

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Металлургия и технологии обработки материалов»

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
для студентов специальности
1-42 80 01 «Инновационные технологии в металлургии»
дневной формы обучения**

Гомель 2023

УДК 621.7:004.414(075.8)
ББК 34.61-5-05я73
К63

*Рекомендовано научно-методическим советом
механико-технологического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 4 от 02.11.2021 г.)*

Составитель *В. А. Жаранов*

Рецензент: декан заочного факультета ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн. наук,
доц. *Ю. А. Рудченко*

Компьютерные технологии проектирования литейных и металлургических процессов : учеб.-метод. пособие для студентов специальности 1-42 80 01 «Инновационные технологии в металлургии» днев. формы обучения / сост. В. А. Жаранов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – 193 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Учебно-методическое пособие раскрывает теоретическое и практическое изучение обучающимися базовых разделов теории оптимизации сложных металлургических систем, освоение и применение современных средств математического моделирования литейных процессов.

Для студентов специальности 1-42 80 01 «Инновационные технологии в металлургии» дневной формы обучения.

УДК 621.7:004.414(075.8)
ББК 34.61-5-05я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ВЫБОР СПОСОБОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК.....	9
2 ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ	18
2.1. Технологии быстрого прототипирования. Обзор.....	19
2.2. Краткая историческая справка.....	20
2.3. Анализ аддитивных технологий.....	27
2.4. Технология послойного лазерного сплавления.....	43
2.5. Технология послойного электронно-лучевого синтеза и напыления.....	45
2.6. Технология послойного синтеза изделий ионным пучком.....	47
3. ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА	49
3.1 Коммуникационная роль трёхмерной модели изделия.....	49
3.2. Использование трёхмерных моделей на различных этапах жизненного цикла изделия	56
4. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОТОТИПЫ.....	58
4.1. Трёхмерное сканирование	58
4.2. Построение моделей изделий на основе трёхмерного сканирования (реверс-инжиниринг)	64
5. КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ	70
5.1. Выбор методики обмера элементов детали	72
5.2. Основные этапы создания программы измерения	78
6. КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В ОБЛАСТИ АНАЛИЗА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ МИКРОСТРУКТУРЫ СПЛАВОВ	82
7. НОВЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	104
8. КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ.....	122
8.1. Основные технологии CAD и CAE	123
8.2. Крупные компании в области CAD: линейки продуктов и тенденции в развитии.....	127
8.2.1. Dassault Systemes	127
8.2.2. Autodesk	130
8.2.3. Siemens PLM Software	133
8.2.4. PTC	135
8.3. Ведущие специализированные компании CAE.....	136
9. ГЕНЕРАТИВНЫЙ ДИЗАЙН В ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	141

10. РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА.....	161
10.1. Роль методов оптимизации в литейном производстве.....	162
10.2 Постановка и классификация задач оптимизации. Объекты оптимизации и критерии оптимальности	163
10.3. Методы решения задач оптимизации.....	167
10.4. Методы оптимизации, основанные на результатах производственного эксперимента	169
10.5. Применение систем математического моделирования для задач оптимизации в литейном производстве.....	170
10.6. Методы математического моделирования как передовой инструмент оптимизации технологии литейного производства	172
10.7. Оптимизация действующей технологии с применением СКМ ЛП.....	175
10.8. Обзор современных средств оптимизации в литейном производстве.....	177
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	184
ЛИТЕРАТУРА.....	190

ВВЕДЕНИЕ

Современные литейные технологии уже сейчас позволяют изготавливать отливки высокого качества весьма сложной конфигурации, практически не требующие дополнительной обработки. Однако затраты на их изготовление остаются ещё высокими. Применение наукоемких технологий, в частности систем компьютерного моделирования физико-химических процессов, происходящих во время формирования отливки, позволяет, с одной стороны, переходить к отливкам все более и более сложной формы, используя все большую номенклатуру сплавов, с другой стороны, сокращать затраты на отладку технологии, заменяя натуральный эксперимент вычислительным.

Компьютерное моделирование и оптимизация технологий, в том числе, и литейных технологий, является важным направлением развития программных продуктов компьютерного инженерного анализа – CAE – Computer Aided Engineering. Специализированное программное обеспечение ориентировано на эффективную работу инженера-технолога и позволяет имитировать технологические процессы виртуально. Компьютерная программа даёт возможность и опытному технологу, и начинающему инженеру проследить, что происходит при заполнении расплавом формы и в дальнейшем, – при охлаждении и затвердевании металла. Технолог, пользуясь CAE программой, выявляет дефекты различной природы в отливке на стадии проектирования, предлагает различные модификации в конструкции и технологии, сравнивает прогнозируемое качество отливки для предложенных модификаций и выбирает в итоге наиболее оптимальный вариант технологии и литниково-питающей системы.

