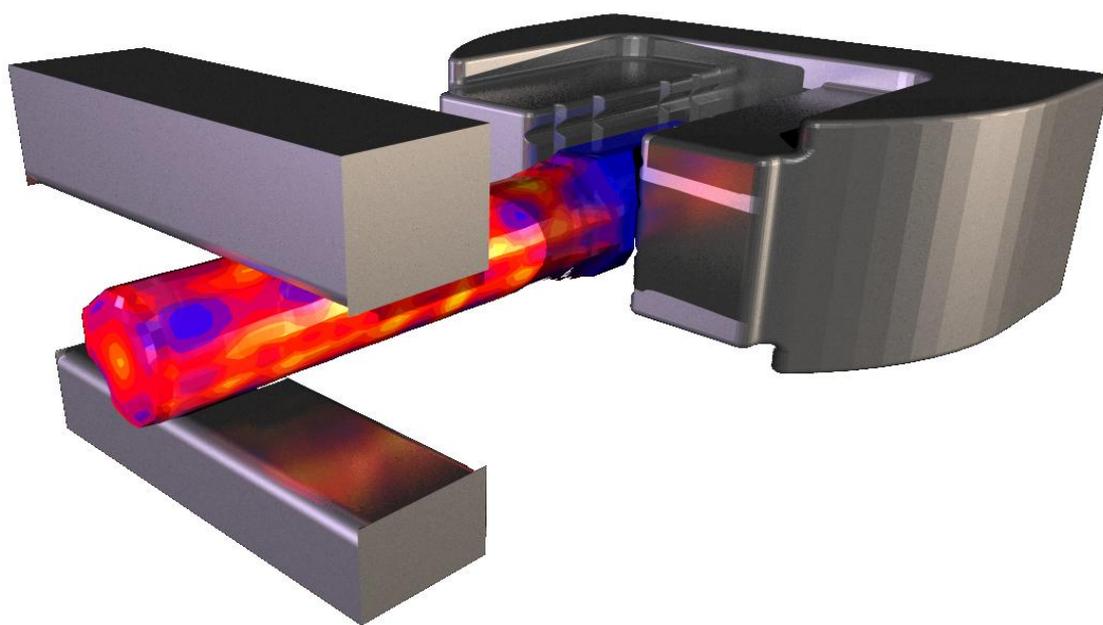


**Е. И. Яблочников А. А. Грибовский  
М. Я. Афанасьев Д. Д. Куликов  
Методы и системы ИПИ-технологий**



**Санкт-Петербург  
2017**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Е. И. Яблочников А. А. Грибовский  
М. Я. Афанасьев Д. Д. Куликов

# Методы и системы ИПИ-технологий

Учебное пособие

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург  
2017

Е. И. Яблочников, А. А. Грибовский, М. Я. Афанасьев, Д. Д. Куликов. Методы и системы ИПИ-технологий. Учебное пособие — СПб: Университет ИТМО, 2017. — 64 с.

Рассмотрены основные аспекты управления процессами проектирования и производства изделия, а также теоретические аспекты поддержки жизненного цикла изделия и основные средства обеспечения этого процесса.

Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 12.04.01 «Приборостроение».

Рекомендовано к печати учёным советом факультета систем управления и робототехники, протокол № 3 от 03 апреля 2017 г.



*Университет ИТМО* — ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО — участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО — становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2017

© Е. И. Яблочников, А. А. Грибовский, М. Я. Афанасьев,  
Д. Д. Куликов, 2017

# Оглавление

Список сокращений	5
Введение	7
<b>1 Понятие ИПИ-технологий</b>	<b>9</b>
1.1 Применение ИПИ-технологий при разработке изделий . . . . .	9
1.2 Роль ИПИ-технологий в современной промышленности . . . . .	13
1.3 Стандарты в области ИПИ . . . . .	18
<b>2 PLM системы</b>	<b>23</b>
2.1 Система CATIA . . . . .	24
2.2 Система DELMIA . . . . .	30
2.3 Система 3DVIA Composer . . . . .	34
2.4 Система ENOVIA . . . . .	35
<b>3 CAD/CAM/CAE системы</b>	<b>39</b>
3.1 Система Cimatron E . . . . .	40
3.2 Система GibbsCAM . . . . .	47
	3

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

3.3	Система Vericut . . . . .	48
3.4	Moldex3D — система анализа литья пластмасс	52
3.5	Simufact — программный комплекс для компьютерного моделирования . . . . .	54
	<b>Литература</b>	<b>59</b>

---

# СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

**BOM** — Bill of materials

**CAD** — Computer-aided design

**CAE** — Computer-aided engineering

**CALS** — Computer-aided acquisition and lifecycle support

**CAM** — Computer-aided manufacturing

**CRM** — Customer relationship management

**ERP** — Enterprise resource planning

**MRP** — Manufacturing resource planning

**PDM** — Product data management

**PLM** — Product lifecycle management

**SCM** — Supply chain management

**STEP** — Standard for exchange of product model data

**БД** — База данных

**ГОСТ** — Государственный стандарт

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

- ИПИ** — Информационная поддержка жизненного цикла изделия
- ИЭТР** — Интерактивное электронное техническое руководство
- МКЭ** — Метод конечных элементов
- МЭМС** — Микроэлектромеханические системы
- НТД** — Нормативно-техническая документация
- САПР** — Система автоматизированного проектирования
- ТП** — Технологический процесс
- ТПП** — Технологическая подготовка производства
- ТУ** — Технические условия
- УП** — Управляющая программа
- ЖЦИ** — Жизненный цикл изделия
- ЭМИ** — Электронная модель изделия
- ЧПУ** — Числовое программное управление

---

# ВВЕДЕНИЕ

Современный рынок приборостроительных изделий претерпел за последние десять лет существенные изменения, которые продолжают углубляться. Изменились сами критерии деятельности предприятия, на основе которых деятельность стала рассматриваться не с точки зрения функционирования структурных подразделений предприятия, а с точки зрения организации и протекания в нем деловых и производственных процессов. Появилась общая методология реорганизации производственных процессов с целью радикального повышения эффективности деятельности предприятия — методология реинжиниринга производственных процессов. Всё это даёт основание определить совокупность происходящих изменений как глобальную трансформацию промышленного производства.

Для процессов проектирования и технологической подготовки производства изделий в приборостроении характерны высокая сложность, междисциплинарность, наличие множества итераций при принятии решений. Поэтому большую роль играет применение САЕ-систем для виртуального моделирования и инженерного анализа функциональных характеристик изделий и технологических процессов. Использование таких систем требует привлечения специалистов высокой квалификации.

Без применения ИПИ-технологий в настоящее время нельзя обеспечить выпуск прецизионных приборов. Именно интеграция управления технологическим оборудованием с процессами проектирования и анализа позволяет не только контролировать

## ВВЕДЕНИЕ

---

готовое изделие или его компоненты, но и управлять качеством обработки заготовок и сборки прибора. Поэтому в учебно-методическом пособии большое внимание уделяется вопросам построения цифровых моделей и способам их использования.

В процессе освоения ИПИ-технологий в приборостроении магистранты ознакомятся с широким спектром используемых автоматизированных систем и способов их использования, и на основании этого приобретут необходимый комплекс профессиональных компетенций, позволяющих использовать технологии информационной поддержки на различных этапах жизненного цикла изделий.

---

---

# 1

---

## ПОНЯТИЕ ИПИ-ТЕХНОЛОГИЙ

### 1.1 Применение ИПИ-технологий при разработке изделий

Процессы глобализации мировой экономики и динамика развития новых технологий (информационно-оптических, МЭМС-технологий, биотехнологий, перспективной генной инженерии и др.) заставляют компании активно реформировать свой бизнес, внедрять и развивать новые подходы и технологии его ведения, обеспечивая недостижимое для конкурентов качество продукции и высокую производительность.

В этих условиях созрела объективная необходимость рассматривать изделие как некий информационный объект, содержащий всю необходимую информацию об изделии на каждом этапе его существования от идеи создания до утилизации, то есть на протяжении всего жизненного цикла изделия (сокр. *ЖЦИ*), и использовать эту информацию для оптимизации реальных процессов.

Развитие вычислительной техники и инженерных наук к концу прошлого века позволило перейти к практическому решению этой задачи. Понятие ЖЦИ включает в себя все

## 1. ПОНЯТИЕ ИПИ-ТЕХНОЛОГИЙ

---

стадии его существования — от изучения рынка и формирования замысла перед проектированием изделия и заканчивая его утилизацией после использования.

Задача полного информационного описания изделия на всех этапах ЖЦИ и управления этой информацией получила свое оформление в методологии ИПИ (сокр. от *Информационная Поддержка жизненного цикла Изделия*).

Термины, сущность и методы ИПИ определены в соответствующих стандартах. ИПИ является русскоязычным аналогом известного с середины 80-х годов прошлого столетия англоязычного термина CALS (сокр. от англ. *Computer-Aided Acquisition and Lifecycle Support* — компьютерное сопровождение и поддержка жизненного цикла) [1].

Согласно концептуальным положениям ИПИ, реальные бизнес-процессы отображаются в виртуальной информационной системе, где продукт (изделие) представлен полным электронным описанием, а среда и ресурсы его создания, эксплуатации представлены в виде моделей процессов и систем проектирования. Все компоненты этой системы (полное электронное описание изделия, среда и ресурсы его создания, среда эксплуатации) не только взаимосвязаны, но и непрерывно развиваются на всем протяжении ЖЦИ.

На базе концепций и стандартов ИПИ (CALS) ведущими мировыми разработчиками программного обеспечения были созданы группы программных продуктов, реализующие стратегию полного управления ЖЦИ — стратегию PLM (сокр. от англ. *Product Lifecycle Management*).

В соответствии с определением известной мировой экспертной компании CIMdata,<sup>1</sup> «PLM — это стратегический подход к ведению бизнеса, который использует набор совместимых решений для поддержки общего (англ. *collaborative*) представления информации о продукте в процессе его создания, реализации и эксплуатации, в среде расширенного (англ. *extended*) предприятия, начиная от концепции создания продукта до его утилизации — при интеграции человеческих ресурсов, процессов и информации».

---

<sup>1</sup><http://www.cimdata.com/en/>

На основании этого определения можно выделить три основных требования к PLM-решениям:

- возможность универсального, безопасного и управляемого способа доступа и использования информации об изделии на всех этапах ЖЦИ;
- поддержание целостности и актуальности информации об изделии на всех этапах ЖЦИ;
- управление и поддержка бизнес-процессов, реализуемых при создании, распределении и использовании информации об изделии на всех этапах ЖЦИ.

В настоящее время ведущие разработчики автоматизированных систем для промышленного проектирования и производства, как за рубежом, так и в нашей стране, используют методологию PLM как базовую [2]. В основу данной методологии положены следующие принципы.

**Интеграция промышленного бизнеса.** Все виды деятельности и дисциплины, представляющие компоненты жизненного цикла изделия, должны иметь универсальное ядро, обеспечивающее единое представление промышленного бизнеса как систему продуктов, процессов и ресурсов. Все эти компоненты должны основываться на единой схеме описания.

**Ассоциативность.** Между всеми компонентами жизненного цикла изделия должны поддерживаться устойчивые и управляемые причинно-следственные связи. Любой элемент описания продукта, процесса или ресурса должен хранить при себе свое происхождение и условия существования. Это основная радикальная мера для сокращения затрат на выпуск новых, конкурентоспособных товаров.

**Сертифицируемость.** Электронная модель изделия (сокр. ЭМИ) должна обладать свойствами контролепригодности<sup>2</sup> и верифицируемости. Процедуры внешних и внутренних видов контроля и верифицируемости являются неотъемлемой частью виртуального проекта изделия, позволяя:

---

<sup>2</sup>ГОСТ 26656-85. Техническая диагностика. Контролепригодность. Общие требования.

## 1. ПОНЯТИЕ ИПИ-ТЕХНОЛОГИЙ

---

- осуществлять измерение параметров и свойств изделия, получаемых на этапах жизненного цикла, одновременно контролируя достижение predetermined требований;
- проверять полученные результаты либо с помощью теоретических положений, реализованных программно, либо сопоставляя их с подтвержденными данными.

Указанные процедуры должны иметь возможность осуществляться на всех этапах жизненного цикла и развиваться вместе с данными об изделии.

**Инвариантность.** Большинство изделий машиностроения и приборостроения имеют множество версий, модификаций, вариантов исполнения, зависящих от определенных условий. Например, прибор может иметь различную комплектацию для работы в различных климатических условиях. Это делает проект многовариантным, добавляя такую категорию как конфигурация. При этом каждая из конфигураций должна обладать всеми свойствами целого проекта. Соответствующая конфигурация (версия, модификация, вариант исполнения) прибора обеспечивает требования эксплуатации и необходимые свойства.

**Многообразие способов представления данных проекта.** Так как содержательная часть проекта изделия в электронном виде растёт и покрывает всё больше отраслей знаний, то и представление его должно быть селективным, то есть выборочным по определенному критерию.

Соответственно, структура данных должна содержать информацию о роли, задачах и уровне допуска пользователя. Например, если к проекту обращается представитель эксплуатирующей организации, то должны быть активны только те объекты и элементы спецификаций проекта, которые относятся к сфере прямых интересов пользователя, то есть к процессам обслуживания.

Другая информация, например, инженерные расчеты, сборочные объекты, элементы и прочая техническая информация, не представляющая прямого интереса для данного пользователя, должна оставаться недоступной, скрытой до тех пор, пока она не будет явно задана пользователем в области поиска.

Так как существуют устойчивые (стандартные) роли пользователей, то должны быть предусмотрены соответствующие стандартные формы представления проекта: инженерное — для разработчиков; презентационное — для посетителей; эксплуатационное — для операторов; маркетинговое — для публикаций и продаж и другие. Программные приложения, работающие с электронным проектом, должны обеспечить реагирование на запросы, учитывающие роли пользователей.

## 1.2 Роль ИПИ-технологий в современной промышленности

Любая страна, стремящаяся занять лидирующие позиции в мировой экономике, должна предпринимать активные действия по повышению конкурентоспособности своей продукции, инвестиционной привлекательности предприятий, обеспечению гарантированного уровня качества на всех стадиях жизненного цикла изделий, достижению технологической независимости в наиболее важных областях промышленности, росту производства наукоёмкой продукции.

