекта, разработанные смежниками на разных иерархических уровнях проектирования и унаследованные от ранее выполненных проектов, могут быть представлены в разных форматах, что часто приводит к потере дерева построения и связей между элементами моделей при их трансляции в проект разработчика.

Прямое моделирование создает геометрию объекта проектирования без использования конструктивных элементов и практически не поддерживает управление моделью посредством размеров и геометрических связей.

Разработка и редактирование модели осуществляется прямым воздействием на ее граничные элементы с помощью операции сжатия/вытягивания для вычитания/добавления материала и операции перемещения граней, ребер и вершин с автоматической корректировкой прилегающей геометрии. Повышение сложности модели не оказывает влияния на производительность системы, так как пересчет модели происходит только в месте ее модификации.

Высокая скорость и гибкость прямого моделирования создают наилучшие условия для быстрого перебора различных вариантов концепции модели, что определяет несомненные достоинства этой технологии при компоновке геометрии объекта разработки на стадии эскизного проектирования.

Использование технологии прямого моделирования также предоставляет разработчику возможность быстрого импортирования в свой проект трехмерных геометрий из форматов основных CAD-систем, предоставленных смежниками или унаследованных от ранее выполненных проектов, с дальнейшей их модификацией под задачи синтеза-анализа и подготовки производства.

Однако, импортирование «чужих» параметрических моделей в систему прямого моделирования может привести к разрушению их проектного замысла, так как ранее созданные элементы при последующем редактировании методом прямого моделирования также оказываются измененными.

Кроме того, отсутствие параметризации в прямом моделировании становится недостатком этой технологии при необходимости строгого описания структуры

модели с точным размерным контролем, что является привычным требованием на завершающем этапе проектирования изделий машиностроительного производства.

Можно ли выбрать одну из рассмотренных технологий и отвергнуть другую? Конечно, нет. Рациональнее использовать достоинства каждой из них встраиванием возможностей прямого моделирования в параметрическую среду. Примером такого подхода является синхронная технология моделирования, разработанная на основе геометрического ядра Parasolid и набора вариационных решателей D-Cubed, реализованная в продуктах Solid Edge и NX компании Siemens PLM Software.

Технология синхронного моделирования эффективно сочетает скорость и простоту прямого моделирования с точностью управления, характерной для параметрического моделирования. Эта технология использует прямое моделирование для выполнения простых операций типа перемещения или поворота граней модели, возможности параметрического моделирования для работы с геометрически более сложными конструктивными элементами, а также точный размерный контроль за поведением модели посредством управляющих размеров и геометрических связей.

Компания Siemens PLM Software обращает внимание машиностроительных предприятий на следующие достоинства синхронной технологии моделирования [12]:

- быстрое создание проектов при моделировании без истории построений;
- быстрое внесение изменений на поздней стадии проектирования простым обновлением размеров или сжатием/вытягиванием элементов геометрии без проблем с перестроением и трудоемких доработок;
- изменение импортированных из разных CAD-систем 3D данных в формат документов собственного проекта с возможностью их модификации;
- одновременное изменение нескольких деталей в сборке простым их выделением и перетаскиванием без редактирования истории построений;
- подготовка моделей деталей и сборок к анализу методом конечных элементов для количественной и качественной оценки их напряженно-деформированного состояния в рамках проектных процедур анализа объекта проектирования.



## 8. Технологии совмещения процедур синтеза и анализа в проектировании объектов машиностроительного производства

Машиностроительные предприятия России широко используют технологию синхронного моделирования, реализованную в системах NX и Solid Edge, которые обеспечивают комплексное решение задач синтеза и анализа технических объектов в единой проектно-расчетной среде с возможностью варьирования формой, размерами и материалами их элементов, видом и величиной приложенных нагрузок, и характером ограничений движения.

Рассмотрим комплексную задачу моделирования в системе Solid Edge корпуса электромагнитного захвата для промышленного робота листоштамповочного комплекса оборудования с конечно-элементным анализом разработанной конструкции в приложении Solid Edge Simulation.

Исходными данными для решения задачи являются эскиз корпуса захвата (рис. 8.1) и размеры его элементов, указанных в табл. 8.1. Изделие «Корпус захвата» является сварной конструкцией, состоящей из деталей «Цанга», «Стойка» и «Обойма». Цанга обеспечивает установку и фиксацию хомутом (не показан) корпуса захвата на пальце руки промышленного робота. В обойме с помощью стяжного винта закрепляется электромагнит (не показан).

Таблица 8.1.

Размер	Элемент
$d, L$	диаметр и длина стойки
$d_o$	диаметр отверстий в цанге и обойме под стойку и винт
$d_2, a$	диаметр и длина цанги
$d_1, b$	диаметр и длина отверстия в цанге под штырь руки робота
$p, h, d_3$	ширина, длина и диаметр отверстия пазов цанги и обоймы
$D_1, D_2$	диаметры наружной грани обоймы и посадки электромагнита
$A, B, H$	размеры в плане и высота обоймы
$M_o, l_o$	диаметр резьбы стяжного винта и отступ его отверстия в обойме