Экономика приобретает инновационный характер вследствие инновационного развития в первую очередь сферы материального производства, в основе которого лежат технологии – «знание и умение» сделать что-либо: микросхему, программный продукт, автомобильную шину, лопатку турбины или медицинский препарат. Именно технологии в широком смысле – наличие или отсутствие их, определяют положение экономики страны в мире, её стратегические позиции. Наличие технологий даёт в руки учёному или конструктору мощные инструменты для реализации новых идей. Технологии позволяют применять новые высокоэффективные материалы, новые методы управления, и таким образом обуславливают новое функциональное и интеллектуальное содержание продукта. Отсутствие же технологий сковывает, ограничивает творческий потенциал учёного

или конструктора, вынуждает его применять те технические решения, которые есть в его распоряжении, а не те, которые требуются для достижения амбициозных целей. Поэтому сами технологии являются главным объектом инновационной деятельности.

В течение нескольких последних десятилетий мировая промышленность находится в состоянии постоянных изменений, обусловленных появлением новых и развитием существующих производственных и вычислительных технологий, появлением возможности анализировать и передавать большие объёмы данных с помощью сети Internet. Все эти процессы являются составными частями глобального явления, которое принято называть IV промышленной революцией. IV промышленная революция, согласно анализу ведущих мировых экспертов, коснётся практически всех сфер жизни человечества и приведёт к существенным изменениям в мировой экономике и в социальной сфере. Не является исключением и инженерно-конструкторская область, где, благодаря развитию вычислительных технологий, и вычислительных мощностей, а также появлению новых производственных технологий (в частности, технологий аддитивного производства) происходит постепенная смена парадигмы проектирования конструкций. Теперь, наряду с опытом генерального конструктора (а иногда, и вместо него), все большее значение при проектировании конструкций приобретает владение наукоёмкими инженерными технологиями.

Потребность в снижении массы изделий, экономии материала, а также повышении эксплуатационных характеристик изделий приводит к увеличению сложности деталей. Одним из способов снижения массы узлов является уменьшение количества отдельных деталей и элементов их соединения, однако такие конструкции зачастую обладают большей сложной конфигурацией, что приводит к особым требованиям, предъявляемым к технологиям производства подобных изделий.

Аддитивный подход позволяет создавать уникальные изделия с внутренней полой структурой, например, теплообменники со сложной системой каналов охлаждения любой формы, литейная оснастка для создания корпусов новых двигателей и насосов, фильтрующие элементы с сетчатой структурой, размер ячеек которой определяется размером гранул порошкового материала и пр.

При разработке и создании новой промышленной продукции особое значение имеет скорость прохождения этапов разработки, ко-

торая в свою очередь существенно зависит от технологических возможностей производства. В частности, это касается изготовления литейных деталей, которые часто являются самой трудоёмкой и дорогостоящей частью общего проекта. При создании новой продукции, особенно на этапе опытно-конструкторских работ (ОКР), для которого характерны вариантные исследования, необходимость частых изменений конструкции и, как следствие, постоянной коррекции технологической оснастки для изготовления опытных образцов, проблема быстрого изготовления литейных деталей становится ключевой.

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

1 ВЫБОР СПОСОБОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК

Выбор заготовок всегда сложная и трудная задача. Заготовка должна обеспечить высокое качество изготавливаемой детали и при этом стоимость её изготовления должна быть минимальной. Необходимо учитывать и сроки изготовления заготовки. Оценкой экономической эффективности применения того или иного способа изготовления заготовки являются следующие критерии: себестоимость, качество и сроки изготовления детали. Оценку целесообразности выбора способа изготовления заготовок, следует проводить с учётом множества факторов. Рассматривать достоинства и недостатки каждого способа изготовления заготовки. Максимальное приближение по размерам и форме заготовки к форме и геометрическим размерам детали не всегда является оптимальным вариантом. Сложность выбора рациональной заготовки заключается также в том, что конструкторам и технологам приходится принимать решение о выборе варианта изготовления заготовки, когда они не располагают необходимой исходной информацией, но при этом должен быть выбран предпочтительный вариант конструкторского изделия или технологического процесса, который будет разрабатываться для внедрения в производство. Следовательно, уже на стадии проектирования детали необходимо проводить технико-экономический анализ изготовления заготовки.

При выборе заготовок используются термины «метод» изготовления заготовки и «способ» изготовления заготовки. Под термином «метод» понимается группа технологических процессов, в основе которых лежит единый принцип формообразования. Например, метод обработки металлов давлением, метод изготовления заготовок литьём, метод изготовления заготовок сваркой, а также комбинация этих методов. Каждый метод содержит большое количество способов изготовления заготовок. При выборе метода изготовления заготовок основную роль играет материал детали и требования к материалу детали с учётом обеспечения эксплуатационных свойств детали. Методика выбора метода и способа заготовки представлена на рисунке 1.

Основные факторы, влияющие на рациональный выбор заготовок. Конструктор, проектируя деталь, исходя из соображений надёжности, прочности, ресурса, назначает материал детали и тем самым в значительной степени предопределяет метод или способ изготовления заготовки. Исходная информация в виде чертежа детали, технических требований на деталь, марки материала являются одним

из важных параметров выбора способа изготовления заготовки, т. е. конструкторским фактором выбора заготовки.