Реализация перечисленных задач возможна только благодаря глубокой модернизации промышленности на основе использования современных достижений науки и техники, передовых информационных технологий, в частности — ИПИ.

При этом должны учитываться основные тенденции развития современного производства, к которым можно отнести следующие:

- функциональность, свойства, внешний вид изделия во всё большей степени формируются исходя из требований его будущего потребителя. Это относится не только к обеспечению определенного уровня качества в течение срока службы изделия, но и к стоимости владения им;
- широкая кооперация предприятий, при которой основная доля производства приходится на поставщиков, а головные предприятия выполняют финишные операции и окончательную сборку изделия;

## 1. ПОНЯТИЕ ИПИ-ТЕХНОЛОГИЙ

---

- создание разных видов продукции происходит в рамках так называемых *виртуальных предприятий*. Под таким предприятием понимается неформальная структура, формируемая распределенными независимыми партнерами, объединяемыми на основе информационных технологий на время выполнения совместного заказа;
- специализация компаний-поставщиков по конструктивному и производственно-технологическому принципу изменяется в сторону системной специализации, при которой предприятие стремится продавать определенную систему (например, пилотажно-навигационный комплекс) целиком;
- владельцы лицензии на производство изделий конкретной торговой марки переводят предприятия на территории с благоприятными экономическими условиями;
- получает распространение так называемое риск-разделённое партнерство, которое предполагает участие в инвестировании создания продукции не только основного его производителя, но и партнёров, влечёт за собой более равномерное распределение рисков (финансовых, технических и прочих);
- приём специалистов на работу осуществляется на контрактной основе на период выполнения работ по конкретному проекту, при этом штат постоянных сотрудников компании имеет тенденцию к уменьшению.

Для предприятий, выполняющих крупномасштабные и наукоёмкие проекты, характеризующиеся многономенклатурностью изделий и длительным циклом разработки, производства и эксплуатации, наиболее актуальна проблема организации совместной работы множества удалённых бизнес-партнёров, участвующих в проекте по созданию изделия.

При этом необходимо обеспечить интеграцию и совместное использование информации, порождаемой на всех этапах ЖЦИ в рамках единого информационного пространства. Для решения этой задачи и предназначены ИПИ-технологии. Применение ИПИ-технологий является стратегическим направлением, следуя которому можно обеспечить рост конкурентоспособности выпускаемой продукции и эффективности производства.

По оценкам экспертов, эффективность производства, реализованного на базе ИПИ-технологий, примерно на 30–40 %

выше эффективности традиционного производства, в частности, удаётся сократить время выхода изделия на рынок до 50 %; уменьшаются до 30 % расходы на изготовление физических прототипов и до 40 % удаётся сократить затраты на материалы [3].

Мировой рынок полностью отторгает продукцию, не снабжённую электронной документацией и не обладающую средствами интегрированной логистической поддержки постпроизводственных стадий ЖЦИ. Сегодня заказчики выдвигают требования к информационному обеспечению и уровню технической поддержки проектов, удовлетворение которых невозможно без внедрения ИПИ-технологий:

- представление конструкторской и технологической документации в электронной форме;
- представление эксплуатационной и ремонтной документации в форме интерактивных электронных технических руководств (сокр. *ИЭТР*);
- организация системы интегрированной логистической поддержки изделий на постпроизводственных стадиях ЖЦИ;
- наличие и функционирование электронной системы каталогизации продукции;
- наличие на предприятиях соответствующих требованиям стандартов ИСО 9000<sup>3</sup> и ИСО 9001<sup>4</sup> систем менеджмента качества и т. д.

Поскольку эффективность экономики страны связана с эффективностью работы отечественных предприятий — задача внедрения и развития ИПИ-технологий на российских промышленных предприятиях является государственной проблемой.

Развитие ИПИ-технологий осуществляется в направлении перехода стран с развитой промышленностью на новые международные стандарты управления качеством, общие принципы электронного обмена информацией, единые формы и модели баз данных, унифицированные средства их представления в информационных системах, а также общих требований и регламентов обеспечения информационной безопасности.

---

<sup>3</sup>ГОСТ ISO 9001-2011. Системы менеджмента качества. Требования.

<sup>4</sup>ГОСТ ISO 9000-2011 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.

## 1. ПОНЯТИЕ ИПИ-ТЕХНОЛОГИЙ

---

Несмотря на значительные вложения средств, остался ещё целый ряд нерешённых или решённых не в полном объёме проблем в области ИПИ-технологий, в частности, следующие:

а) Необходима разработка более полной нормативной базы по представлению конструкторской, технологической, производственной, логистической, эксплуатационной информации об изделии, данных о качестве. Наиболее проработанными можно считать стандарты серии ИСО 10303<sup>5</sup>, касающиеся конструкторских данных об изделии и определяющие «нейтральный» формат их представления.

б) Недостаточно полно и чётко описаны, а следовательно, не формализованы среда, физические, технологические и производственные процессы, сопровождающие изделия на протяжении всего жизненного цикла, и, как следствие, невозможность разработки средств, обеспечивающих имитационное моделирование этих процессов и среды, в которой эти процессы протекают.

в) Так как повышение качественных и функциональных характеристик изделий возможно лишь с развитием междисциплинарных подходов происходит активное развитие CAD/CAM/CAE-систем с мультифизическим уклоном, что приводит к конвергенции знаний и технологий и повышает интегрируемость решений. С другой стороны, мультифизический подход повышает сложность программных систем, предъявляет повышенные требования к пониманию разработчиком физических основ рассматриваемых явлений, размывает дифференцируемость существующих направлений.

г) В связи с развитием мультидисциплинарного подхода размываются четкие границы функциональности для внедрённых программных систем, что затрудняет определение состава данных, создаваемых или преобразуемых в системе и передаваемых в/из неё.

д) Имеются проблемы в интеграции функциональных программных систем, на базе которых строятся интегрированные информационные системы компаний. При этом появления универсального средства интеграции информации в ближайшее время ожидать не приходится из-за отсутствия общепринятой

---

<sup>5</sup>ГОСТ Р ИСО 10303-1-99. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 1. Общие представления и основополагающие принципы.

нормативной базы по структуре, составу и форме представления большей части информации об изделии.

Тем не менее, отдельные крупные зарубежные компании создали интегрированные информационные системы, реализующие единые информационные пространства в соответствии с требованиями стандартов в области CALS.

Это позволило компаниям добиться реальных конкурентных преимуществ на рынке. Благодаря цифровому представлению информации о выпускаемых изделиях и доступу к полному их электронному описанию стало возможным:

а) Создание изделий с заданной стоимостью владения (проектирование под заданную стоимость, непрерывное снижение издержек при серийном производстве продукции и в процессе послепродажной поддержки) путем многократно повторяемого (итерационного) процесса конструкторско-технологического проектирования изделия на каждом этапе ЖЦИ. Процесс заключается в формировании альтернативных проектных решений, их анализе на основе моделирования последствий принимаемых решений (ERP-система в этом случае выступает в качестве источника информации о запасах, фактических сроках выполнения заказов, узких местах в производстве и т.д.) и выборе оптимального проектного решения исходя из заданных требований.

б) Совпадение значений заявленных технических характеристик продукции и фактически реализуемых в процессе эксплуатации.

в) Обеспечение стабильного уровня качества продукции.

г) Выпуск продукции к определённому сроку.

Так, например, компания Airbus в процессе создания самолета A380 за 3,5 года проанализировала 18 различных вариантов реализации самолёта с полным бюджетированием средств, необходимых для его создания. Выбор оптимального проектного решения, удовлетворяющего не только требованиям по заявленным техническим характеристикам, но и по стоимости владения самолетом, стал возможен только благодаря использованию интегрированной информационной системы, обеспечившей возможность моделирования процессов на всех этапах жизненного цикла самолета: от концепции создания самолета,

## 1. ПОНЯТИЕ ИПИ-ТЕХНОЛОГИЙ

---

его проектирования и испытаний, до изготовления и сервисного обслуживания на этапе эксплуатации.

Еще одним примером в области авиастроения является проект VIVACE (англ. *Value Improvement through a Virtual Aeronautical Collaborative Enterprise*). Проект, координируемый Airbus и финансируемый при участии Европейской комиссии, начался в январе 2004 г. и закончился в 2007 г. В проекте приняли участие более 60 организаций, включая промышленные компании, научно-исследовательские институты и университеты, а также малые и средние предприятия. В проекте VIVACE планировалось достичь 5 % снижения стоимости разработки самолёта и 5 % сокращения времени проектирования нового самолёта. Кроме того, планировалось уменьшить на 30 % время и снизить на 50 % стоимость соответствующего нового или модернизированного газотурбинного двигателя.

Чтобы достичь этих общих целевых показателей, работа в проекте VIVACE [4] была организована с помощью виртуального моделирования компонентов самолета и двигателей, а также моделей бизнес-процессов разработки, с их отображением на виртуальный продукт (изделие) и на виртуальное расширенное предприятие. Обе эти глобальные виртуальные модели включали в себя, с одной стороны, технические требования к симуляции изделия на ранних стадиях его разработки, а с другой стороны — технические требования к методам совместной распределённой работы.

### 1.3 Стандарты в области ИПИ

В относительно устоявшейся классификации систем, обеспечивающих информационную поддержку различных этапов ЖЦИ, можно выделить системы классов CAD/CAM, CAE, PDM, MRP-I, MRP-II, ERP, SCM, CRM и CPC. На первых этапах проектирования и производства реализация стратегии PLM обеспечивается системами классов PDM, CAD/CAM, CAE. На других этапах ЖЦИ информационная поддержка обеспечивается как перечисленными выше системами, так и другими.

Эффективность применения ИПИ-технологий предполагает обязательное соблюдение всеми участниками определённых

### 1.3. СТАНДАРТЫ В ОБЛАСТИ ИПИ

---

и жёстко регламентированных стандартов, принципов, процедур, правил, технических решений. Стандарты и методические материалы в области ИПИ определяют общий подход, способы представления и интерфейсы доступа к данным различного типа, вопросы защиты информации и её электронную авторизацию (цифровая подпись).

В свою очередь, стандарты и методические материалы можно классифицировать по нескольким признакам: целевая аудитория, объект описания, привязка к той или иной стадии ЖЦИ. В первом приближении можно выделить следующие основные группы международных стандартов в области ИПИ-технологий:

- стандарты в области системной и программной инженерии;
- функциональные стандарты, определяющие процессы и методы формализации данных об изделии и процессах;
- информационные стандарты по описанию данных об изделиях и процессах;
- стандарты информационного обмена, контролирующие носители информации и процессы обмена данными между системами;
- стандарты в области защиты информации;
- стандарты электронной цифровой подписи;
- стандарты в области менеджмента качества (ИСО 9000-9001).

На сегодняшний день действует целый ряд международных стандартов в области ИПИ, и их число продолжает увеличиваться. Это характеризует динамику развития международной нормативной базы в области ИПИ-технологий и доказывает востребованность этих стандартов.

Методология ИПИ базируется на использовании интегрированной информационной модели изделия. Стандарт STEP (сокр. от англ. *Standard for Exchange of Product model data* — стандарт обмена данными модели изделия) обеспечивает организацию информационного обмена между различными компьютерными системами за счёт задания полной информационной модели изделия на протяжении его жизненного цикла, а также способов реализации обмена данными, представленных согласно его полной модели [5].

## 1. ПОНЯТИЕ ИПИ-ТЕХНОЛОГИЙ

---

Полная модель изделия и способы обмена данными представлены в компьютерном виде, не зависящем от программных и аппаратных средств, применяемых участниками ЖЦИ. Условно структура STEP представляется трёхуровневой схемой, содержащей:

- ядро стандарта и инструментарий, определяющие остальные компоненты и реализующие информационный обмен;
- базовое представление информации об изделии, не зависящее от предметной области и заданное с помощью инструментария STEP;
- представление информации об изделии, специфичное для конкретной предметной области (например, автомобилестроение, машиностроение, судостроение и т.п.), характеризующее информационную модель изделия для конкретной предметной области и опирающееся как на инструментарий STEP (первый уровень), так и на базовую модель изделия (второй уровень).

На этих уровнях представлены следующие методы:

- методы описания;
- методы реализации;
- методология тестирования;
- интегрированные ресурсы;
- протокол применения;

Также необходимо отметить, что формат STEP имеет в своём составе ряд специализированных форматов для различных областей применения [6–9].

**Методы описания в стандарте STEP.** Внутренняя структура формата построена на основе объектно-ориентированного подхода с использованием специализированного языка EXPRESS, который независим от области применения [10].

EXPRESS — это язык определения данных или язык концептуальных схем данных. Описание языка EXPRESS содержится в томе ISO 10303-11. Язык EXPRESS предназначен

для формального выражения концепта. Таким образом, описания концептуальных схем данных, выполненные средствами этого языка, являются онтологиями.

Независимость EXPRESS от предметной области достигается за счёт того, что для представления объекта применяется не специфическое, а обобщённое понятие «сущность» (англ. *entity*). Каждая сущность обладает атрибутами, выражающими характерные свойства моделируемого объекта.

Например, сущность «геометрическая точка» имеет атрибуты, отражающие координаты этой точки в пространстве, а сущность «изделие» имеет атрибуты, отображающие обозначение, наименование изделия и т. д. Таким образом, EXPRESS является языком задания информационных моделей, а сущность представляет собой основной элемент модели STEP [11].

Кроме перечисленных особенностей, важным атрибутом данного формата является его стандартизация, то есть соответствие международному стандарту ISO 10303 STEP (или его аналог ГОСТ Р ИСО 10303-2002). Статус международного стандарта обеспечивает два очень важных свойства STEP: стабильность (стандарт пересматривается примерно один раз в пять лет, и новые версии дополняют старые, не внося изменений и не отменяя уже имеющиеся правила) и общедоступность (необходимые материалы практического назначения находятся в свободном доступе или могут быть приобретены в официальных органах стандартизации) [12].

В основу проекта STEP положено утверждение о том, что информация об изделии используется на всех этапах жизненного цикла. Поэтому для обмена информацией возможны два варианта построения взаимодействий — непосредственный обмен между приложениями и обмен данными через «нейтральный» стандарт. Стандарт STEP задаёт полную информационную модель изделия на протяжении его жизненного цикла, а также различные виды обмена данными в структурированном компьютерном виде, который не зависит от используемых средств или программных продуктов [13]. Безусловным преимуществом такого подхода является возможность организации упрощённого информационного обмена между всеми компьютерными системами, используемыми на протяжении ЖЦИ.