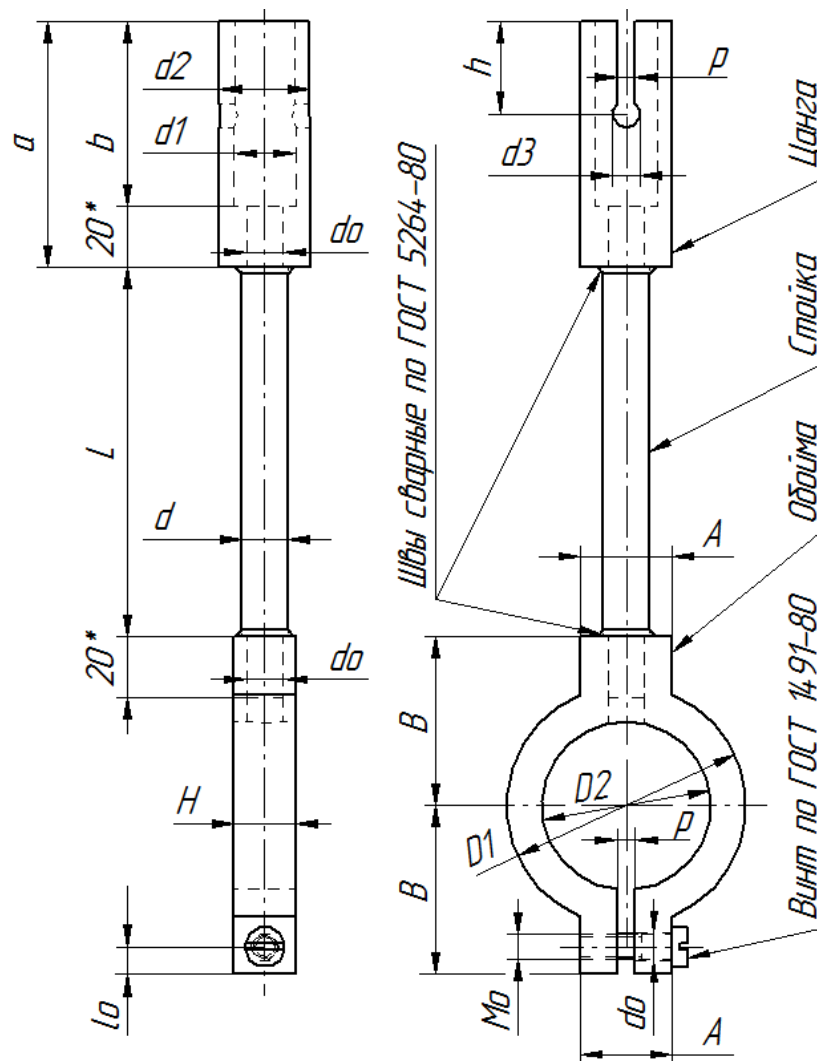


Рис. 8.1. Корпус электромагнитного захвата промышленного робота

Решение задачи выполняется в следующей последовательности.

1. Твёрдотельное моделирование деталей и сборки корпуса захвата.
2. Постановка задачи конечно-элементного анализа корпуса захвата.
3. Обработка результатов и формулирование выводов.


### 8.1. Моделирование деталей и сборки корпуса захвата

Запуск проектов трех деталей и стяжного винта выполняется в среде:



ЕСКД мм Деталь .

Настройки проектов выполняются аналогично описанию в п. 3.1:

- заменяется на обычную среду предложенная по умолчанию синхронная среда модели –  Перейти в обычную среду .
- выбираются марки и свойства материалов [13] для деталей в таблице материалов с учетом их назначения: алюминий АК6 ГОСТ 4784-97 для цанги, обоймы и стойки и сталь 10 ГОСТ 10702-78 для стяжного винта.

Модель цанги (рис. 8.2) создается построением следующих элементов:

1. кругового выступа с двухступенчатым профилем, образующим наружную грань цанги диаметром  $d2$  и длиной  $a$ , посадочное отверстие под палец руки робота диаметром  $d1$  и длиной  $b$  и отверстие диаметром  $d0$  для сопряжения со стойкой захвата и последующей их сваркой (рис. 8.2а);

2. линейного выреза (рис. 8.2б) шириной  $p$  и длиной  $h$  с цилиндрической частью разгрузки углов диаметром  $d3$ , образующего вертикальный паз для фиксации обоймы на пальце руки промышленного робота хомутом (на рис. 8.1 не показан).

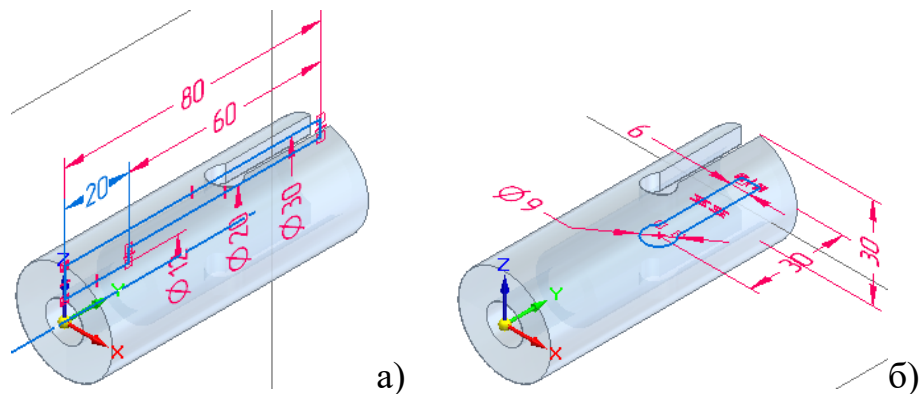


Рис. 8.2. Моделирование цанги

Модель обоймы (рис. 6.3) создается построением следующих элементов:

1. симметричного относительно плоскости  $XY$  выступа высотой  $H$  (рис. 6.3а) с зажимным (передним) и монтажным (задним) приливами с размерами  $A$  и  $B$ , центральной кольцевой частью с диаметрами  $D1$  и  $D2$  для установки электромагнита и пазом шириной  $p$  и длиной  $h$  с отверстием диаметром  $d3$  в зажимном приливе для затяжки электромагнита в корпусе захвата;

2. простого отверстия в правой части зажимного прилива с диаметром  $d_0$  и смещением  $l_0$  от края прилива (рис. 8.3б);

3. резьбового отверстия в левой части зажимного прилива с метрической резьбой  $M_0$  и смещением  $l_0$  от края прилива (рис. 8.3в);

4. осевого отверстия диаметром  $d_0$  в монтажном приливе (рис. 8.3г) для сопряжения со стойкой захвата с последующей их сваркой.