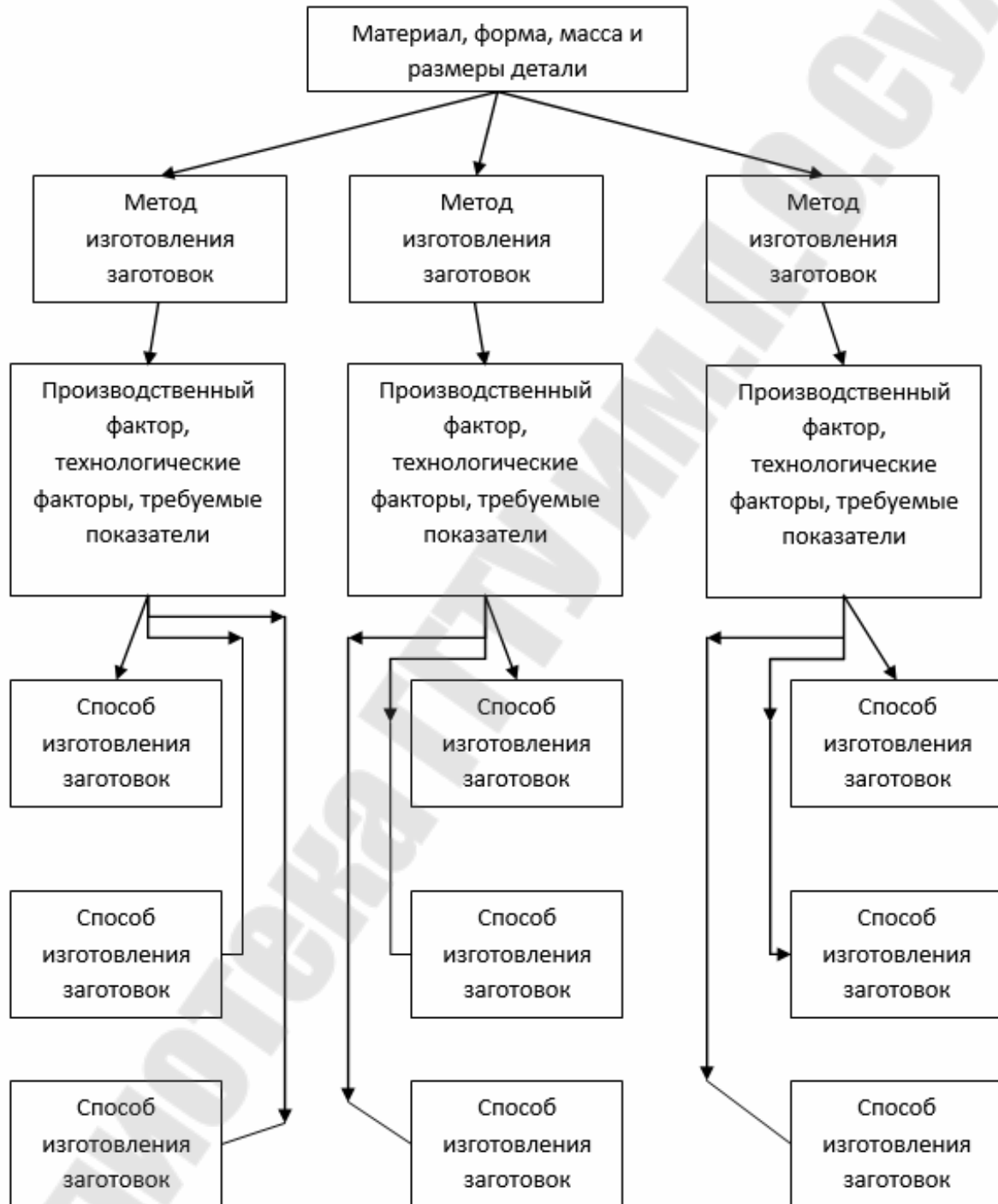


Рис. 1. Схема оптимального выбора заготовок

Проектируя деталь для конкретного производства, конструктор учитывает характер, культуру, технологическую оснащённость производства. Для вновь создаваемой продукции и вновь создаваемого производства, конструктор принимает во внимание современные методы и способы изготовления заготовок. Таким образом, производственный фактор является также важным фактором при выборе заготовок.

На выбор заготовки, кроме материала, влияют оборудование и технологические процессы их изготовления, т. е. технологический фактор. Технологический фактор выбора заготовок подразделяется на ряд параметров, определяющих, выбор заготовок.

К таким параметрам относятся характер производства, технологические свойства материалов, размеры, масса и конфигурация детали, возможности имеющегося оборудования.

Характер производства. Для мелкосерийного и единичного производств целесообразно использовать заготовки, изготавливаемые с помощью универсального инструмента или с минимальными затратами на его изготовление.