## 1. ПОНЯТИЕ ИПИ-ТЕХНОЛОГИЙ

---

В соответствии с этим было решено, что ядро модели должно включать геометрию, граничное представление, трёхмерные твердотельную и поверхностную модели, допуски, параметрические особенности изделия, а также синтаксис данных и структуру файла, независимые от вышеупомянутого содержания.

Применение такого подхода к описанию данных позволяет хранить разностороннюю информацию об изделии [14]. При этом язык описания позволяет представлять конструкторско-технологические параметры в связи с геометрическими элементами. Такой подход имеет особое значение для расширенных предприятий, так как обеспечивает прозрачное взаимодействие между отдельными участниками, что особенно важно в тех случаях, когда в кооперацию могут вступать предприятия, которые не имеют истории взаимного сотрудничества или представляют различные области со специализированными инструментальными средствами.

### **Основы представления данных об изделии в стандарте STEP.**

Основное назначение стандарта STEP — представление данных об изделии для обмена и хранения.<sup>6</sup> Стандарт ISO 10303 предназначен для использования во многих областях профессиональной деятельности (в первую очередь — производственной).

Каждый вид описания изделия может иметь несколько моделей представления для описания одного и того же свойства изделия или описание одного свойства в различных условиях. Аналитическая граничная модель является наиболее полным, точным и однозначным представлением формы изделия. Эта модель содержит представление формы изделия с помощью граничной твердотельной модели. Топологический объект «твердое тело» состоит из одной внешней оболочки и произвольного числа внутренних оболочек, задающих пустоты внутри модели. Каждая из оболочек содержит набор граней, грани ограничены контурами, состоящими из рёбер, каждое ребро имеет начальную и конечную вершины.

---

<sup>6</sup>В том числе долгосрочного; ориентировочным сроком в настоящее время считается 50 лет, что соответствует длительности жизненного цикла многих сложных изделий и объектов: судов, самолетов, АЭС и т. д.

---

---

## 2

---

# PLM СИСТЕМЫ

Рассмотрим более детально методологию PLM и её реализацию на примере одного из ведущих мировых разработчиков и поставщиков — компании Dassault Systèmes.<sup>1</sup> В соответствии с концепцией 3D PLM, Dassault Systèmes разработала систему взаимосвязанных процесс-ориентированных решений, основанных на передовых компьютерных технологиях трехмерного (англ. *3D*) моделирования и реализующих пять фундаментальных принципов построения PLM:

а) Ориентация на специфические бизнес-процессы каждой отрасли промышленности (англ. *process centric*).

б) Единое информационное пространство для всех участников работы над изделием (англ. *collaborative workspace*).

в) Единство описания изделия, процесса его создания и ресурсов, необходимых для реализации этого процесса (англ. *product process resources*).

г) Накопление и использование полученных знаний для создания новых изделий (англ. *knowledge*).

д) Открытая компонентная архитектура, позволяющая неограниченно расширять и углублять функциональность системы за счёт сторонних разработчиков.

Решение Dassault Systèmes включает программные продукты полностью консолидированных брендов: CATIA — для

---

<sup>1</sup><https://www.3ds.com/ru/>

## 2. PLM СИСТЕМЫ

---

проектирования изделия; SIMULIA — для инженерного анализа; ENOVIA и ENOVIA-SmarTeam — для управления данными об изделии на протяжении его жизненного цикла; DELMIA — для управления процессами производства и эксплуатации изделия, а также для планирования и оптимизации необходимых для этого ресурсов; 3DVIA Composer — для создания интерактивных технических руководств.

В настоящее время компания Dassault Systèmes представляет платформу 3DEXperience, в рамках которой функционируют все упомянутые выше программные системы. Многие крупные промышленные предприятия начали переход на эту информационно-технологическую платформу. Однако в настоящее время в промышленности по большей части используются программные продукты, разработанные на базе платформы V5. Рассмотрим кратко отдельные компоненты данной PLM-платформы.

### 2.1 Система CATIA

Название CATIA является аббревиатурой от Computer Aided Three Dimensional Interactive Application, что можно (с учётом смысловых акцентов) перевести как «компьютерный комплекс трёхмерных интерактивных инженерных приложений». Система CATIA предоставляет инструментарий для следующих участников процесса производства промышленного изделия:

а) *Для инженера-проектировщика* — инструменты системы поддерживают проведение всестороннего анализа и позволяют определять требования, функциональные характеристики и укрупненное задание структуры изделия.

б) *Для дизайнера* — система обеспечивает создание внешнего вида изделия, с учётом самых современных требований к его дизайну.

в) *Для инженера-конструктора* — система поддерживает конструирование изделия с учётом требований, возможностей производства, имеющихся ресурсов и т.д. Система позволяет конструировать изделия различной сложности, включая большие сборки, изделия из композиционных материалов, технологическую оснастку (штампы, литьевые формы) и др.

г) Для инженера-расчётчика — инструменты системы обеспечивают использование методов проверочного анализа и контроля для оценки изделия на ранних стадиях его проектирования, оптимизацию конструкции, выявление зон риска и улучшение эргономических показателей изделия, а также процессов его производства.

д) Для инженера-технолога — обеспечивается подготовка управляющих программ для станков с числовым программным управлением (сокр. ЧПУ), создание виртуальных моделей оборудования с последующим использованием результатов для верификации и оптимизации производственных процессов.

Экран системы САТІА V5 выглядит так, как показано на рис. 2.1. При этом расположение команд, показанное на рис. 2.1, соответствует расположению по умолчанию, после инсталляции системы. Впоследствии иконки с командами могут перемещаться пользователем на другие места экрана, скрываться и т. д.

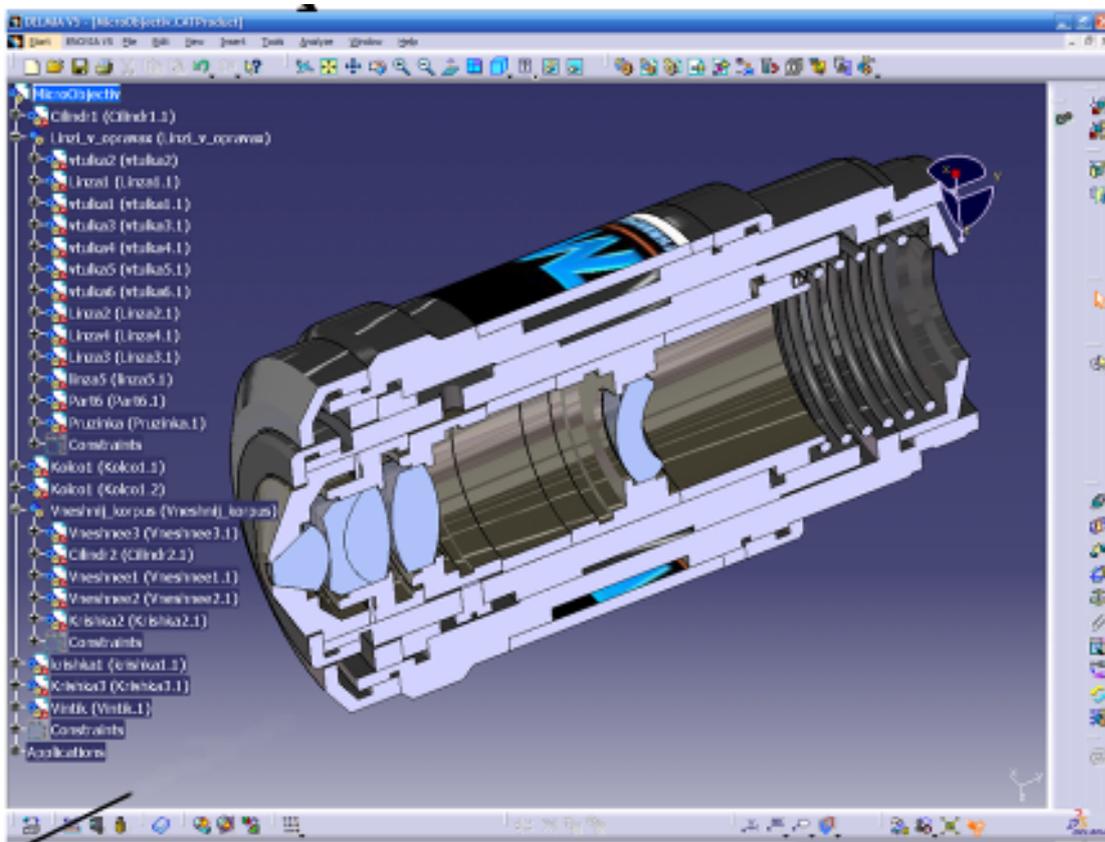


Рис. 2.1. Экран системы САТІА V5 (модель микрообъектива)

## 2. PLM СИСТЕМЫ

---

Система САТІА настраивается по модульному принципу. Модуль — это программный компонент системы. Каждый модуль системы используется для определённой задачи (например, модуль твердотельного проектирования, модуль проектирования сборок, модуль выпуска чертёжной документации, модуль проектирования формообразующих поверхностей для штамповой оснастки и т. д.).

В свою очередь, модули объединяются в конфигурации по принципу обеспечения законченного выполнения того или иного этапа проектирования. При этом модули полностью интегрированы друг с другом, что позволяет работать с единой 3D-моделью на всех этапах проектирования изделия и оснастки, а также обеспечить отсутствие ошибок, которые неизбежно возникли бы при передаче геометрии между различными системами. Часть модулей, в зависимости от своего назначения могут входить в различные конфигурации.

Важным элементом представления информации проекта является дерево проекта. В нем отражена концепция «Продукт—Процесс—Ресурс», которая состоит в том, что дерево проекта и 3D-модель должны содержать не только информацию о геометрическом построении изделия, но и дополнительные данные, которые порождаются на других этапах жизненного цикла изделия. В общем случае, дерево в системе САТІА содержит три основные ветви:

а) *Product (Продукт)* — данная ветвь определяет структуру изделия и может включать в себя сборки и механические связи между элементами, детали со всеми входящими геометрическими элементами их построения (точки, кривые, поверхности, твердотельные элементы, элементы оформления и т. д.) в иерархическом порядке.

б) *Process (Процесс)* — данная ветвь включает все, создаваемые в САТІА процессы (управляющие программы для станков с ЧПУ, перемещение компонентов при задании сборочных операций, перемещение рабочих органов оборудования при использовании его виртуальных моделей и т. д.). Большинство процессов создаётся также в системе DELMIA, о которой будет сказано ниже.

в) *Resource (Ресурс)* — ветвь, содержащая все используемые ресурсы, такие как используемый для обработки на станках с ЧПУ инструмент и приспособления, виртуальные модели станков и другого оборудования, используемого в различных производственных процессах (в полной мере эта ветвь дерева используется системой DELMIA).

В последнее время всё более широкое распространение получает новый подход к проектированию изделий, который называется RFLP [15] и объединяет в себе:

- а) *Requirements* — текстовое описание и визуальное представление информации о требованиях к будущему изделию.
- б) *Functional* — описание функциональных свойств изделия.
- в) *Logical* — логическая схема проектируемого изделия.
- г) *Physical* — описание виртуального объекта в САД-модулях (структура изделия, чертёж, принципиальная схема, модель).

Такой подход реализован в САТІА и применяется в современных приборостроительных отраслях. Рассмотрим кратко функциональные возможности системы САТІА.

**Машиностроительное проектирование.** В рамках данной предметной области, пользователь САТІА может решать широкий круг задач:

- твердотельное и каркасно-поверхностное моделирование деталей и сборочных единиц;
- формирование чертёжно-конструкторской документации; простановка допусков и обозначений на модели с их контролем и автоматическим переносом на чертёжные виды;
- проверка корректности и исправление импортируемой геометрии;
- конструирование изделий из листового металла;
- проектирование сварных конструкций;
- проектирование формообразующих элементов литейных форм и штампов, а также проектирование конструкции (пакетов) формообразующей оснастки;
- проектирование металлоконструкций на основе каталогов и пользовательских библиотек;
- проектирование деталей из композитных материалов;

## 2. PLM СИСТЕМЫ

---

- функциональное проектирование изделий из пластмасс (то есть с учётом их назначения, на соответствующем семантическом уровне).

**Разработка дизайна изделия.** Система CATIA предоставляет дизайнерам инструментарий для проектирования внешнего вида изделия:

- использование 2D-изображений для создания 3D-модели виртуального макета изделия;
- создание поверхностей произвольной формы;
- детальная проработка формы изделия;
- проектирование сложных форм, базирующихся на каркасных и поверхностных компонентах, с полным учетом технических требований к поверхности;
- проектирование сложных форм без параметризации;
- использование поверхностей А-класса для проектирования кузовных деталей автомобиля;
- создание формы изделия на основе физического макета с помощью технологии обратного проектирования;
- анализ качества получаемых поверхностей и их оптимизация;
- создание реалистичных изображений изделия и презентационных видеофрагментов.

**Проектирование производственных и коммуникационных систем.** Здесь инструменты системы обеспечивают решение следующих задач:

- проектирование электрических систем и жгутов в среде изделия;
- трассировка и детализировка трубопроводных линий с учётом расставленного оборудования;
- проектирование систем вентиляции и кондиционирования;
- проектирование волноводов для радионавигационных систем;
- проектирование подвесных систем для размещения линий кабельной сети, систем вентиляции, трубопроводов и др.;
- планировка территорий и размещение оборудования.

**Программирование обработки на станках с ЧПУ.** В системе САТІА имеются все необходимые инструменты, позволяющие создавать управляющие программы для различных типов обработки с использованием большого количества стратегий обработки:

- токарная обработка (черновая обработка, проточка канавок, чистовая обработка контура, чистовая обработка канавок, нарезание резьбы, обработка по заданной траектории, фиксированные циклы);
- 2,5-осевая фрезерная обработка (черновая обработка по слоям, обработка по контуру, обработка вдоль кривой, фрезерование канавок, фрезерование колодцев, фрезерование плоскостей, обработка по заданной траектории);
- 3-осевая и 5-осевая фрезерная обработка (черновая обработка по слоям, черновая обработка с переменной Z, чистовая обработка параллельными проходами, «карандаш», обработка по слоям, обработка по направляющей, обработка по спирали, обработка по контуру, плунжерное фрезерование);
- обработка на обрабатывающих центрах, имеющих несколько револьверных головок или шпинделей;
- проволочная электроэрозионная обработка;
- 5-осевая лазерная резка.