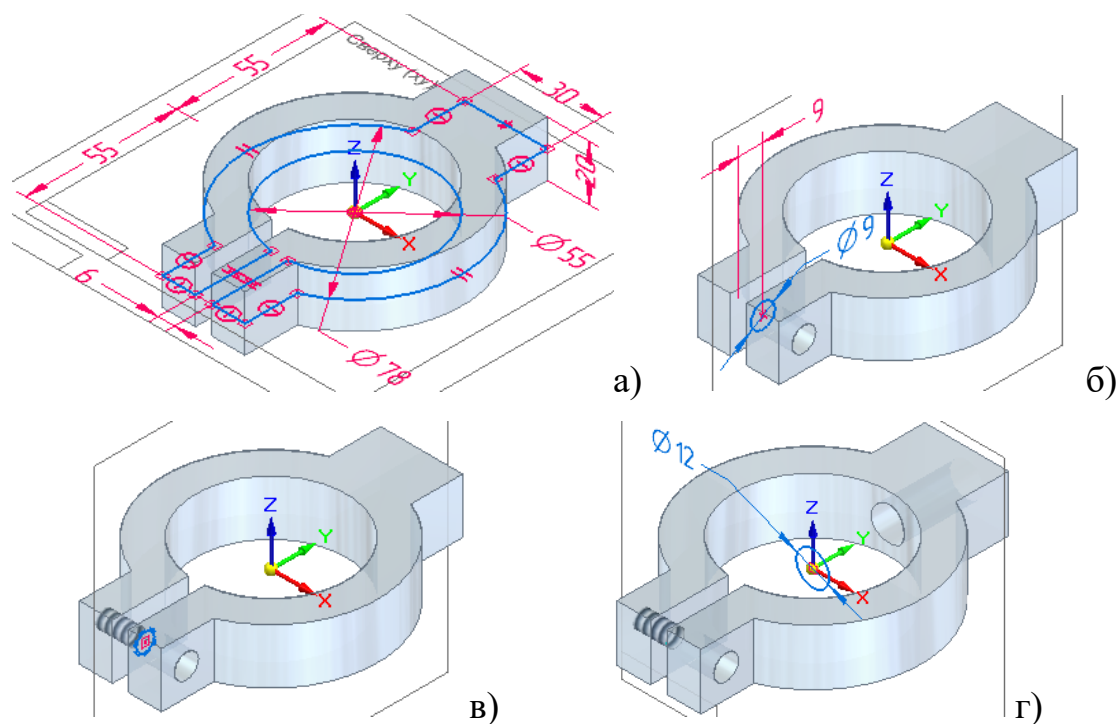


Рис. 8.3. Моделирование обоймы

Модель стойки (рис. 8.4) создается построением следующих элементов:

- цилиндрического выступа диаметром  $d_0$  и длиной 20 мм сопрягаемой с обоймой части стойки (рис. 8.4а);
- цилиндрического выступа диаметром  $d$  и длиной  $L$  средней части стойки (рис. 8.4б);
- цилиндрического выступа диаметром  $d_0$  и длиной 20 мм сопрягаемой с цангой части стойки (рис. 8.4в).

Модель винта (рис. 8.5) создается по ГОСТ 1491-80 с резьбой  $M_0$  построением следующих элементов [3]:

- цилиндра головки винта с круглым профилем (рис. 8.5а), диаметр и высота которого соответствуют заданному размеру резьбы  $M_O$ ;
- цилиндра тела винта с круглым профилем (рис. 8.5б), диаметр которого соответствует заданному размеру резьбы  $M_O$ , а длина равна ширине  $A$  зажимного прилива обоймы захвата;
- участка резьбы  $M_O$  (рис. 8.5в) с длиной, равной половине ширины  $A$  зажимного прилива обоймы захвата.
- выреза на головке винта (рис. 8.5г) с шириной и глубиной, соответствующими заданному размеру резьбы  $M_O$ .