В качестве заготовок рекомендуется прокат, заготовки, полученные ковкой, заготовки полученные литьём в песчано-глинистые формы, сварные заготовки. Заготовки имеют значительные припуски на механическую обработку и большие допускаемые отклонения размеров заготовок. Но в этом случае затраты на материал и на механическую обработку деталей ниже затрат на изготовление специального инструмента, который требуется для изготовления заготовок, максимально приближенных по форме и размерам к готовой детали. Однако и для мелкосерийного и единичного производств необходимо применять оптимальный вид заготовки, с целью уменьшения припусков на последующую механическую обработку. Для этих целей при ковке можно использовать простые подкладные штампы, проводить операции прошивки отверстий, раскатки кольцевых заготовок с помощью универсального инструмента. Выбирать прокат, максимально приближенный к готовой детали.

В условиях крупносерийного и массового производств экономически оправдано применение заготовок, изготовленных с помощью специального инструмента и, как правило, максимально приближенные по форме и геометрическим размерам к готовой детали. Затраты на изготовление специального инструмента, например штампов для деформированных заготовок или специальные форм для способов

точного литья, оправданы снижением стоимости материала на изготовление детали и снижением затрат на механическую обработку деталей.

При любом характере производства необходимо проводить технико-экономический анализ выбора типа заготовок по критерию себестоимости. При этом учитывать и стоимость изготовления инструмента, его стойкость, а также другие параметры.

Технологические свойства материалов. Основные тенденции современного машиностроения – это применение материалов, которые обеспечивают конструктивные и эксплуатационные свойства (качество, прочность, надёжность, ресурс и т. д.), при этом не всегда принимаются во внимание их технологические свойства – штампуемость, жидкотекучесть, свариваемость, обрабатываемость, в значительной мере влияющие на выбор заготовок. При выборе способа изготовления заготовок всегда необходимо учитывать технологические свойства.

Чем ниже пластичность, тем сложнее получить качественную заготовку способом горячего, и тем более, холодного деформирования. Например, при изготовлении заготовок из трудно деформируемых материалов необходимо учитывать небольшую степень деформации, узкий температурный интервал деформирования, что приводит к дополнительным нагревам при штамповке и соответственно к увеличению себестоимости. Для заготовок из таких материалов очень важно правильно назначить технологические приёмы их изготовления. Используются следующие приёмы: фасонирование исходных заготовок под последующую штамповку, предварительная штамповка заготовок и другие способы.

Если литейный материал обладает пониженными литейными свойствами, то не рекомендуется его применять при литье в кокиль или литье под давлением, так как из-за низкой податливости металлических форм в отливках возникают литейные напряжения, которые приводят к короблению заготовок. Сплавы склонные к ликвации не применяются для заготовок, изготавливаемых центробежным литьём. Литые заготовки из жаропрочных материалов, склонные к окислению, необходимо изготавливать в вакуумных плавильно-заливочных установках.

В технических условиях для ответственных, нагруженных деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, специальных средах (валы, диски и лопатки турбин и компрессоров, детали зубча-

тых соединений) указываются требования к качеству материалов и к механическим, а иногда и к эксплуатационным свойствам. Для подобных деталей целесообразно, как правило, применять кованные или штампованные заготовки, которые обладают повышенными механическими свойствами. Но при этом необходимо учитывать, что заготовки из сложнолегированных материалов, например, жаропрочных сплавов на никелевой или кобальтовой основе, получить штамповкой с минимальными припусками на механическую обработку, практически, очень трудно, а иногда и невозможно. В подобных случаях целесообразно применять литые заготовки, используя специальные приёмы, например литьё по выплавляемым моделям с направленной или монокристаллической структурой, что позволяет получать заготовки с высокими прочностными и эксплуатационными свойствами. Размеры и масса детали в ряде случаев играют решающую роль в выборе заготовок. Так для многих специальных способов литья (литьё под давлением, литьё в кокиль, литьё по выплавляемым моделям) размеры заготовок ограничены техническими возможностями применяемого оборудования и инструмента. Ограничены техническими возможностями по размерам и массе изготовление заготовок способом горячей объёмной штамповки. Для крупногабаритных заготовок в этих случаях применяют кованные заготовки или заготовки, получаемые литьём в песчано-глинистые формы.

На выбор заготовок влияет и конфигурация детали. Такие способы изготовления заготовок, как горячая штамповка, литьё в кокиль, центробежное литьё имеют ограничения по форме детали. Для указанных способов применяют, как правило, литые заготовки сравнительно простой формы. Практически, не имеют ограничений по конфигурации заготовки, получаемые литьём в песчано-глинистые формы, литьём по выплавляемым моделям, литьём под давлением, сваркой.

Использование точных способов получения деформированных заготовок таких, как калибровка штампованных заготовок, холодное выдавливание, обеспечивают высокую чистоту поверхности без последующей механической обработки и получение готовых деталей (болты, гайки, заклёпки). Большинство способов специального литья (литьё в кокиль, оболочковые формы, литьё под давлением, выплавляемым моделям, жидкая штамповка и др.) также позволяют получать точные заготовки без механической обработки по несопрягаемым поверхностям.

Возможности имеющегося оборудования при выборе заготовок следует учитывать для таких способов, как центробежное литьё, литьё под давлением, горячая объёмная штамповка. Особенно важно правильно выбирать способ изготовления заготовок при наличии различного оборудования, позволяющего получать практически одинаковые заготовки.