САТІА позволяет осуществлять проектирование всей обработки от черновой до чистовой. При этом визуализация и верификация данного процесса может вестись, как традиционным для САМ-систем способом, который учитывает обрабатываемую деталь, заготовку, инструмент и приспособления, так и с использованием виртуальных моделей оборудования. Это позволяет контролировать не только систему «инструмент-заготовка», но и все рабочие органы оборудования, задействованные в процессе производства.

**Анализ цифрового макета изделия.** САТІА позволяет проводить анализ на любой стадии проектирования с использованием цифрового макета изделия без изготовления опытных образцов. При этом обеспечивается решение следующих задач:

## 2. PLM СИСТЕМЫ

---

- визуализация изделия и навигация по проекту;
- верификация (контроль) проекта;
- просмотр альтернативных вариантов и оптимизация проекта;
- анализ собираемости изделия и анимация его монтажа и демонтажа;
- анализ кинематики механизмов;
- анализ эргономичности с помощью цифровых манекенов.

Цифровой макет изделия (англ. *Digital Mock-Up*) содержит в своей основе сборочную модель изделия, которая «обогащена» различными дополнительными сведениями о проекте. При этом для обеспечения комфортной работы с изделиями, содержащими большое количество деталей, создается облегчённая трёхмерная модель. Эта модель получается при помощи фасеточной аппроксимации основной 3D-модели.

**Инженерный анализ.** Для обеспечения возможности обнаружения ошибок на стадии проектирования изделия применяют инструменты инженерного анализа, созданные на базе метода конечных элементов (сокр. *МКЭ*). В системе CATIA, с помощью МКЭ можно решать следующий комплекс задач:

- расчёты напряжений, смещений и вибраций;
- модульный анализ и анализ прочности сборки;
- анализ динамических характеристик;
- расчёт допусков с учётом всего процесса сборки изделия.

### 2.2 Система DELMIA

Эта система содержит набор инструментов для цифрового описания, прогнозирования и моделирования производственных процессов изготовления изделий и необходимых для этого ресурсов. По сути DELMIA — это «цифровая виртуальная фабрика», позволяющая исследовать и оптимизировать процессы изготовления изделий, настройки и обслуживания оборудования и оснастки до начала их реального производства [16].

Будучи объединённой с системой CATIA, DELMIA позволяет моделировать процессы изготовления изделия параллельно с его проектированием, оперативно учитывая возникающие

конструктивные изменения и ограничения. Это позволяет существенно сокращать сроки разработки и запуска в производство новых изделий, повышать их качество и технологичность. Рассмотрим подсистемы и задачи, решаемые системой DELMIA.

### **Планирование и технологическая подготовка производства.**

С помощью данного программного комплекса решаются задачи планирования, подготовки производства, а также ряд обеспечивающих задач:

- планирование режима работы предприятия;
- планирование коэффициента загрузки оборудования;
- принятие стратегических решений по отношению к риску (наличие дублирующего оборудования и т. д.);
- оценка технологического оснащения производства, то есть наличие кадров, материалов, оборудования, наличие полуфабрикатов и изделий, которые могут быть получены у поставщиков; планирование технологических маршрутов и процессов; отработка изделия на технологичность (совместно с другими модулями DELMIA); расчеты хода производства и движения материальных потоков.

Наряду с этим, в DELMIA имеются инструменты анализа стоимостных и временных характеристик, а также инструменты для вывода необходимой документации, которая может быть настроена на условия конкретного предприятия.

### **Моделирование процессов с участием промышленных роботов.**

С помощью данного программного комплекса решаются задачи отработки в виртуальной среде как отдельных промышленных роботов, так и целых роботизированных линий. К основным задачам, решаемым системой DELMIA [17] в данной области, относятся:

- построение виртуальных моделей роботов и задание их кинематических характеристик;
- разработка управляющих программ и их верификация;
- оптимизация схемы размещения роботов с учётом их рабочих зон и сопутствующего оборудования;

## 2. PLM СИСТЕМЫ

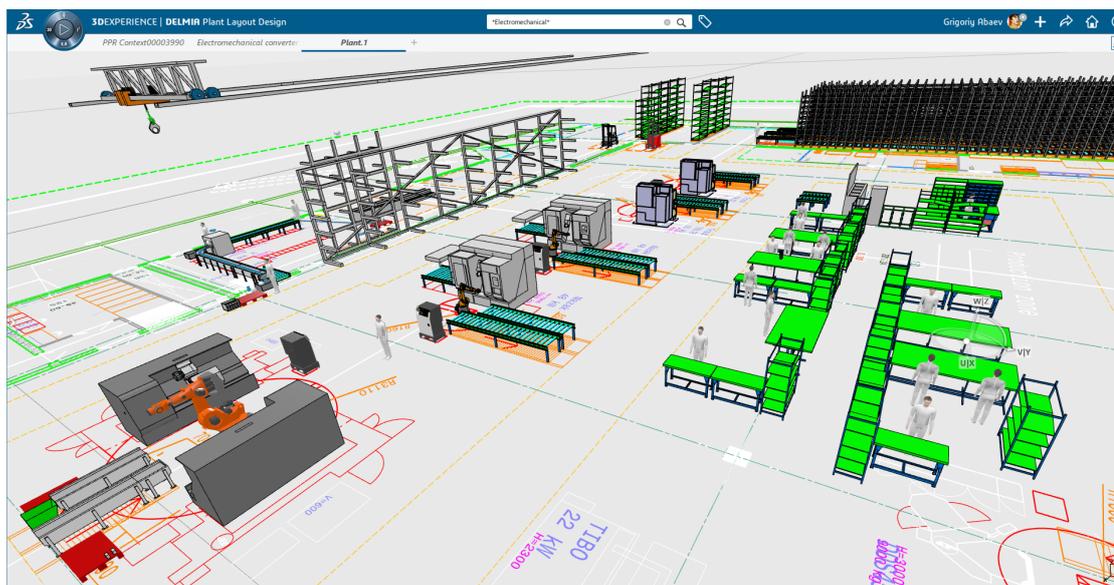


Рис. 2.2. Модель участка производства в системе DELMIA

- определение столкновений между роботами, деталями, инструментом, приспособлениями;
- оптимизация циклов совместной работы оборудования, определение «узких мест»;
- быстрое и наглядное проектирование роботизированных ячеек для сварки, покраски, транспортировки и т.д.

На рис. 2.2 показана модель сборочного участка производства в системе DELMIA.

**Анализ эргономичности изделия и технологических процессов.** При производстве сложных изделий одним из важных элементов является учёт человеческого фактора. От того, насколько удобно выполнять человеку ту или иную операцию, зависит не только его производительность, но и безопасность. Система DELMIA позволяет включать модель человека (манекен) в модель производственного процесса.

Типовой сценарий оценки эргономичности процесса в системе DELMIA выглядит следующим образом:

- а) Добавление манекенов в цифровой макет предприятия.
- б) Задание действий манекена и его взаимодействий с окружением (изделием, оснасткой, инструментом).
- в) Симуляция заданных действий.

г) Анализ антропометрических параметров, досягаемости, видимости, нагрузок и др.

д) Вывод отчётов.

К преимуществам использования системы DELMIA в данной области следует отнести:

- возможность отработки изделия на технологичность параллельно с его проектированием;
- принятие во внимание эргономических ограничений при проектировании изделия;
- снижение количества дорогих физических прототипов;
- оптимизацию последовательности технологических операций;
- оптимизацию производственного участка и расположения оборудования;
- определение необходимости проектирования дополнительной оснастки на ранних этапах;
- сокращение времени, затрачиваемого на эргономический анализ, путем использования библиотек действий и положений.

**Моделирование сборочных процессов.** Еще одной задачей, решаемой системой DELMIA, является детальное моделирование процессов сборки изделия. При этом выполняется моделирование ручных и автоматизированных сборочных операций, имеется возможность создания операционных инструкций и интерактивных электронных руководств. Для формирования последовательности сборки, технолог может использовать разные её представления — древовидную структуру, сетевой график (англ. *Project Evaluation and Review Technique*) и диаграмму Ганта. В процессе моделирования сборочного процесса решаются следующие задачи:

- задание последовательности сборочных операций;
- анализ собираемости изделия;
- оптимизация последовательности операций;
- анализ использования оснастки и инструмента.

При этом используются каталоги производственных ресурсов (оборудование, инструменты и др.) и библиотеки типовых операций, которые технолог может формировать исходя из специфики своей работы.

### 2.3 Система 3DVIA Composer

Данная система служит для создания интерактивных электронных технических руководств (сокр. *ИЭТР*). ИЭТР включает взаимосвязанные технические данные, необходимые при эксплуатации, обслуживании и ремонте изделия. ИЭТР предоставляет пользователю справочную и описательную информацию об эксплуатационных и ремонтных процедурах, относящихся к конкретному изделию, непосредственно во время их проведения в интерактивном режиме.

В настоящее время всё большее распространение получают ИЭТР, содержащие анимированное представление процессов обслуживания и ремонта на основе использования 3D-моделей изделий и их компонентов. Для создания таких руководств используются специальные средства, к которым можно отнести систему 3DVIA Composer, разработанную Dassault Systèmes.

Система 3DVIA Composer — это универсальный инструмент, предназначенный для создания интерактивной технической документации на проектируемые изделия. С помощью удобной и функциональной системы разработки мультимедийного контента, 3DVIA Composer автоматизирует процедуры сборки/разборки изделия, создания технических иллюстраций, интерактивной 3D-анимации и т. д.

3DVIA Composer находит успешное применение в отделах продаж, маркетинга, сервисного обслуживания, обучения, в конструкторских и производственных подразделениях [18]. В системе 3DVIA Composer организована поддержка широкого перечня форматов современных систем проектирования (CATIA, SolidWorks и др.), что позволяет импортировать в проект 3D данные напрямую или после их преобразования в универсальные форматы: 3DXML, IGES, STEP.

Созданный проект можно экспортировать в исполняемый файл со встроенной программой просмотра, что позволяет открыть его на любом компьютере без предварительной установки каких-либо CAD-систем. Проекты 3DVIA Composer можно также сохранять в различных стандартных форматах,

например: PDF, HTML, SVG, CGM, 3DXML, AVI, в приложениях Microsoft Office и др., которые позволяют использовать графические и мультимедийные объекты 3DVIA Composer в традиционной текстовой документации.

Применение 3DVIA Composer позволяет существенным образом сократить время, затрачиваемое на переделку или обновление документации при внесении изменений в конструкцию изделия. Обновление происходит автоматически за счёт ассоциативной связи с конструкторской 3D-моделью. Разработку документации в 3DVIA Composer можно начинать на ранних этапах, когда конструкторская модель еще не сформирована полностью, а по завершении проектирования легко обновлять графический и мультимедийный контент в подготовленном шаблоне документа.

Интерактивные документы, созданные в 3DVIA Composer, могут быть защищены от нелегального использования с помощью назначения прав доступа к функциям просмотра, копирования и печати, а также полного или частичного отображения/скрытия отдельных элементов или преднамеренного понижения качества 3D модели, когда её геометрические параметры представляют собой интеллектуальную собственность.

## 2.4 Система ENOVIA

Эта система относится к классу PDM (англ. *Product Data Management*). ENOVIA (рис. 2.3) структурирует и связывает все инженерные, организационные и вспомогательные данные, планирует и управляет процессами проектирования и подготовки производства, а также служит интеграционной платформой для взаимодействия с CAD/CAM-системами, корпоративными информационными системами, предназначенными для управления ресурсами предприятия (англ. *Enterprise Resource Planning — ERP*), взаимоотношениями с клиентами (англ. *Customer Relationship Management — CRM*) и с поставщиками (англ. *Supply Chain Management — SCM*). Продукты системы ENOVIA [19] можно разделить на три основные группы.

## 2. PLM СИСТЕМЫ

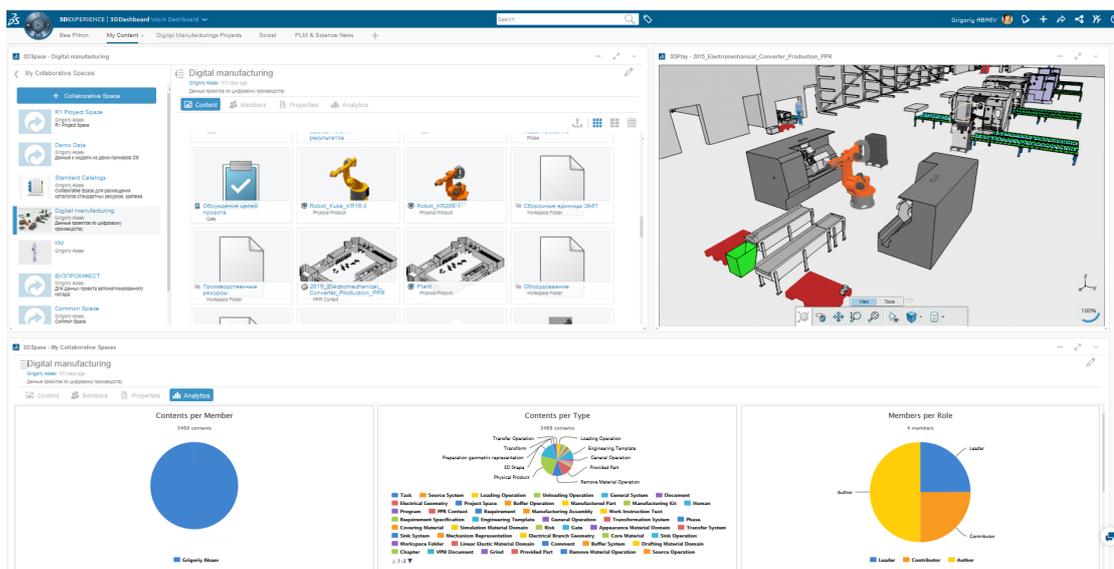


Рис. 2.3. Рабочая область системы ENOVIA

**Интегрированные решения с различными CAD/CAM/CAE/ECAD-системами.** Функционал данной группы модулей объединяет набор решений для управления данными и процессами, связанными с различными этапами проектирования и конструирования изделий. Подход реализован таким образом, что пользователь CAD-системы в процессе работы использует встроенные в CAD-систему инструменты PDM-системы.