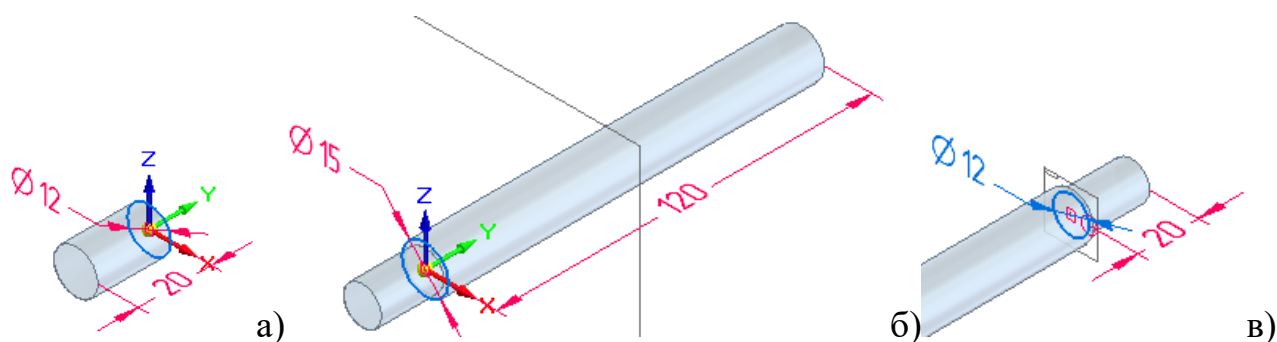


Рис. 8.4. Моделирование стойки

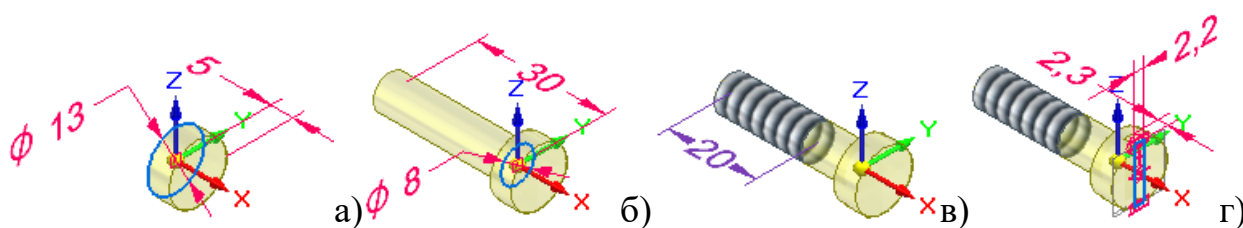


Рис. 8.5. Моделирование винта

Модель сборки корпуса захвата (рис. 8.6) создается по разработанным моделям элементов его конструкции в среде:



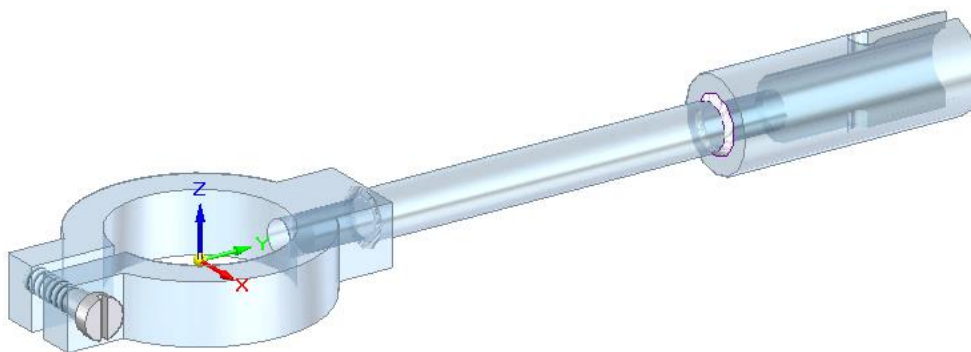
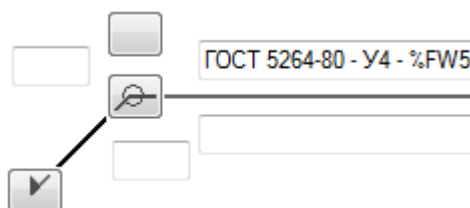



Рис. 8.6. Модель сборки захвата


При этом два сварных шва соединения стойки с обоймой и цангой моделируется инструментом «Сварной шов» из группы «Операции в сварной сборке». Катеты швов принимаются равной высоты 2 мм. Атрибуты сварных швов принимаются по ГОСТ 5264-80 для ручной дуговой сварки без скоса кромок деталей для углового одностороннего соединения по замкнутой линии:

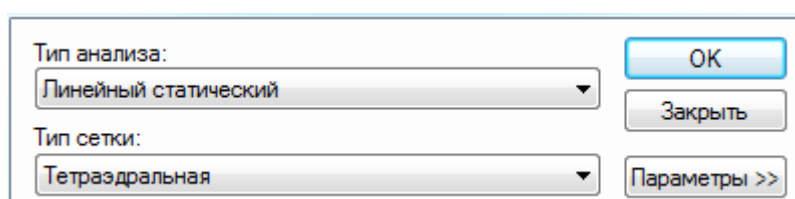



## 8.2. Постановка задачи конечно-элементного анализа корпуса захвата

Постановка задачи конечно-элементного анализа захвата выполняется в следующем порядке.

Кнопкой  «Активизировать» в средствах Навигатора сборки активизируются все элементы конструкции корпуса захвата.

Кнопкой  «Создать анализ» запускается задача симуляции в режиме «Линейный статический» с типом сетки «Тетраэдральная»:



Кнопкой  «Определить» выбирается геометрия для анализа указанием всех элементов конструкции объекта моделирования (рис. 8.7).

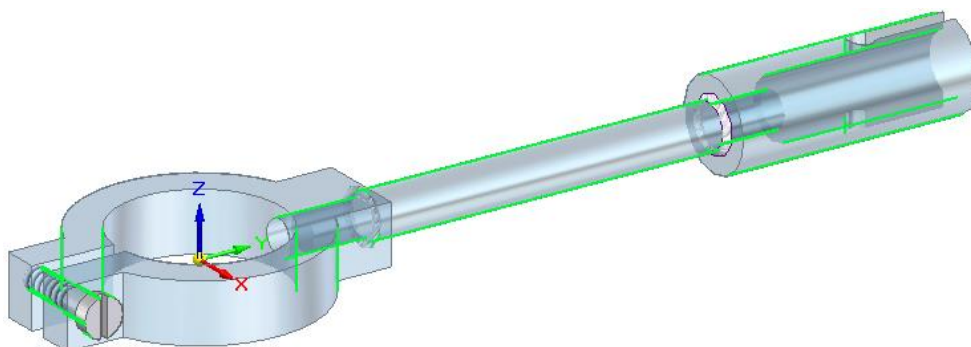




Рис. 8.7. Выбор геометрии для анализа

Кнопкой  «Сила» создается нагрузка на верхней (опорной для электромагнита) грани корпуса захвата с заданной величиной  $F$ , которая задается в окне запроса значения нагрузки с учетом размерности, предлагаемой симулятором (рис. 8.8).