Например, штампованную заготовку можно изготовить на паровоздушном молоте, кривошипном горячештамповочном прессе или на электровинтовом прессе. Стоимость эксплуатации паровоздушного молота значительно ниже стоимости эксплуатации прессы, но полученная заготовка будет иметь значительное смещение формы, из-за смещения штампов и увеличенные размеры припусков на механическую обработку. Стоимость эксплуатации кривошипного горячештамповочного прессы выше стоимости эксплуатации паровоздушного молота, но изготовленная заготовка будет более точной, соответственно меньше припуски на механическую обработку. Стоимость эксплуатации электровинтового прессы выше стоимости кривошипного горячештамповочного прессы, но полученная заготовка не требует калибровки, а для заготовок с повышенными требованиями по точности калибровку можно выполнить на том же прессе. В этом случае необходимо выполнить технико-экономический анализ рационального выбора заготовки.

На практике вопрос рационального выбора заготовок возникает в следующих ситуациях. Первая ситуация, когда конструктор и технолог свободны от требований действующего производства и перед ними ставится задача выбрать из ряда равноценных вариантов изготовления заготовок, выбрать оптимальный и с учётом его особенностей спроектировать деталь. Во второй ситуации перед конструктором и технологом ставится задача заменить действующий процесс более рациональным. В первом случае задача решается выбором способа изготовления заготовки путём сравнения способов по всем технико-экономическим показателям. Во втором случае показателем выбора способа заготовки является полученная экономия себестоимости изготовления детали за счёт внедрения нового процесса.

Основные положения по выбору способа литья. Применение литых заготовок обусловлено следующими достоинствами данного метода:

– получение заготовок практически любой формы, размеров и массы;

– снижение объёма механической обработки при изготовлении деталей;

– изготовление заготовок, за исключением некоторых способов, с высокими коэффициентами использования заготовок и использования материалов;

– изготовление заготовок из сплавов, которые не поддаются пластическому деформированию и из трудно обрабатываемых материалов.

Несмотря на различие способов изготовления литых заготовок общим для данного метода являются: получение жидкого расплава, изготовление формы и заливка расплава в форму.

Изготовление отливок различается множеством способов, в зависимости от размеров, массы, свойств, точности и характера производства заготовок.

Одним из основных показателей рационального выбора способа литья является себестоимость детали, которая в большой степени зависит от стоимости металла. Поэтому при выборе способа литья необходимо рассматривать вопрос об экономии металла. Металлоёмкость литых заготовок зависит от конструктивных и технологических мероприятий, обеспечивающих снижение массы за счёт повышения их прочностных свойств. За счёт изменения конструкции путём образования выемок, изменения толщины стенок, применения коробчатых и тавровых сечений можно значительно снизить расход металла. Применение рациональных радиусов сопряжений, введение рёбер жёсткости позволяет исключить концентраторы напряжений в отливках и увеличить прочностные свойства. При выборе способа литья необходимо внимательно учитывать эксплуатационные требования и в ряде случаев, возможно, заменить дорогостоящие материалы на менее дорогостоящие материалы. Например, отливки из стали в ряде случаев можно заменить высокопрочным, модифицированным чугуном.

Основные факторы, которые необходимо учитывать при сравнении различных способов литья.

1. Для получения качественных отливок в первую очередь необходимо учитывать технологические свойства сплава (жидкотекучесть, склонность к усадочной и газовой пористости, к ликвации и т. д.). Если сплав обладает пониженной жидкотекучестью, то нежелательно применение литья в металлические формы. Жидкотекучесть повышается при литье под давлением, центробежном, по выплавляемым моделям, штамповке жидкого металла. Если сплав имеет высокую

склонность к усадке, нежелательно применение литья в металлические формы, так как возможно образование трещин из-за низкой податливости формы. Не рекомендуется также применять сплавы склонные к усадке и для получения отливок литьём под давлением, так как повышается трудоёмкость изготовления отливки из-за сложности установки прибылей, усложнения пресс-формы.

2. Способ изготовления литых заготовок должен исключать дефекты литейного происхождения, обеспечивать возможность получения мелкозернистой структуры и соответственно обеспечить высокие механические свойства.

3. При выборе способа изготовления заготовок необходимо учитывать технологичность конструкции детали применительно к каждому из рассматриваемых способов.

Тонкостенные сложные по форме конструкции отливки можно получить литьём по выплавляемым моделям и литьём под давлением. Сложные по форме отливки можно получить литьём в песчано – глинистые формы. При литье в кокиль форма отливки по возможности должна быть простой, центробежный способ литья в основном применяют для отливок тел вращения и отливок с пониженной жидкотекучестью (например, титановых). Необходимо учитывать толщину стенок. Наиболее тонкие стенки отливок можно получить литьём по выплавляемым моделям. При литье в кокиль стенки отливок должны быть более толстые, чем при литье песчано – глинистые формы.

4. При выборе способа нужно учитывать форму, размеры и массу деталей. При литье в песчано – глинистые формы форма, размеры и масса отливок практически не ограничены.