Средства интеграции PDM-системы помогают управлять структурой построения 3D-моделей, обеспечивают управление специальной логикой и связями информации внутри CAD-моделей, контролируют сохранение данных в единой базе данных (сокр. *БД*). Приведём перечень некоторых функций, реализованных в данной группе решений:

а) Структурирование данных по разделам (проекты, документы, компоненты, изделия). Возможность создавать различные классификаторы, справочники, каталоги.

б) Хранение электронных (3D, 2D-модели) и сканированных документов (чертежи, НТД, ГОСТ, ТУ, и т.д.), вспомогательных данных, причём все документы автоматически сохраняются в единой БД.

в) Повторное использование проектных и конструкторских решений. Возможность быстрого и контролируемого заимствования инженерных решений, копирование структуры проекта, дерева построения из САД-систем.

г) Актуальность данных: PDM-система автоматически отслеживает (создаёт) версии документов (2D и 3D-моделей), при этом отслеживает зависимости и внутренние ссылки между документами. Например, при внесении изменения в 2D-чертеж, система автоматически отслеживает связи этого чертежа с 3D-моделью, выдаёт соответствующее предупреждение и в соответствии с видом изменений контролирует результат.

д) Безопасность и управление доступом к данным и документам в соответствии с конкретным проектом и документами, относящимися к проекту, видам документов, роли пользователя в проекте и т. д.

е) Просмотр документов без открытия САД-системы.

В систему встроены различные просмотрщики документов, что позволяет: получать информацию о геометрии 3D-моделей, в том числе о размерах; разбирать-3D модели; вносить комментарии на 3D-модели, для последующего их обсуждения или согласования; автоматически создавать различные отчётные документы любой сложности, а также автоматически заполнять основные надписи на чертежах с использованием заранее разработанных шаблонов; использовать параллельное проектирование и возможности работы с большими сборками в САД-системах.

**Единая БД для управления корпоративной информацией.** Набор специализированных инструментов в системе ENOVIA обеспечивает решение любых задач по структуризации, унификации, управлению и хранению корпоративной информации [20]. Например, группа модулей ВОР (англ. *Bill Of Materials*) позволяет автоматически формировать и отслеживать информацию (изменения) о полном или едином описании изделия, что позволяет управлять составом изделий, конфигурациями, параметрами, а также всеми вспомогательными данными о компонентах и документах необходимых при выполнении задач подготовки производства.

## 2. PLM СИСТЕМЫ

---

Единая структура изделия описывает все взаимосвязанные данные: детали и сборки из машиностроительных CAD/CAM-систем; компоненты электронных устройств; программное обеспечение (микрокод), с которым работают микросхемы; документацию по всем электронным, механическим и программным компонентам изделия; основные, вспомогательные и технологические материалы (материалы, марки, сортаменты и соответствующие им ГОСТ, ТУ); средства технологического оснащения (оснастка, инструмент). Единая структура позволяет отслеживать комплектность узлов/компонентов (образцов, запасных частей, упаковки, и т.д.) в составе изделий, изготавливаемых по разовым заказам.

Таким образом, можно легко управлять всеми видами данных в единой структуре изделия. Все изменения автоматически отображаются в объединенной спецификации изделия, данные постоянно актуализируются, поскольку работа ведётся над единым проектом, доступным для всех участников [21].

### **Управление проектами и процессами при совместной работе**

Набор решений данной группы позволяет управлять процессами и контролировать совместную работу независимых групп разработчиков, субподрядчиков, смежников, поставщиков, контролировать доступ к данным в соответствии с конкретным проектом.

Важной функцией системы ENOVIA является возможность управления потоками производственных заданий с помощью технологии Workflow. Графики Workflow визуально представляют собой совокупность узлов и соединителей, по которым информация перемещается от одного узла или состояния к другому [22]. Узел определяет производственное задание и его характеристики. При составлении производственного задания для каждого узла указываются такие свойства, как пользователь, действия которого в рабочем процессе соответствует этому узлу графика заданий и задание, которое он должен выполнить, а также сроки или другие условия выполнения задания. В принципе, можно создавать такие узлы, задания в которых будут выполняться не пользователем, а самой системой (например, передача данных или автоматическая выдача сообщений и оповещений).

---

---

# 3

---

## CAD/CAM/CAE СИСТЕМЫ

Технологическая подготовка производства (сокр. *ТПП*) является одним из этапов жизненного цикла изделия и представляет собой совокупность работ по определению последовательности процесса изготовления изделия наиболее рациональными способами с учётом конкретных условий данного предприятия. Основной задачей *ТПП* является обеспечение высокого качества изготавливаемой продукции и создание условий для соблюдения принципов рациональной организации производственных процессов, улучшения использования оборудования и производственных площадей, роста производительности труда, снижения расхода материалов и энергоресурсов.

Как известно, *ТПП* осуществляется в соответствии с требованиями стандартов и предполагает решение следующих задач:

- обеспечение технологичности изделия (включая технологичность конструкции изделия и выполнения работ при его изготовлении, эксплуатации и ремонте);
- разработку и внедрение технологических процессов (механообработки, сборки, штамповки, литья, термообработки, сварки и др.) для изготовления деталей и узлов изделия;
- проектирование и изготовление необходимого нестандартного оборудования и средств технологического оснащения

### 3. CAD/CAM/CAE СИСТЕМЫ

---

(приспособлений, литьевых форм, штампов, специального режущего и измерительного инструмента);  
— управление процессами ТПП.

Под автоматизацией ТПП в дальнейшем будем понимать, главным образом, использование соответствующих ИПИ-технологий для решения указанных задач ТПП в рамках общей стратегии PLM. В качестве средств автоматизации для решения задач ТПП используются различные программные средства, включая описанные ранее. Здесь остановимся более подробно на CAD/CAM и CAE-системах, играющих важную роль в сфере автоматизации ТПП. Эти системы могут использоваться как в составе интегрированных PLM-решений, так и автономно. Среди большого количества существующих CAD/CAM-систем одно из лидирующих мест занимает система Cimatron E,<sup>1</sup> поэтому приведем её краткие характеристики.

#### 3.1 Система Cimatron E

CAD/CAM-система Cimatron E представляет собой интегрированное решение для проектирования изделий, оснастки и разработки управляющих программ для станков с ЧПУ. Она обладает большими возможностями в части гибридного твердотельно-поверхностного моделирования, проектирования литьевых форм, штампов, электродов для прошивной электроэрозии. Система обеспечивает комплексный подход в решении задач ТПП, активно поддерживает возможности проектирования различных видов оснастки и инструмента: литьевых форм, штампов, электродов для прошивной электроэрозионной обработки, приспособлений и др.

В целом интегрированное решение от Cimatron позволяет работать с исходными данными, импортированными из любой CAD-системы и создавать высококачественную оснастку быстрее и дешевле, чем другие существующие решения, что позволяет оценивать Cimatron E как одну из лучших на сегодняшний день мировых систем в сфере «проектирования для производства». Использование CAD/CAM Cimatron E позволяет сократить сроки

---

<sup>1</sup><http://www.cimatron.com>

### 3.1. СИСТЕМА SIMATRON E

проектирования и подготовки производства сложной формообразующей оснастки и инструмента на 50 % и более.

Функциональность Cimatron E базируется на следующих основных принципах:

а) *Быстрота создания и редактирования моделей.* Преимущества Cimatron E обеспечиваются, во-первых, за счёт того, что система предлагает пользователю все основные технологии 3D-моделирования — твердотельное, каркасное, поверхностное, гибридное, булевы операции между объектами любого типа, среду работы со сборками, Quick-приложения Cimatron (рис. 3.1); во-вторых, за счёт уникальной комбинации этих технологий в единой рабочей среде; в-третьих, за счёт того, что все предлагаемые системой технологии моделирования являются параметрическими и обеспечивают исключительную быстроту и гибкость при внесении изменений в геометрию моделей.

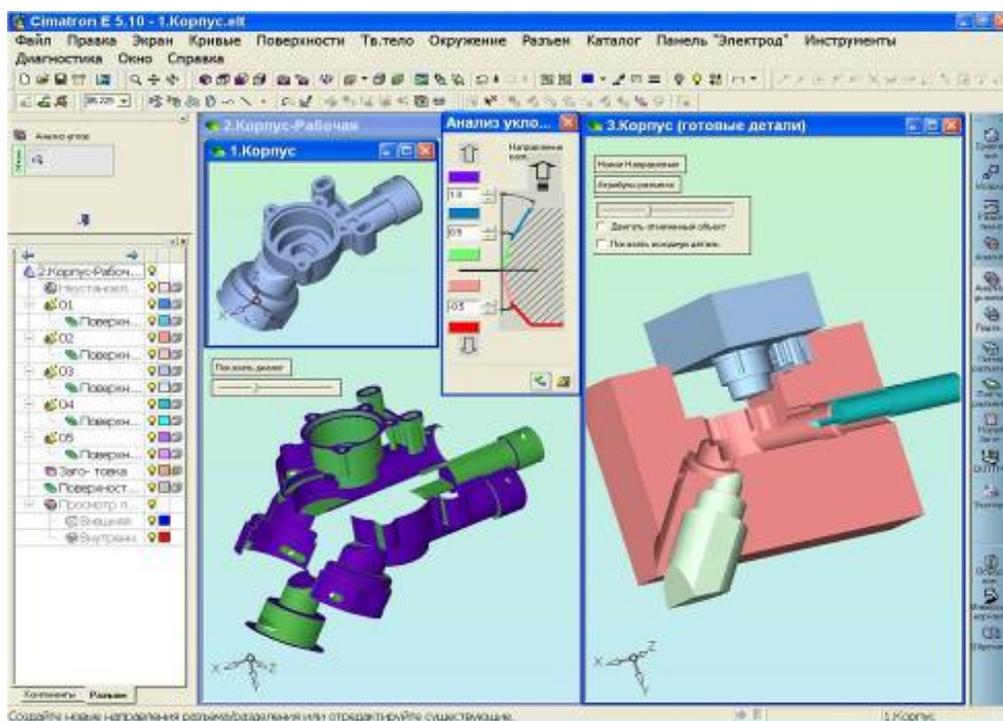


Рис. 3.1. QuickSplit — быстрое разделение на формообразующие поверхности литейной формы

### 3. CAD/CAM/CAE СИСТЕМЫ

---

б) *Широкий спектр инструментов анализа.* Это не только набор средств для геометрических измерений, но и специальные Quick-приложения, позволяющие: определять оптимальные направления разъёма для формования заготовки (поковки); проводить анализ углов уклона поверхностей; выявлять изменения геометрии в моделях, импортированных из других систем для автоматического отслеживания их на дальнейших этапах ЖЦИ. Интеграция с CAE-системами обеспечивает проведение анализа свойств изделий и технологических процессов формования.

в) *Эффективный пользовательский интерфейс, обеспечивающий максимальную производительность работы пользователей и полную концентрацию их внимания на разрабатываемой модели.* В Cimatron E имеются прямые интерфейсы с различными системами, а также стандартные интерфейсы обмена данными DXF, DWG, IGES, Parasolid, STL, PFM, STEP, предлагающие дополнительные опции передачи атрибутивной информации об объектах.

г) *Приложения.* В первую очередь это Quick-приложения, обеспечивающие автоматизацию специфических этапов процесса разработки оснастки, таких как проектирование заготовки, создание формообразующих деталей оснастки, проектирование оснастки второго порядка (электродов) и т.п. Кроме того, это встроенные в Cimatron E средства управления данными рабочего процесса и специальные управляющие панели пользовательского интерфейса (проводники процесса), которые «ведут» пользователя по этапам процесса разработки оснастки и инструмента.

Соединение рассмотренных элементов в Cimatron E даёт новый эффект — система позволяет вести естественный процесс инженерной разработки, заключающийся в многочисленных итерациях в цикле с обратной связью: «концептуальное решение — анализ решения — корректировка решения». Таким образом, при работе с Cimatron E изменения становятся частью рабочего процесса, а пользователь, как и в реальной инженерной практике, может на начальном этапе принимать только главные решения, а остальные откладывать «на потом».

Другими словами, работая с системой, нет необходимости продумывать технические решения сразу до конца — можно

усложнять и корректировать их по мере выполнения последующих этапов работ (в частности, по результатам инженерного анализа с использованием САЕ-систем), так как изменения всегда можно будет внести без существенных затрат позже.

Для организации работы специалистов Cimatron E предлагает поддержку всех этапов рабочего процесса; не только иерархических (для сборочных единиц и деталей в них), но и логических (деталь—заготовка, заготовка—оснастка и тому подобное) ассоциативных связей встроенной системой управления; обеспечивает коллективную работу пользователей в единой базе данных по клиент-серверной технологии.

Это даёт возможность каждому участнику процесса работы над проектом эффективно выполнять свою часть работы и при этом начинать её раньше, чем при традиционном последовательном процессе подготовки производства, когда переход с этапа на этап является однонаправленным движением без поддержки со стороны САД-системы работы с изменениями разнородных моделей, созданных в различных САД-системах. Изменения становятся частью всего рабочего процесса, облегчается управление работами и координация специалистов.

Организация совместной работы специалистов при использовании САД/САМ Cimatron E и САЕ-систем обеспечивает: автоматическое выявление изменений в моделях, поступающих на подготовку производства в стандартном формате; внесение изменений по результатам анализа процесса формования деталей и их автоматическое отслеживание в чертежах, управляющих программах и других объектах, создаваемых в процессе подготовки производства.

Cimatron E предлагает также программирование УП для станков с ЧПУ вплоть до пятикоординатной, непрерывной и позиционной обработки, направленной на достижение более высокой производительности работы и предоставление пользователю лучших средств управления и контроля. В частности, включает ряд новых предметно-ориентированных решений для поддержки специфических видов обработки импеллеров, турбинных лопаток, электродов, гравировки, микрофрезерования и т. д.

Важным свойством системы является возможность виртуального просмотра результатов обработки детали на станке,

### 3. CAD/CAM/CAE СИСТЕМЫ

---

что позволяет сократить цикл программирования обработки на станках с ЧПУ. Функция «предварительный просмотр результатов обработки» представляет на экране ожидаемые результаты обработки, что позволяет свести к минимуму многочисленные длительные итерации, состоящие из подбора параметров, расчёта и визуализации траектории.