Кнопкой  «Зафиксировать все шесть степеней свободы» создается ограничение движения на внутренней посадочной полости цанги захвата (рис. 8.8).

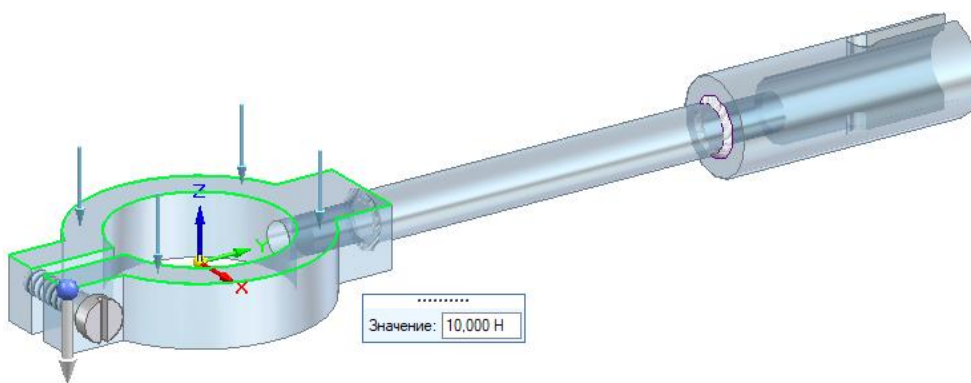

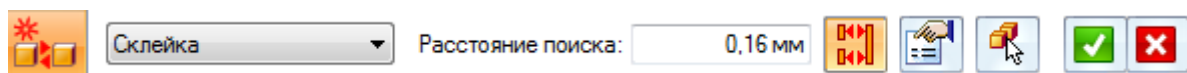


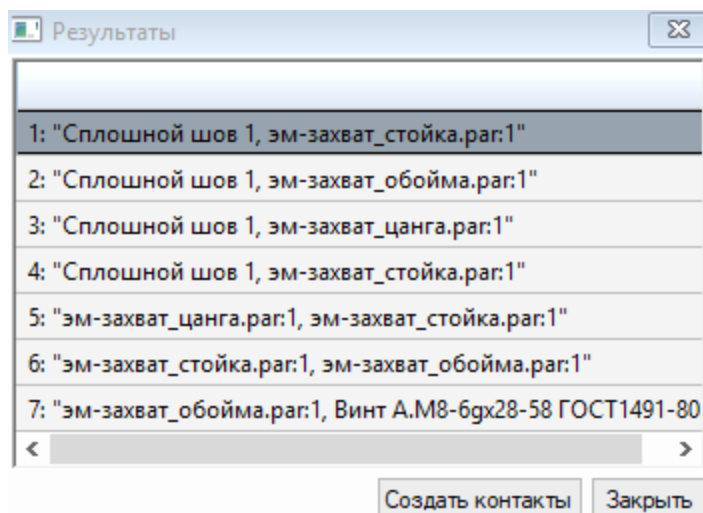
Рис. 8.8. Создание нагрузки и ограничения движений

Кнопкой  «Автоматически» производится переход к выбору соединений контактных граней деталей корпуса захвата в местах их взаимного сопряжения и


подтверждается выполненный выбор в атрибутах команды нажатием кнопки с галочкой на зеленом фоне:



Проверяется список выявленных сопряжений в окне «Результаты»



и в случае его корректности нажимается кнопка «Создать контакты» для наложения связей между деталями корпуса захвата (рис. 8.9).

Кнопкой  «Сетка» открывается окно ее атрибутов (рис. 8.10а), в котором выбирается размер сетки, задается ее визуализация и запускается процесс ее создания нажатием кнопки «Сетка» (рис. 8.10б).