Для повышения точности и чистоты поверхностей, мелких и средних по массе отливок, целесообразно применять специальные способы литья.

5. Специальные способы литья целесообразно применять при крупносерийном и массовом производствах, только в этих случаях окупаются затраты на изготовление оснастки, за счёт снижения объёма механической обработки заготовок.

6. При выборе способа литья необходимо учитывать и качество металла в отливках (наличие дефектов литейного происхождения, плотность, механические свойства и т. д.). Наиболее качественный металл получают при штамповке жидкого металла, при центробежном литье и при литье в кокиль. При выборе способа изготовления литых заготовок необходимо учитывать возможности имеющегося

оборудования, уровень литейной технологии и технологии механической обработки.

К металлам и сплавам, используемым при изготовлении отливок, предъявляются следующие требования:

1. состав их должен обеспечивать получение в отливке заданных физико-механических и физико-химических свойств;
2. свойства и структура должны быть стабильными в течение всего срока эксплуатации отливки;
3. отливки должны обладать хорошими литейными свойствами (высокой жидкотекучестью, небольшой усадкой, низкой склонностью к образованию трещин и поглощению газов, герметичностью), хорошо свариваться;
4. отливки должны легко обрабатываться режущим инструментом;
5. не должны быть токсичными и вредными для производства;
6. необходимо, чтобы они обеспечивали технологичность в условиях производства и были экономичными, содержали дешёвые недефицитные материалы.

В условиях реального производства удовлетворить перечисленные требования являются трудной, а подчас и невыполнимой задачей. Поэтому при выборе сплава следует руководствоваться одним или группой требований, которым подчиняются другие, второстепенные для данных условий.

Литейные сплавы должны удовлетворять эксплуатационным требованиям, т. е. обладать достаточными прочностью, твёрдостью, пластичностью, малой хрупкостью, высокой ударной вязкостью, а также, обладать особыми физическими и физико-механическими свойствами: электропроводностью, магнитной проницаемостью, жаростойкостью и т. д. Это вынуждает применять большое количество различных сплавов.

Наибольшее количество фасонных отливок изготавливают из сплавов на основе железа (стали и чугуны), меди (бронзы и латуни), алюминия, магния и титана. Используются также сплавы на основе никеля, цинка, кобальта, свинца и олова. Однако не все сплавы пригодны для получения фасонных отливок. Получить сложные, качественные, тонкостенные отливки без литейных дефектов можно из сплавов с удовлетворительными литейными свойствами.

2. ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

При разработке нового изделия обязательным этапом является разработка или виртуального, или физического прототипа. Во многих отраслях экономики недостаточно наличие только виртуальной, т. е. компьютерной модели, т. к. зачастую следует решать проблемы, решение которых только с помощью компьютерных моделей невозможно. Среди важнейших задач, которые решаются с помощью прототипов – это оптимизация геометрической формы изделия, осуществляемая по результатам натуральных экспериментов; собираемость многокомпонентного узла; оценка внешнего вида изделия. Исторически, различные технологии, позволяющие быстро с наименьшими затратами создавать макет или прототип стали называть технологиями быстрого прототипирования (RP – rapid prototyping). Однако, в последнее время наибольшее распространение получили аддитивные технологии, т. е. технологии послойного синтеза прототипа по компьютерной модели. Поэтому в настоящее время технологии быстрого прототипирования и аддитивные технологии считают терминами аналогами. Прототип позволяет не только оценить внешний вид изделия и проверить элементы конструкции, а также провести необходимые испытания или изготовить модель для литья и т. д. Использование RP-технологий позволяет до 80 % сократить сроки подготовки производства, исключить малоэффективный путь изготовления опытных образцов.

Построение прототипа осуществляется на основе компьютерной твердотельной модели или модели с замкнутыми поверхностными контурами. Модель разбивается на тонкие слои в поперечном сечении с толщиной слоя, равной разрешающей способности оборудования. При разбиении модели на слои может быть учтён припуск на механическую обработку. После послойного представления компьютерной модели также послойно осуществляется построение детали.

Принципиальная схема всех установок прототипирования одинакова: первый слой детали печатается при некотором начальном положении рабочего стола – элеватора установки, наносится слой материала, воспроизводящий первое сечение изделия; затем элеватор смещается вниз на один шаг и наносится следующий слой. Таким образом, слой за слоем воспроизводится сечение модели требуемого изделия. При нанесении отдельных слоёв может оказаться, что элементы сечения должны «повиснуть» в воздухе. Для исключения этой ситуации при предварительной подготовке компьютерной послойной

модели, в ней строится система поддержек для каждого слоя (если это необходимо), алгоритм построения таких поддержек индивидуален для каждой технологии прототипирования.

Основным различием между технологиями прототипирования является основной прототипирующий материал, а также способ его нанесения. В мире существует несколько десятков компаний, изготавливающих RP-установки, они постоянно совершенствуют технологию и разрабатывают новые материалы.