Функция показывает приблизительный итог выполнения процедуры обработки или её фрагмент, включая остающуюся заготовку и необработанный материал, а также рассчитывает минимальную требующуюся для обработки длину инструмента. Функция быстрого предварительного просмотра позволяет программистам получать правильный результат после первого же расчёта траектории инструмента за счёт возможности оптимизировать стратегию и параметры резания и предотвратить типовые ошибки начальных этапов процесса программирования обработки.

Ещё один компонент системы — модуль «автоматическое сверление» является легким в использовании средством программирования сверления как плоских деталей, так и деталей с отверстиями, требующими для обработки пятикоординатных перемещений инструмента, а также операций глубокого сверления. Сотни отверстий с произвольной или задаваемой пользователем ориентацией оси распознаются системой за секунды, и система автоматически привязывает к каждому из них соответствующую последовательность технологических переходов и параметров, приводя к сокращению времени программирования сверлильных переходов на 80 %.

Входящая в состав Cimatron E система Fikus является полнофункциональным решением для программирования проволочных электроэрозионных станков различных производителей (рис. 3.2).

При программировании проволочной электроэрозии система предлагает вариант работы с интерфейсом, идентичным интерфейсу устройства ЧПУ, с которым работает оператор станка при вводе данных и задании параметров. В этом случае технолог-программист использует все возможности, предлагаемые станком. Пользователь Cimatron E может использовать эти возможности, работая не у станка,

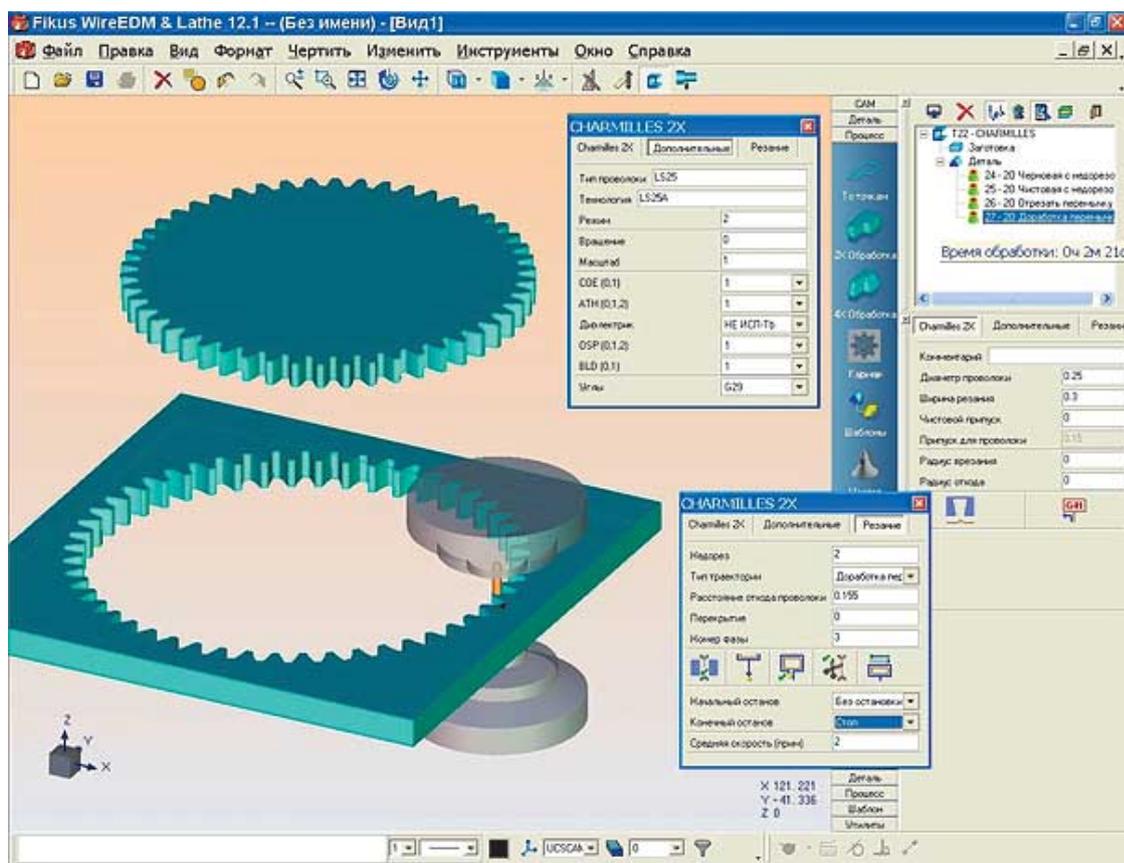


Рис. 3.2. Fikus — проволочная электроэрозия

а в технологическом бюро, получая дополнительно преимущества от более высокой функциональности и более широкого спектра решаемых системой задач.

Например, удобной функцией является автоматическое построение эвольвент зубчатых колес по произвольному набору параметров и другие возможности. Система в базовом варианте имеет постпроцессоры и поддерживает специфические параметры различных моделей таких станков, как Agie, Charmilles, Fanuk, Hitachi, Makino, Mitsubishi, Ona, Sodick, а также легко адаптируется к другому отечественному и зарубежному оборудованию.

В таких областях, как микрохирургия, оптика и сенсорика, всё большее значение приобретают пластмассовые детали микроскопических размеров. Их массовое производство, обеспечивающее приемлемую стоимость, требует квалифицированного и высокоточного изготовления миниатюрных литьевых форм

### 3. CAD/CAM/CAE СИСТЕМЫ

---

для инъекционного литья. В разработке проекта создания такой оснастки приняли участие разработчики CAD/CAM-систем (компания Cimatron), оборудования для микрофрезерования (компания Kern) и специального фрезерного инструмента (компания Magafor), а также компании-изготовители литевых форм (Promolding B.V., Structoform и MMT AG).

На рис. 3.3 в качестве примера приведен инструмент диаметром 50 микрон, используемый при микрофрезеровании и изготовленная с помощью инструментов данного типа литевая форма для микроротора (рис. 3.4).

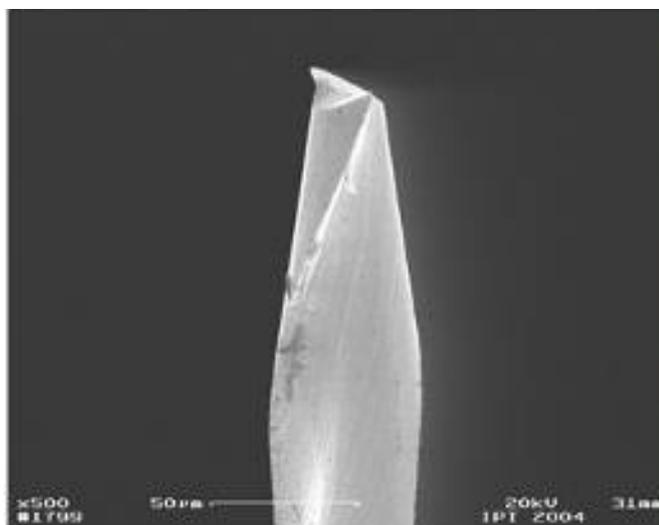


Рис. 3.3. Инструмент 50 мкм

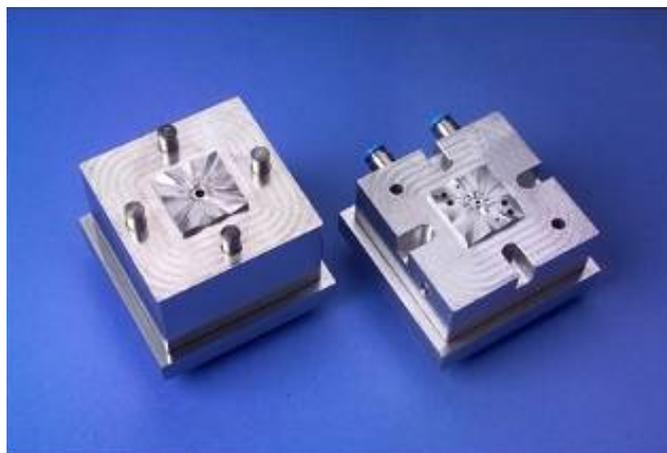


Рис. 3.4. Литевая форма для микроротора

## 3.2 Система GibbsCAM

Системы Cimatron E и GibbsCAM дополняют друг друга, но прямой интеграции между ними пока нет. Несмотря на некоторые похожие функциональные возможности систем к отличительным особенностям GibbsCAM (рис. 3.5) можно отнести лёгкость использования и мощную функциональность, соответствующие определению «сделана операторами станков для операторов».

Наряду с широким спектром традиционных средств программирования 2,5–5-координатной фрезерной, токарной, проволочной электроэрозионной и токарно-фрезерной обработки, особый интерес представляют возможности разработки управляющих программ для наиболее современных и сложных многофункциональных многопоточных станков. Такие станки позволяют выполнять одновременную токарно-фрезерную обработку деталей в нескольких шпинделях несколькими инструментами, закреплёнными в разных револьверных головках,

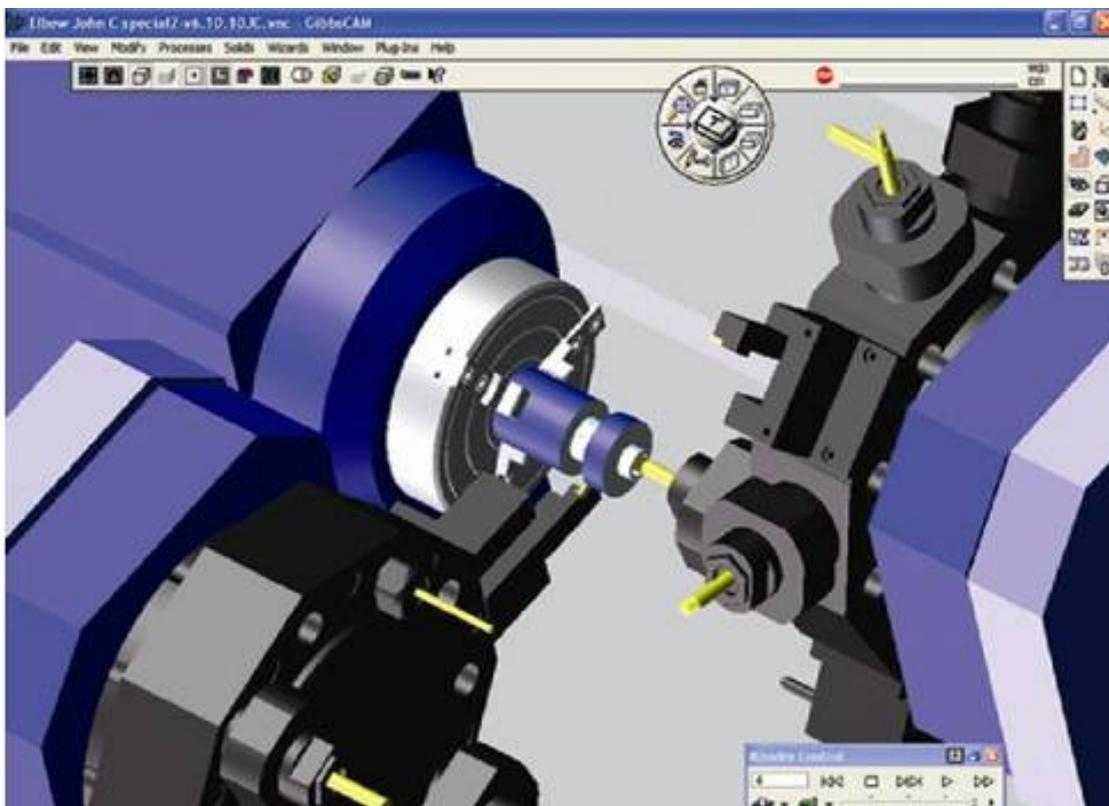


Рис. 3.5. Работа в системе GibbsCAM

с обеспечением управления противопинделями, ловителями и другими элементами станка.

Такое оборудование поставляется с каждым годом всё в больших объёмах, и соответствующие САМ-системы должны будут также получить более широкое распространение. Система GibbsCAM подкупает простотой в использовании, одновременно с широчайшими возможностями поддержки наиболее сложных на данный момент многофункциональных станков.

### 3.3 Система Vericut

Эта система разработана компанией CGTech<sup>2</sup> и предназначена для верификации УП. Она позволяет осуществить проверку УП до её передачи в цех, сберечь дорогостоящее оборудование, оснастку и инструмент. Vericut [23] представляет собой не только визуализатор движения режущего инструмента. С его помощью становится возможным контроль и оптимизация УП для любых типов станков с ЧПУ — фрезерных, сверлильных, токарных, токарно-фрезерных, шлифовальных, заточных, электроэрозионных, протяжных.

Vericut выполняет пять основных функций:

а) *Функция симуляции* — позволяет визуализировать процесс съёма материала с заготовки по готовым управляющим программам.

б) *Функция верификации* — позволяет контролировать процесс обработки, принимая во внимание движение и взаимное расположение рабочих органов станка, используемого оборудования и инструмента.

в) *Функция анализа* — позволяет оценить качество обработки путём сравнения обработанной заготовки с моделью детали и провести измерение геометрических параметров.

г) *Функция экспорта* — помогает при отработке новой детали на технологичность, замыкая цепь «конструктор — технолог-программист ЧПУ», при этом 3D-модель обработанной детали из Vericut переносится в CAD-систему в формате IGES или STL.

---

<sup>2</sup><http://www.cgtech.com>

д) *Функция оптимизации* — осуществляет корректировку подач для ускорения обработки, повышения качества обработки и эффективности использования оборудования.

Таким образом, анализ обработки производится с целью обнаружения ошибок в траектории режущего инструмента и неэффективных проходов. Учитываются такие факторы, как производительность станка (мощность, тип шпинделя, скорость быстрого позиционирования и т. п.), тип режущего инструмента (форма, число зубьев, интенсивность износа и т. п.), глубина, ширина, угол резания. На выходе пользователь получает новую УП, траектория которой идентична исходной, но имеет оптимизированные величины режимов резания.