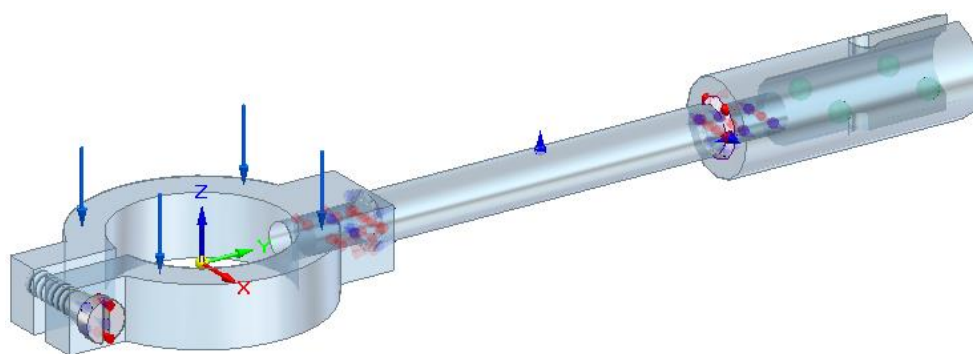


Рис. 8.9. Создание контактов для сопрягаемых деталей захвата



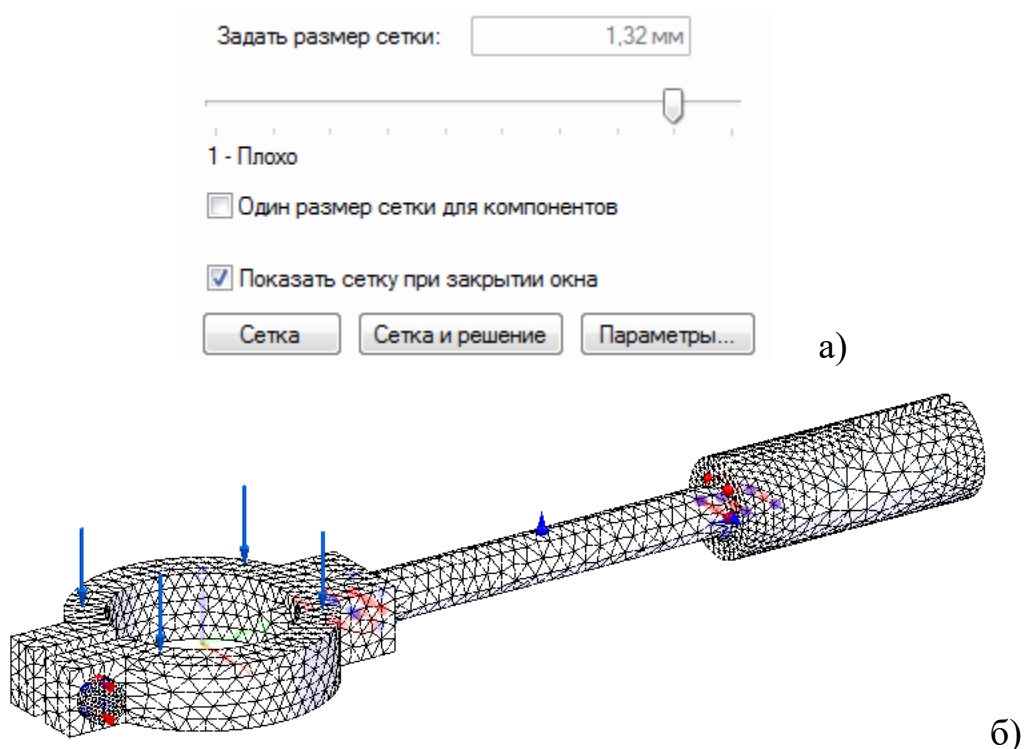




Рис. 8.10. Выбор размера сетки (а) и результат ее создания (б)

Кнопкой  «Решить» запускается решение задачи конечно-элементного анализа корпуса захвата.

### 8.3. Обработка результатов и формулирование выводов

Результатом решения задачи конечно-элементного анализа корпуса захвата являются модели распределения напряжений (рис. 8.11) и деформаций (рис. 8.12) в его конструкции. Эти модели позволяют не только визуально определить наличие и локализацию мест концентрации напряжений в конструкции объекта проектирования, но и провести количественно оценку напряжений и деформаций в узлах созданной для него конечно-элементной сетки.

Последняя задача решается инструментом  «Проба», с помощью которого определяются следующие характеристики.

1. Напряжение в стойке в месте соединения с цангой захвата, которое в представленном на рис. 8.13 примере равно  $\sigma=5,75$  МПа в узле с координатами  $X=0$  мм,  $Y=169$  мм и  $Z=7,5$  мм.