Методы аддитивного производства считаются альтернативным существующим традиционным субтрактивным методам обработки, таким как механические, электрофизические и электрохимические методы обработки и пр. В отличие от классического формообразования, где от заготовки «отрезается» все лишнее при изготовлении детали, с использованием технологий аддитивного производства деталь «выращивается» из предварительно подготовленного порошкового материала, частицы которого послойно скрепляются между собой в каждом слое, а слои скрепляются между собой. Применение аддитивных технологий во многих случаях обеспечивают большую свободу в выборе конфигурации изделия, что позволяет оптимизировать массовые и функциональные параметры детали за счёт использования сложных и иных сложных конструкций, уменьшения толщины стенок, а также объединения нескольких деталей и изготовления их как единое целое.

Интерес к аддитивным технологиям, «непосредственному выращиванию» металлических изделий, в качестве альтернативы традиционным технологическим методам для производства товарной продукции возник в авиации, космической индустрии и энергетическом машиностроении. Мотивацией являлась экономическая целесообразность. Аддитивные технологии в ряде случаев оказываются менее дорогостоящими, чем традиционные технологии, а также предлагают новые возможности при производстве изделий. Например, возможно изготовление деталей или пресс-форм сложной формы, с каналами охлаждения произвольной конфигурации, что невозможно сделать при обычных методах механообработки.

2.1. Технологии быстрого прототипирования. Обзор

Под технологиями быстрого прототипирования понимаются технологии послойного построения физической модели (прототипа) в соответствии с геометрией CAD-модели. Существует большое разнообразие технологий быстрого прототипирования. Основным отличии-

ем этих технологий от традиционных является создание модели не отделением материала от заготовки, а послойным наращиванием материала, с учётом внутренних поверхностей и даже подвижных частей. По сравнению с традиционными технологиями RP – технологии полностью автоматизированы и позволяют получать модели с существенно малой себестоимостью. Длительность их изготовления в большинстве случаев на несколько порядков меньше, чем при использовании традиционных технологий.

Прототипы, выполненные при использовании RP – технологий, изготавливают из различных материалов: из специальных порошков, жидких смол, воска, пластиков, различных листовых материалов, металлических сплавов.

Основные преимущества RP – технологии:

- отсутствует необходимость в разработке традиционного технологического процесса, т. к. наличие компьютерной модели детали достаточно для генерации её поперечных сечений;
- отсутствует необходимость в выборе или конструировании средств технологического оснащения процесса изготовления прототипа;
- отсутствует необходимость в проектировании и создании специального инструмента.

2.2. Краткая историческая справка

История аддитивного производства насчитывает 150 лет, уходя корнями в такие области, как *фотоскульптура* и *топография*.

Фотоскульптура (Photosculpture) была предложена *François Willème* в 1890 г. Суть её состояла в следующем: вокруг объекта или субъекта располагали фотокамеры, на которые и производили одномоментное фотографирование. Затем каждое изображение проецировали на полупрозрачный экран, и оператор с помощью пантографа обрисовывал контур. Пантограф был связан с режущим инструментом, который удалял модельный материал – глину – в соответствии с профилем текущего контура.

Для уменьшения трудоёмкости процесса *Carlo Baese* в 1904 г. предложил использовать фоточувствительный желатин, который при обработке водой расширялся в зависимости от степени засветки – экспозиции.

Способ изготовления топографических макетов – 3-х мерных карт поверхности местности был предложен *Josef E. Blather* в 1890 г. Суть метода заключалась в следующем: из тонких восковых пластин

по контурным линиям топографической карты вырезались фрагменты, соответствующие воображаемому горизонтальному сечению объекта, затем эти пластины укладывались друг на друга в определённом порядке и склеивались. Получался «послойный синтез» холма или оврага. После этого поверх полученных фигур накладывали бумагу и формировали макет отдельного элемента ландшафта, который затем уже в «бумажном» виде располагали в соответствии с исходной картой.

В 1935 г. *Isao Morioka* предложил способ, сочетающий в себе топографию и фотоскульптуру. Этот способ предполагал использование структурированного света (сочетание чёрных и белых полос) для создания топографической «карты» объекта – набора контуров. Контурные вырезались из листового материала, укладывались в определённом порядке, так формировался трёхмерный образ объекта. Или же, как и у *François Willème*, контуры могли быть спроецированы на экран для дальнейшего создания трёхмерного образа с помощью режущего инструмента.

У истоков современного аддитивного производства одним из наиболее известных методов которого служит стереолитография (SL, от англ. *stereolithography*), стоит подход, предложенный в 1951 г. *Otto Munz*. Система Munz использовала поршневой механизм для последовательной избирательной засветки и отвердевания фотополимера по сечениям сканируемого объекта.

В 1977 г. *Wyn Kelly Swainson* предложил способ получения трёхмерных объектов посредством отверждения фоточувствительного полимера в точке пересечения двух лазерных лучей. Примерно в это же время начинают появляться технологии послойного синтеза из порошковых материалов.

Способ формирования тонкого слоя порошкового материала путём нанесения его на плоскую платформу был предложен в 1981 г. *R.F. Housholder*. После нанесения слоя порошкового материала производилось разравнивание его до определённой величины с последующим спеканием.