В процессе верификации решаются следующие задачи:

- контроль и отслеживание перемещений и столкновений между узлами станка (например, столкновения инструмента или державки, столкновения с зажимным приспособлением и оснасткой и др.);
- обнаружение недостаточной точности обработки;
- обнаружение недопустимых режимов перемещения инструмента на холостых и рабочих ходах;
- обнаружение зарезов и недорезов на получаемой в результате моделирования процесса резания модели;
- оптимизация режимов резания (например, высокоскоростная, высокоэффективная обработка) в соответствии с режимами, используемыми на предприятии или в соответствии с данными каталога инструмента и др.

Такой метод практически полностью исключает как возможность аварийного отказа станка, так и длительную доводку УП на станке. Контроль всего процесса обработки детали осуществляется легко и с высокой точностью. Необходимо отметить, что верификация в Vericut, в отличие от встроенных модулей верификации CAD/CAM систем, ведётся в кодах станка, то есть идет проверка G-кода который поступает на станок. CAD/CAM системы работают с универсальным кодом и не могут отследить ошибки, возникающие в УП после конвертации их постпроцессором. Vericut проводит контроль окончательной программы, которая передаётся непосредственно

### 3. CAD/CAM/CAE СИСТЕМЫ

---

в систему ЧПУ, что позволяет гарантировать качество обработки и сохранность оборудования.

Во время симуляции обработки текущее состояние заготовки постоянно обновляется во внутренней базе данных системы, поэтому пользователь может в любой момент остановить работу УП, переместить, повернуть модель заготовки для более наглядного представления или выполнить другие действия по анализу, а затем возобновить обработку с текущего кадра. В среде Vericut можно не только вращать модель детали и запускать симуляцию работы станка, но и измерять геометрию детали на каждом этапе обработки, включая элементы расчетного микрорельефа поверхности, такие как длина и высота гребешка стружки, а также производить контроль нарезы и недорезы.

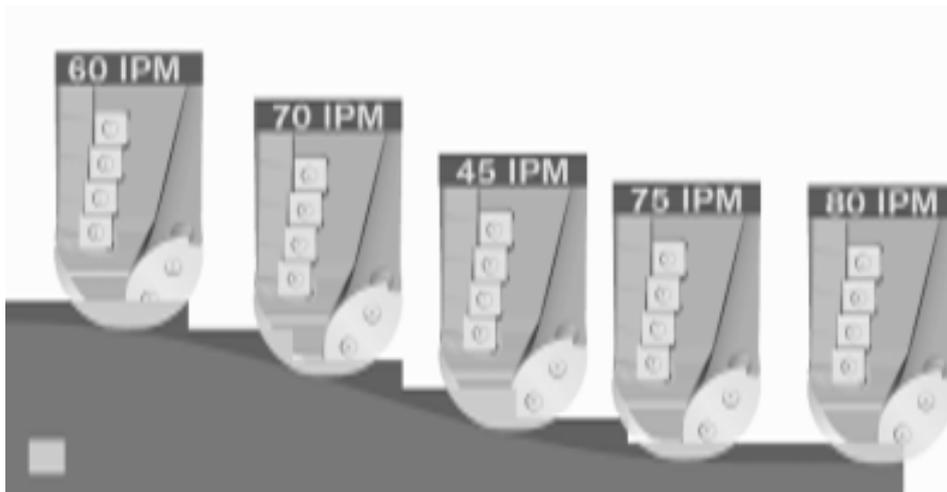
В случае использования опций оптимизации, программное обеспечение читает файл траектории движения инструмента (УП) и автоматически изменяет назначенные скорости подачи так, чтобы подобрать наиболее оптимальную подачу в зависимости от условий обработки и параметров режущего инструмента. Индивидуальный подбор режимов резания повышает эффективность процесса обработки и уменьшает время изготовления детали без потери качества. Оптимизация может применяться для черновой, получистовой, чистовой и высокоскоростной обработки. При оптимизации используется встроенная база знаний и математический аппарат.

При оптимизации Vericut читает файл траектории движения инструмента (G-код) и разбивает движение на ряд меньших фрагментов. Зная количество материала удаленного в каждом фрагменте, Vericut назначает лучшую скорость подачи для данного фрагмента траектории (рис. 3.6).

В процессе оптимизации учитывается: мощность и тип шпинделя; величина ускоренной подачи; жесткость фиксатора детали; характеристики фрезы, включая материал, длину и число зубьев. Наибольший эффект применения Vericut [24] даёт для 4-х и 5-координатных станков, так как при многокоординатных перемещениях наиболее вероятны неконтролируемые САМ-пакетом столкновения инструмента с заготовкой,



(а)



(б)

Рис. 3.6. Траектория и скорость подачи, установленные САМ системой (а) и оптимизированная траектория и скорость подачи (б)

приспособлением, узлами станка. Кроме того, проверяя правильность УП, Vericut одновременно проверяет правильность работы постпроцессора.

Модульная структура позволяет системе гибко настраиваться под конкретного пользователя и его задачи. Каждый модуль спроектирован так, чтобы обеспечить максимальное удобство и функциональность при работе в отдельно взятой области производственного процесса. А независимость от САМ-систем позволяет использовать Vericut как единое средство контроля УП для всего парка станков, имеющих на предприятии.

## 3.4 Moldex3D — система анализа литья пластмасс

Рассмотренные выше возможности системы Cimatron E в части проектирования и изготовления формообразующей оснастки дополняются средствами компьютерного анализа процессов литья изделий из пластмасс. При таком анализе используется 3D-модель пакета литьевой формы, который может проектироваться с помощью приложения MoldDesign (рис. 3.7).

Компьютерный анализ процессов литья используется для обеспечения высокого качества изготавливаемой формообразующей оснастки. Такой анализ позволяет виртуально исследовать любые возможности литья, избегая, таким образом, расходов на материалы и механическую обработку.

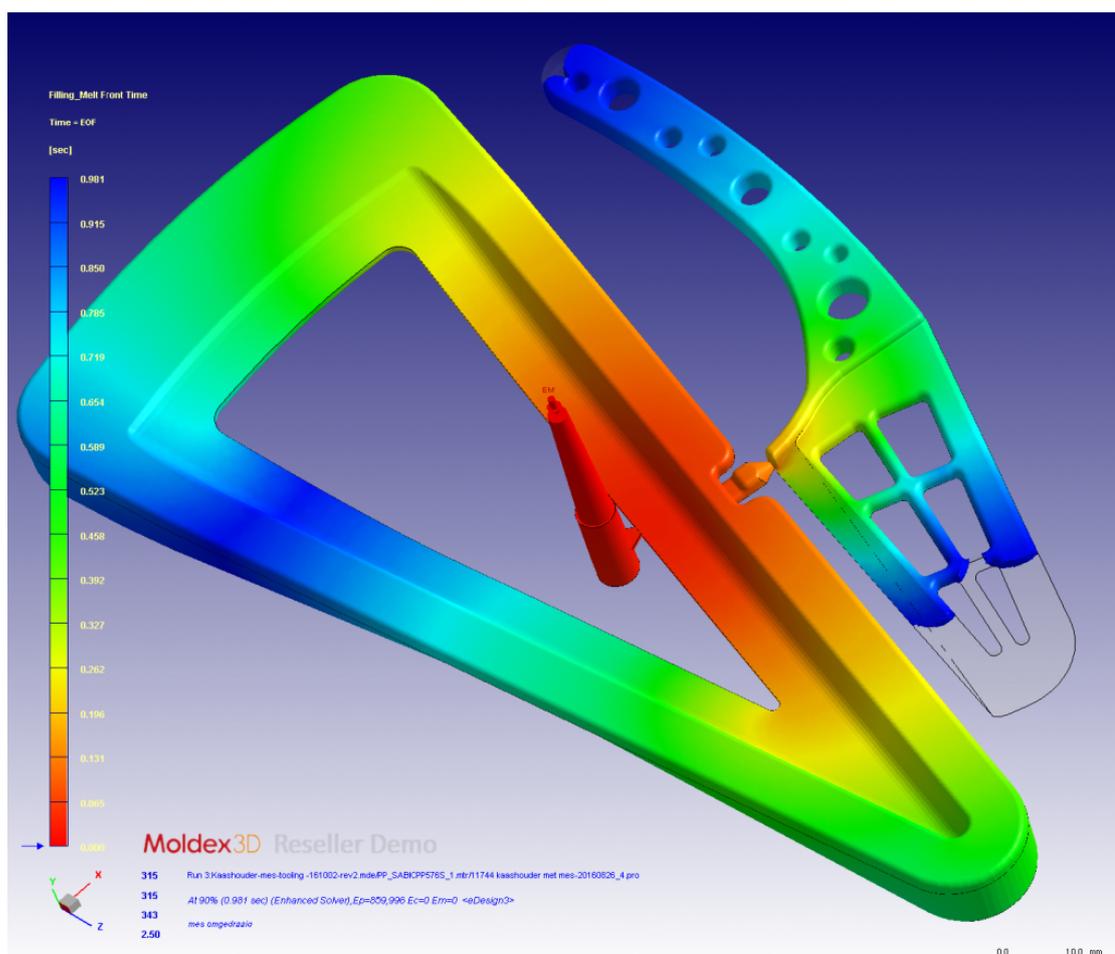


Рис. 3.7. MoldDesign — САПР литьевых форм

Возможность «производить отбор» новых конструкций или их концепций на компьютере даёт возможность инженеру выявить и устранить проблемы ещё до начала производства. Переход к применению специализированных CAE-систем позволяет сократить время цикла внедрения изделия, повысить качество, снизить затраты и сократить срок выполнения заказа. Одной из таких систем является программный пакет Moldex3D<sup>3</sup> компании CoreTechSystem.

Модули Moldex3D [25] решают следующие задачи: моделирование процесса заливки; моделирование выдержки под давлением; моделирование охлаждения детали; моделирование усадки и коробления; учёт волокон в материале детали; моделирование специальных технологий литья, таких как литьё со вставкой, литьё на металлическое основание, многокомпонентное литьё; моделирование литья реактопластов; моделирование вязкоупругих характеристик полимеров; моделирование оптических свойств изделия, получаемого в процессе литья; моделирование процесса изготовления корпусов интегральных схем; моделирование технологии литьевого прессования (компрессионное формование); моделирование и анализ напряжений пластмассовых изделий и др.

Как и большинство систем конечно-элементного анализа, Moldex3D позволяет подготавливать сетку, которая и используется при инженерном расчёте. При этом поддерживаются различные режимы построения сетки, дающие различную степень полноты представления того или иного процесса.

Анализ процессов литья в системе Moldex3D позволяет учесть особенности используемого оборудования и выбранных режимов. Для контроля качества изготавливаемого изделия возможно учитывать множество нюансов и осуществлять выборочный контроль параметров в заранее заданных областях. После моделирования процесса в Moldex3D формируется подробный отчёт, содержащий всевозможную информацию, связанную как с результатами литья, так и с его динамическими аспектами. Применение средств компьютерного моделирования процессов литья позволяет выявить возможные дефекты проектируемых изделий и устранить их на соответствующих этапах ТПП.

---

<sup>3</sup><http://www.moldex3d.com/en/>

## 3.5 Simufact — программный комплекс для компьютерного моделирования

Технологическая подготовка производства является важным этапом процесса разработки нового изделия. Необходимо не только грамотно спроектировать деталь, но и удостовериться в том, что эта деталь может быть изготовлена на существующем оборудовании с заданной точностью. Также требуется правильно спроектировать само оборудование, подобрать оптимальные режимы его работы, разработать технологическую оснастку.

Исследование различных вариантов технологических процессов на реальном оборудовании имеет ряд недостатков (невозможность варьирования параметров оборудования в широком диапазоне, вероятность выхода оборудования из строя в процессе отладки и др.). В связи с этим оптимизация существующих производственных процессов и внедрение в производство новых видов продукции требуют значительных затрат времени, материальных и финансовых ресурсов.

Использование компьютерного моделирования технологических процессов даёт возможность существенно сократить затраты, так как моделирование процесса и подбор оптимальных параметров работы оборудования производится ещё до принятия окончательных решений по технологической оснастке и организации самого производственного процесса.

Пакеты *Simufact Forming* и *Simufact Welding* — инструменты технолога для отработки в виртуальной среде технологических процессов обработки металлов давлением и сварки. Их использование позволяет предприятию существенно сократить затраты на экспериментальную отработку и внедрение.

*Simufact Welding* — программный комплекс для компьютерного моделирования и оптимизации сварочных процессов при различных конфигурациях параметров сварки.

К промышленным сварочным процессам предъявляются высокие требования по надёжности. Для обеспечения надёжности технологического процесса необходимо определить наиболее подходящий метод сварки, подобрать режимы сварки, включая мощность источника, оценить потребность в использовании технологической оснастки.

Использование систем компьютерного моделирования при проектировании технологических процессов сварки позволяет уменьшить коробление и остаточные напряжения в сварных конструкциях, определить оптимальную последовательность сварочных операций, разработать наилучшую схему закрепления, спрогнозировать микроструктуру материала в околошовной зоне, исключить образование горячих трещин и оценить последствия термического воздействия на свойства сварных швов, оценить прочность сварных соединений.

Применение систем инженерного анализа для оптимизации процесса сварки сокращает количество продолжительных и дорогостоящих сварочных испытаний, помогает определить количество роботов и последовательность их использования до установки рабочей производственной линии. Кроме того, с помощью технологий моделирования могут быть оптимизированы существующие производственные процессы.

*Simufact Formin* — программный комплекс для моделирования широкого спектра технологий обработки металлов давлением. Программное обеспечение позволяет учитывать реальную кинематику оборудования любой сложности и типа, различные модели материала (упругие, пластичные и др.), трение и контакт между инструментами и деталями, самоконтакт в формирующейся детали, термодинамику процесса и др.

Ядро *Simufact Forming (Forming Hub)* включает базовый функционал, необходимый для моделирования основных технологических процессов (графический интерфейс пользователя, решатель, база материалов, средства построения конечно-элементной сетки и др.).

Надстраиваемые модули охватывают полный спектр процессов формовки: холодная штамповка, горячая штамповка, листовая штамповка, прокатка, открытая объёмная ковка, радиальная раскатка, механические соединения, термообработка. Используя *Simufact Forming*, можно промоделировать как отдельные стадии технологического процесса, так и всю технологическую цепочку целиком — от заготовки до готового изделия.

Модуль *Simufact Forming Cold Forming* служит для моделирования процессов объёмной штамповки металлов, находящихся при температуре ниже температуры рекристаллизации.