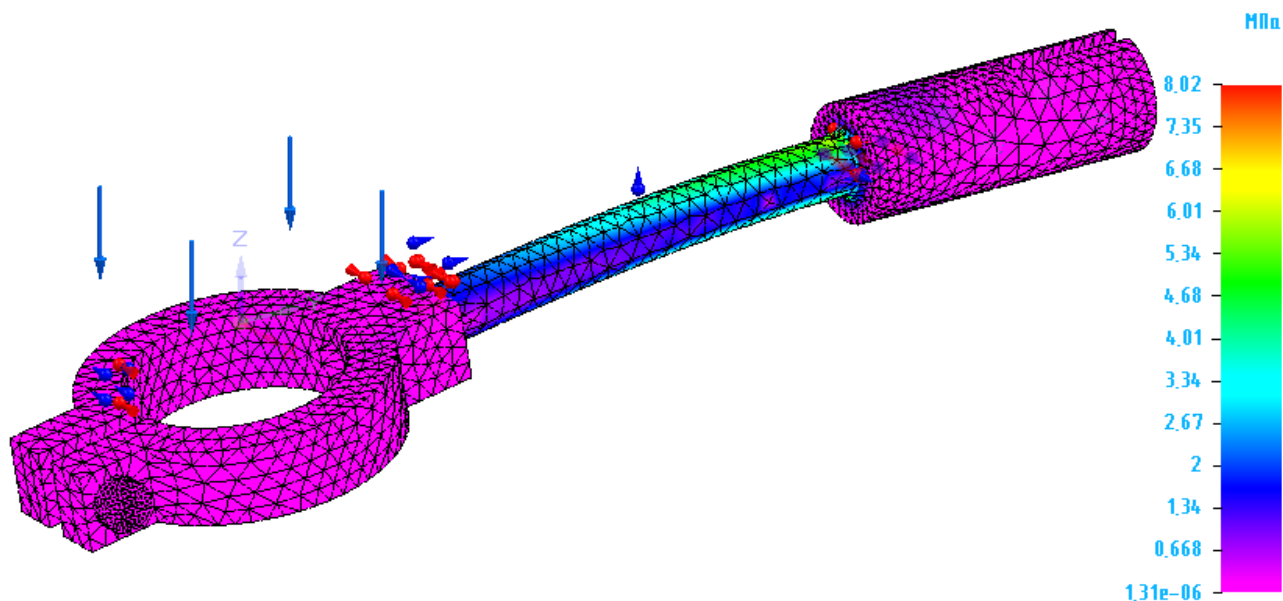


Рис. 8.11. Распределение напряжений в модели сборки захвата

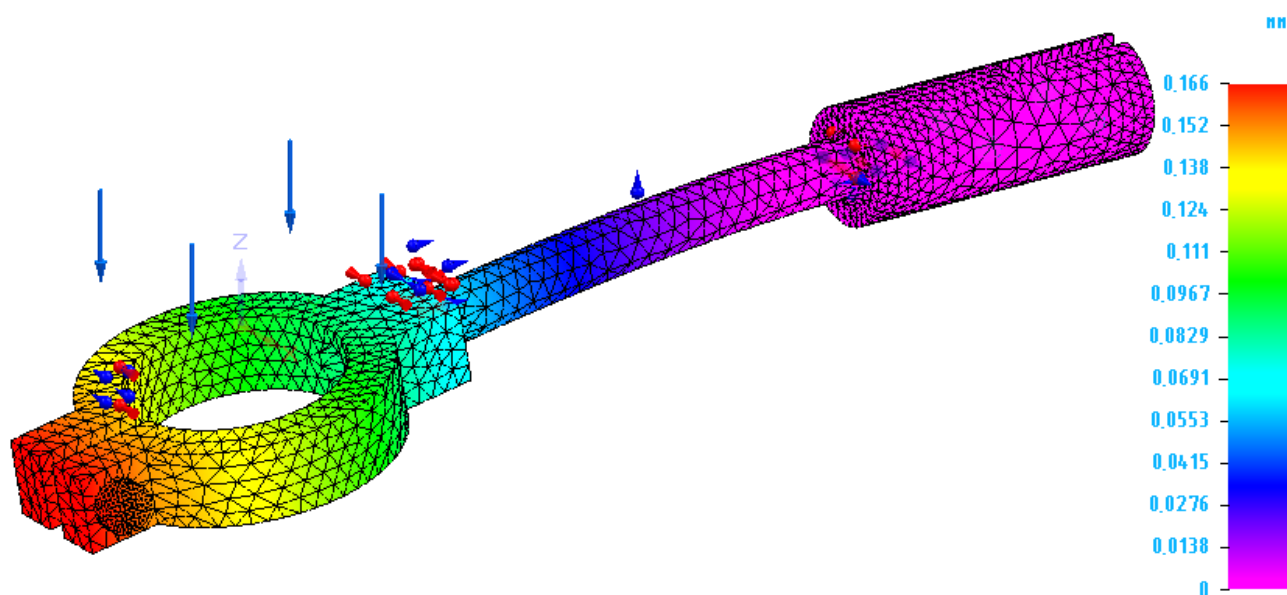


Рис. 8.12. Распределение деформаций в модели сборки захвата

2. Перемещения верхних горизонтальных ребер зажимного и монтажного приливов обоймы захвата, которые в примере на рис. 8.14 равны:

- $\delta_1=0,0653$  мм (в узле с координатами  $X_1=0$  мм,  $Y_1=55$  мм и  $Z_1=10$  мм);
- $\delta_2=0,166$  мм (в узле с координатами  $X_2=-5$  мм,  $Y_2=-55$  мм и  $Z_2=10$  мм).