### 3. CAD/CAM/CAE СИСТЕМЫ

---

Применение этого модуля позволяет избежать производственных дефектов (например, складкообразования), учесть все соответствующие граничные условия (включая подпружиненные инструменты), а также эффекты обратного пружинения и законы упруго-пластичного поведения материала.

Модуль *Simufact Forming Hot Forming* позволяет моделировать процессы объёмной штамповки металлов, находящихся при температуре выше температуры рекристаллизации. Использование двух методов (метод конечных элементов и метод конечных объёмов) позволяет рассчитать такие дефекты, как складкообразование, неполное заполнение, образование разрывов внутри изделия и другие. Для описания особенностей используемого оборудования существует возможность задания разнообразных кинематических условий, локальных систем координат, различных упругих связей.

Модуль *Simufact Forming Sheet Metal Forming* предназначен для моделирования процессов листовой штамповки, включая штамповку толстых листовых заготовок и полых цилиндров с умеренным изменением толщины стенки. Для моделирования толстых листовых изделий (например, детали автомобиля) используется конечно-элементный сеточный генератор, разбивающий геометрию на шестигранные элементы. Данный подход обеспечивает высокую точность при изменении толщины заготовки, внутренних и внешних радиусов, учёте обратного пружинения.

Модуль *Simufact Forming Rolling* предназначен для моделирования процессов листовой и объёмной прокатки (при любой температуре заготовки). Движение заготовки — поступательное или вращательное, количество валков неограниченно, тип кинематики процесса прокатки — любой.

*Simufact Forming Ring Rolling* служит для моделирования холодной и горячей кольцевой прокатки, как осевой, так и радиальной. Модуль включает специальный генератор конечно-элементных сеток для колец, что обеспечивает высокую точность определения краёв заготовки.

С использованием модуля *Simufact Forming Open Die Forging* реализуется моделирование любых видов свободной

### 3.5. SIMUFACT — ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ...

---

ковки (например, обжатия или радиальной ковки). Поддерживаются любые виды инструментов, движений заготовки, разные типы манипуляторов (рис. 3.8 и 3.9).

Модуль *Simufact Forming Heat Treatment* применяется для моделирования процессов термообработки с учётом фазовых превращений и прогнозирования свойств материалов.

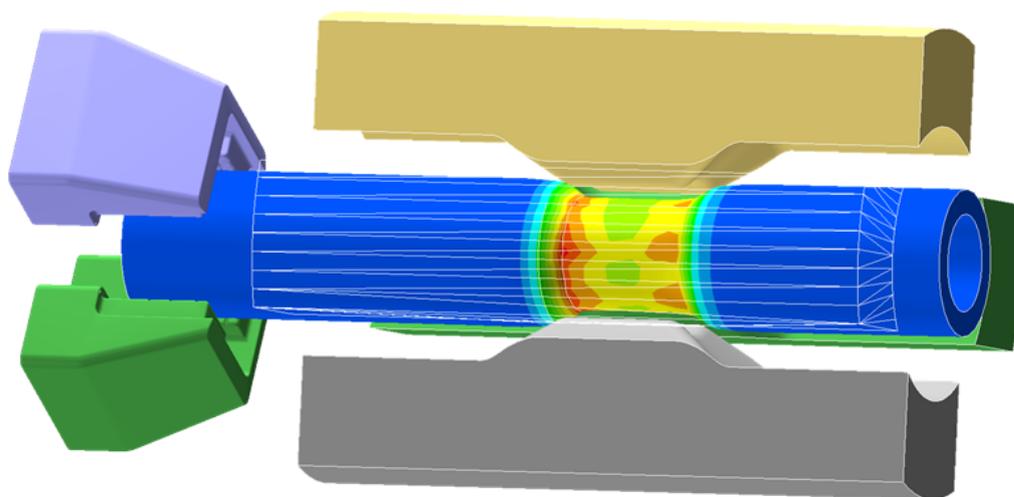


Рис. 3.8. Деформационное упрочнение в процессе радиальной ковки

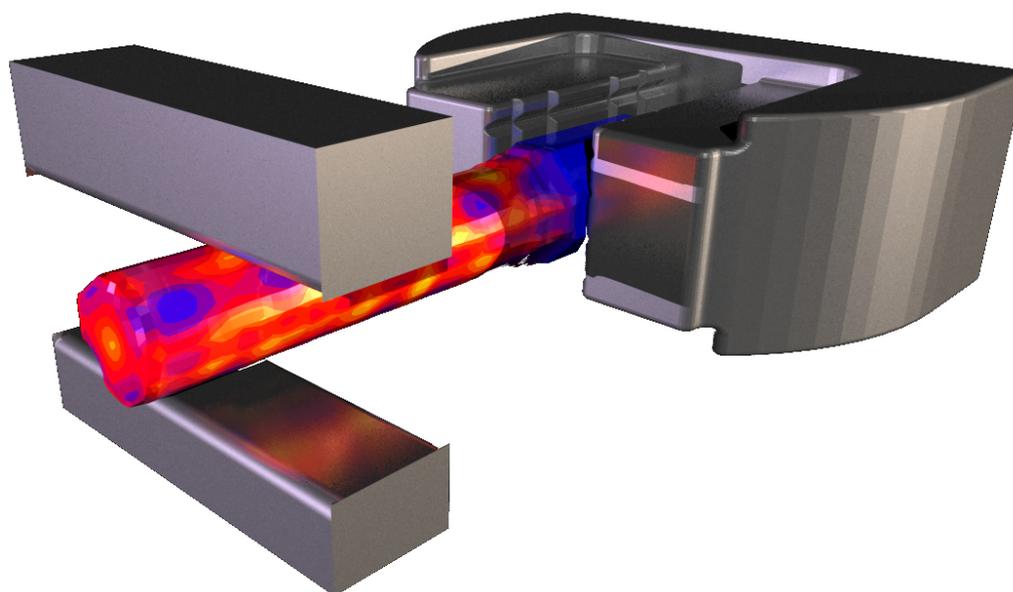


Рис. 3.9. Моделирование процесса ковки в Simufact Forming Open Die Forging

### 3. CAD/CAM/CAE СИСТЕМЫ

---

Модуль позволяет учесть все фазы процесса термообработки: нагрев, выдержка, закалка, направленное охлаждение.

*Simufact Forming Mechanical Joining* служит для моделирования процесса образования механических соединений деталей с помощью скобок и заклепок различных видов. Программный модуль позволяет исследовать поведение соединений под нагрузкой. Расчёты выполняются в трёхмерной постановке.

*Simufact Additive* — программный комплекс для моделирования процесса печати на 3D-принтерах деталей из металлов. *Simufact Additive* ориентирован на моделирование процессов расплавления материала в заранее сформированном слое (англ. *Powder Bed Fusion*), включая технологии селективного лазерного спекания, селективного лазерного плавления, электронно-лучевого плавления и ряд других. Технологии *Simufact Additive* охватывают основные цепочки производственных процессов, в том числе процесс печати, процесс горячего изостатического прессования, процесс термообработки для снятия внутренних напряжений, а также процесс обрезки и удаления опорной пластины и поддерживающей структуры.

*Simufact Additive* позволяет вычислить деформации детали и уменьшить или избежать искажения её формы, выбрать оптимальное направление печати, оптимизировать параметры поддерживающих структур, исследовать состояние детали после термической обработки, удаления опорной пластины и поддерживающей структуры, сократить затраты материалов и энергии в процессе производства, увеличить эффективность производства за счёт замены натуральных испытаний компьютерным моделированием. Использование систем моделирования технологических процессов является одним из ключевых аспектов организации цифрового производства [26].

---

# ЛИТЕРАТУРА

1. *Основы CALS-технологий в сфере бытовых машин и приборов: монография* / Першин В. А., Тихонова О. Б., Петров С. П., Русяков Д. В. — Шахты: ЮРГУЭС, 2010. — 108 с.

2. *Зырянов М.* PLM как философия и практика // Директор информ. службы. — 2010. — № 10. — С. 21–23.

3. *Краюшкин В. А., Лешихина И. Е., Пирогова М. А.* Система PLM — корпоративная информационная среда предприятия по автоматизации совокупности процессов проектирования, изготовления, сопровождения и утилизации изделия // Информ. технологии в проектировании и производстве. — 2010. — № 1. — С. 3–23. — Библиогр.: 4 назв.

4. *Transport Research & Innovation Portal* — [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.transport-research.info>, свободный. — Дата обращения: 21.04.2017 г.

5. *Гамидов Г. С., Гамидова Г. Г., Тенсаев А. Н.* CALS-технологии в задачах системного управления машиностроительными инновационными проектами // Инновации. — 2009. — № 2(124). — С. 96–101. — Библиогр.: 4 назв.

6. *Jones, A.* 1979. *The Object Model: A Conceptual Tool for Structuring Software. Operating Systems.* New York, NY: Springer-Verlag.

7. *ГОСТ Р ИСО 10303-22-2001*. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 22. Методы реализации. Стандартный интерфейс доступа к данным.

8. *ГОСТ Р ИСО 10303-21-99*. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 21. Методы реализации. Кодирование открытым текстом структуры обмена.

9. *ГОСТ Р ИСО 10303-49-2003*. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 49.

10. *ISO 10303*. Standard for the computer-interpretable representation and exchange of product manufacturing information.

11. *Системный подход к проектированию виртуальных производств в среде CALS-технологий* / Ветров С.И., Ковшов А.Н., Скворцов А.В. и др. // Справочник. Инж. журн. — 2010. — № 12(153). — С. 59–64. — Библиогр.: 9 назв.

12. *Информационные технологии в проектировании и производстве* / Зильбербург Л.И., Молочник В.И., Яблочников Е.И. // СПб: Политехника, 2008. 304 с.

13. *Алдошин В.М., Леманский Д.А.* Единое информационное пространство в структуре жизненного цикла сложной наукоемкой продукции // Информ. технологии в проектировании и производстве. — 2012. — № 1. — С. 14–19. — Библиогр.: 4 назв.

14. *Павельчук М.В.* Концептуальное проектирование изделия, выпускаемого НПП. Роль PDM-систем и ИПИ/CALS-технологий // Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM: сб. ст. IV междунар. науч.-практ. конф., апр. 2012. — Пенза: ПДЗ, 2012. — С. 38–42. — Библиогр.: 9 назв.

---

15. *Крысенков Д.* RFLP — современный подход к проектированию высокотехнологичных продуктов. — CAD/CAM/CAE Observer. — № 5(57). — 2010. — С. 29–32.

16. *Вязанкин А. С., Князев А. С., Липис А. В.* DELMIA — важнейший элемент PLM-решений Dassault Systèmes для судостроения // Журнал Rational Enterprise Management (Рациональное Управление Предприятием). — № 3. — 2011. — С. 58–60.

17. *Алёшина Е. Е., Саломатина А. А., Яблочников Е. И.* Создание имитационной модели сборочной линии с использованием системы Delmia // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2011. — № 1(71). — С. 50–53.

18. *Титов А. А., Филлинских А. Д.* Переход на 3D моделирование с точки зрения ИПИ-технологий // XIV Нижегород. сессия молодых ученых, Н. Новгород, 15–19 февр. 2009: техн. науки: [материалы]. — Н. Новгород: Гладкова О. В., 2009. — С. 49–50.

19. *Прилуцкий Д.* ENOVIA V6 — управление жизненным циклом изделия в настоящем и будущем // САПР и графика. — № 5. — 2011. — С. 54–57.

20. *Кананухина О. В., Степанов И. В.* Управление качеством жизненного цикла изделий на основе ИПИ-технологий // Изв. СПбГЭТУ (ЛЭТИ). — 2010. — № 3. — С. 66–72. — Библиогр.: 3 назв.

21. *Петрушин С. И.* Техноэкономика. Оптимизация жизненного цикла изделий машиностроения: монография. — Томск: ТПУ, 2010. — 139 с. — Библиогр.: 46 назв.

22. *Овсянников М. В., Шильников П. С.* Как нам реализовать ISO 10303 STEP // САПР и графика. — 1998. — № 7. — С. 73–80.

23. *Разин Е.В.* VERICUT — средство виртуального контроля УП для станков с ЧПУ // Rational Enterprise Management. — № 6. — 2007. — С. 52–55.

24. *Волков И.А.* Vericut — производственный комплекс на рабочем столе // САПР и графика. — № 4. — 2003. — С. 102–104.

25. *Яблочников Е.И., Брагинский В.А., Восоркин А.С.* Применение систем виртуального моделирования при выборе и проектировании полимерных композиционных материалов // Приборостроение. — 2012. — № 7. — С. 75–80.

26. *Голдовский А.П.* Цифровое производство — ключ к успеху // Rational Enterprise Management (Рациональное Управление Предприятием). — № 4. — 2009. — С. 54–56.

*Миссия университета* — генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

## **КАФЕДРА ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

Кафедра технологии приборостроения относится к числу ведущих кафедр института со дня его основания в 1931 году. Тогда она называлась кафедрой механической технологии и возглавлялась известным ученым в области разработки инструмента профессором А. П. Знаменским. Позже она была переименована в кафедру технологии приборостроения.

За время своего существования кафедра выпустила из стен института более двух тысяч квалифицированных инженеров, более сотни кандидатов и докторов наук. В разные годы ее возглавляли известные ученые и педагоги профессора Николай Павлович Соболев и Сергей Петрович Митрофанов. Кафедра имеет выдающиеся научные достижения.

Заслуженным деятелем науки и техники РСФСР, профессором С. П. Митрофановым были разработаны научные основы группового производства, за что он был удостоен Ленинской премии СССР. Методы группового производства с успехом применяются в промышленности и постоянно развиваются его учениками. Заслуженным изобретателем Российской Федерации Юрием Григорьевичем Шнейдером разработаны метод и инструментарий нанесения регулярного микрорельефа на функциональной поверхности.

В настоящее время кафедра осуществляет выпуск бакалавров по направлениям подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» и 12.03.01 «Приборостроение»; магистров по направлениям подготовки 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника» и 12.04.01 «Приборостроение».

Евгений Иванович Яблочников  
Андрей Александрович Грибовский  
Максим Яковлевич Афанасьев  
Дмитрий Дмитриевич Куликов

**Методы и системы ИПИ-технологий**  
**Учебное пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н. Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе



**Редакционно-издательский отдел  
Университета ИТМО  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49**