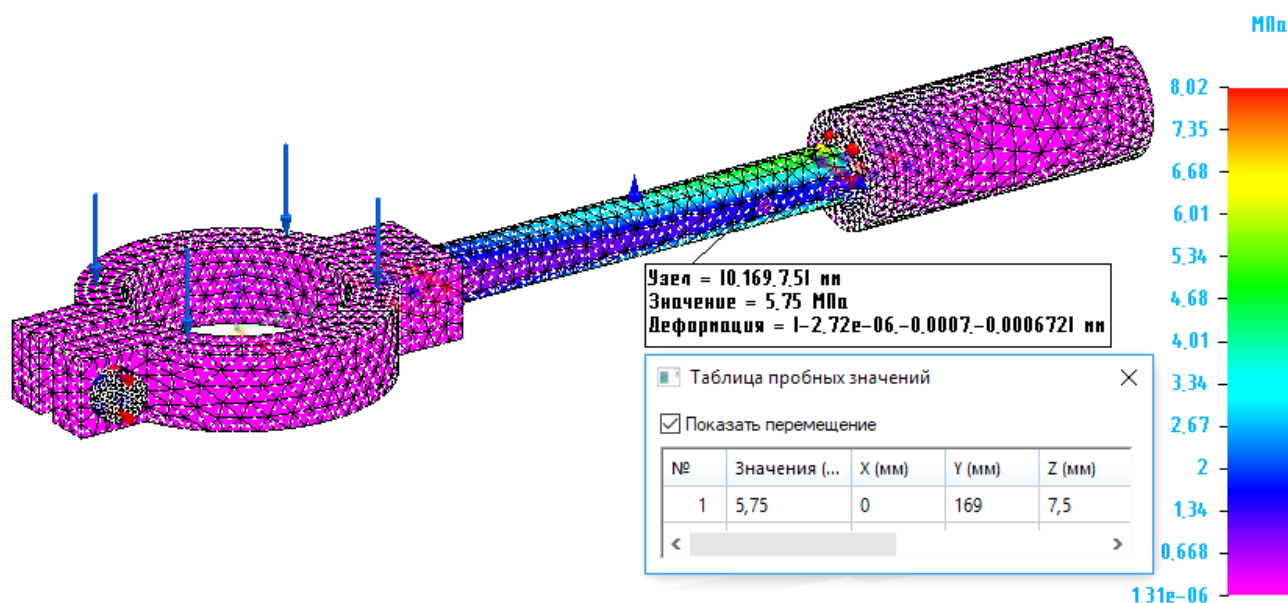


Рис. 8.13. Определение напряжений в узлах модели захвата

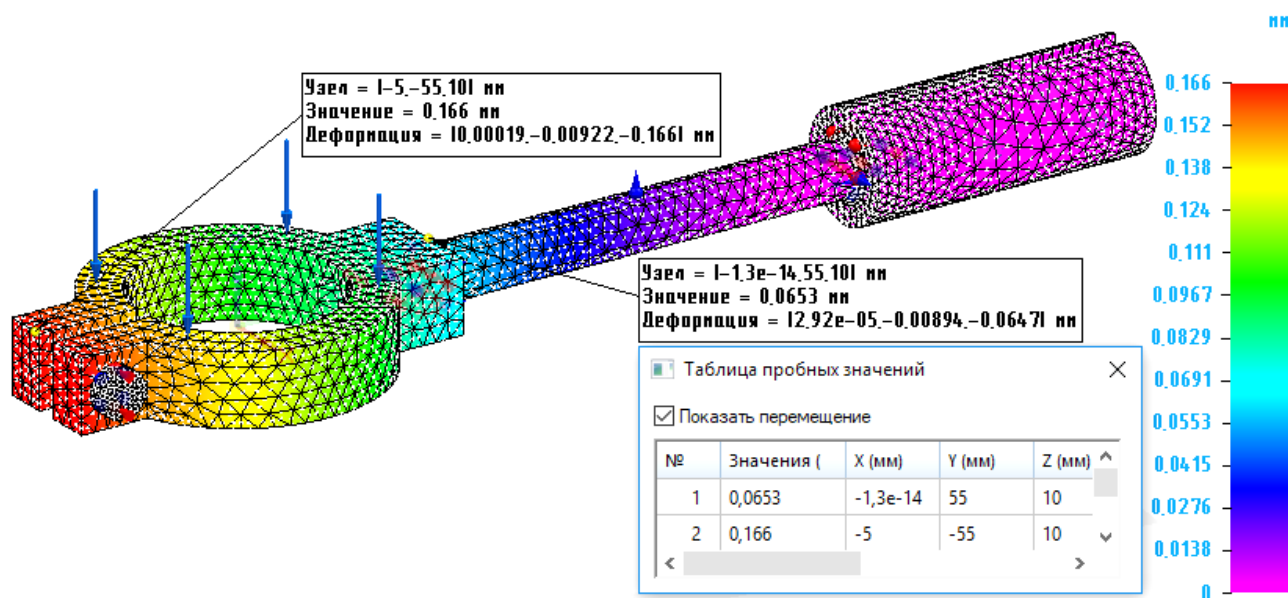


Рис. 8.14. Определение деформаций в узлах модели захвата

### Результаты и выводы (по примерам на рис. 8.13, 8.14):

1. наиболее нагруженным элементом конструкции захвата является стойка в области ее соединения с цангой.
2. максимальное напряжение в стойке достигает 8,02 МПа и возникает в области расположения сварного шва, соединяющего стойку с цангой.

3. максимальная упругая деформация достигает  $\delta_2=0,166$  мм на всей длине верхнего ребра зажимного прилива обоймы захвата в узлах с абсциссами  $-A/2 \leq X \leq +A/2$ , ординатами  $Y=-55$  мм и аппликатами  $Z=10$  мм.

4. максимальный перекося обоймы захвата под нагрузкой в угловом измерении равен

$$\beta = \arctg \frac{\delta_2 - \delta_1}{Y_2 - Y_1} = \arctg \frac{0,166 - 0,0653}{-55 - (+55)} = -0,05^\circ.$$

## Перечень рекомендуемых источников

1. Кошелев В., Молочник В. Что такое PLM?//САПР и графика. 2003. №10.
2. Муленко В.В. Компьютерные технологии и автоматизированные системы в машиностроении: Учеб. пособие. М., 2015. 73 с.
3. Гореткина Е. PLM-рынок в России: особенности, факторы влияния, перспективы [Электронный ресурс] //PC WEEK/RE. 2013. № 32-34. – URL: <https://www.itweek.ru/industrial/article/detail.php?ID=157955> (дата обращения: 07.10.19).
4. Колчин А., Сумароков С., Жабоев Т. Как сделать успешным внедрение PLM//САПР и графика. 2008. №5. С. 125-128.
5. PDM-система [Электронный ресурс] //Википедия. Свободная энциклопедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/PDM> (дата обращения: 09.10.19).
6. CAPP [Электронный ресурс] //Википедия. Свободная энциклопедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/CAPP> (дата обращения: 09.10.19).
7. Популярно о САМ-системах [Электронный ресурс] //АО КоСПАС высокоточная металлообработка. – URL: <https://kospas.ru/cam-sistemy> (дата обращения: 09.10.19).
8. MPM [Электронный ресурс] //TADVISER. Государство. Бизнес. ИТ. – URL: <http://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения: 09.10.19).
9. ERP [Электронный ресурс] // Википедия. Свободная энциклопедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ERP> (дата обращения: 10.10.19).
10. Управление жизненным циклом изделия (концепция PLM) [Электронный ресурс] //Группа компаний «ПЛМ Урал». URL: <https://www.plm-ural.ru/resheniya/upravlenie-zhiznennym-ciklom-izdeliya-koncepciya-plm> (дата обращения: 14.10.19).
11. Живов Л.И., Овчинников А.Г., Складчиков Е.Н. Кузнечно-штамповочное оборудование: Учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 560 с.

12. Р.В. Хохленков. Solid Edge с синхронной технологией. — М: ДМК Пресс, 2010: <https://www.razym.ru/komp/designn/109330-hohlenkov-roman-solid-edge-s-sinhronnoy-tehnologiy-cd.html> (дата обращения: 16.10.19).

13. Анурьев В.И. Справочник конструктора машиностроителя: Т. 1. Под ред. И.Н. Жестковой. — М.: Машиностроение, 2001. — 920 с.: ил.