В том же году появились результаты работы *Hideo Kodama* с первых функциональных систем фотополимеризации с помощью ультрафиолетовой (УФ) лампы и лазера. В 1982 г. *A.J. Herbert* опубликовал работу по созданию трёхмерных моделей с помощью X–V-плоттера, УФ-лампы и системы зеркал.

Процесс патентования новых технических решений по *AF*-технологиям приобрёл лавинообразный характер.

В середине 1980-х гг. *Charles W. Hull* (Чарлз Халл) экспериментировал с УФ-отверждаемыми материалами, подвергая их лазерному сканированию, которое аналогично системе, применяемой в лазерных принтерах. Он обнаружил, что можно производить твёрдые полимерные структуры. Путём отвержения последующего слоя над предыдущим слоем ему удалось изготовить трёхмерный твёрдый объект.

В 1986 г. *Charles W. Hull* предложил способ послойного синтеза с использованием ультрафиолетового излучения, сфокусированного на тонкий слой фотополимерной смолы. Он же и ввёл в оборот термин «*стереолитография*».

Именно патент Чарлза Халла признан наиболее влиятельной работой, поскольку она привлекла к созданию компании 3D Systems – компании, первой приступившей к коммерческой деятельности в области послойного синтеза (1986 г.).

В 1984 г. почти одновременно были поданы патенты в Европе (Франции), США и Азии (Япония). В первые годы большинство новаторских и коммерчески успешных систем разрабатывались в США. Такие компании, как *Stratasys*, *3D system* и *ZCorp*, возглавили этот прорыв. Но и за пределами США также появилось множество новых компаний.

Примерно в то же время были разработаны методы аддитивного производства с использованием нагрева лазерным и электронным лучом. Эти методы были внедрены в производство в 1990-х гг., позволив использовать аддитивные технологии для изготовления металлических объектов.

Карл Декарт получил патент в 1989 г., он изобрёл технологию избирательного (селективного) лазерного спекания (SLS). В этом же году на имя Скотта Крампа, соучредителя компании *Stratasys Inc.*, была зарегистрирована заявка на выдачу патента на технологию послойного наплавления (FDM). Крамп получил патент в 1992 г., сегодня эта технология широко применяется в простых бытовых моделях 3D принтеров.

Но далеко не все разработки 3D технологий проводились в США. Ханс Лангер основал в 1989 г. в Германии компанию *EOS GmbH*, выпустившую первый 3D принтер «*Stereos*» в 1990 г. Компания занялась развитием технологии лазерного спекания, включая прямое лазерное спекание металлов (DMLS).

Практическое применение эта идея нашла в *LOM-технологии* – *Lamination Object Manufacturing* – послойном ламинировании или склеивании тонких листовых материалов, толщина листов при этом составляет 0,051–0,25 мм.

В 1979 г. профессор Nakagawa из Токийского университета предложил использовать эту технологию для быстрого изготовления пресс-форм, в частности, со сложной геометрией охлаждающих каналов.

Согласно отчёту Королевской инженерной академии наук Великобритании за 2013 г., скачок в развитие технологий АП произошёл в 2009 г., когда истёк срок действия одного из ключевых патентов. Этот патент касался метода изготовления объектов путём послойной наплавки (FDM, *fused deposition modelling*) и описывал выдавливание (экструзию) пластиковой нити, формирующей готовую деталь, с поддерживающей структурой из дополнительных материалов.

Истечение срока действия патента сделало возможным радикальное (вплоть до 90 %) снижение цен на системы 3D – печати. Это не только открыло рынок 3D-печати для широкого круга потребителей, но и заставило многих производителей и инвесторов пересмотреть своё отношение к АП и связанным с ним возможностям, проблемам и рискам.

Представители авиационно-космической промышленности, автомобилестроения, и даже архитекторы и строители увидели в АП перспективный инструмент для решения своих задач.

С этого момента началась новая эпоха в индустрии – эпоха АФ-технологий.

В настоящее время известно около ста разновидностей технологий быстрого прототипирования. Однако их можно кластеризовать или классифицировать по некоторым признакам выделив несколько основных направлений. На сегодняшний день нет устоявшейся классификации – принимаются различные признаки, в соответствии с которыми невозможно построить инвариантную классификацию для всех RP – технологий. Поэтому в данном пособии будет использована классификация RP – технологий, которая позволит рассмотреть основные RP – технологии, используемые в машиностроении. Таким образом, по физическому принципу действия RP – технологии можно объединить в четыре группы: технологии на основе экструзии, технологии на основе гранулирования, технологии на основе ламинирования и технологии на основе фотополимеризации.

Общетехническим понятием под экструзией понимается технологическая операция, при помощи которой изготавливают полые детали различной формы из различных материалов путём выдавливания при оптимальной температуре.

Несмотря на то, что в технике под гранулированием понимают процесс образования из расплавов или порошков отдельных твёрдых частиц в виде гранул, в технологиях быстрого прототипирования при использовании в классификации технологий этого термина понимают наоборот процесс спекания или сплавления из гранул.

Ламинирование – технология склеивание двух или более гибких материалов для получения слоистых материалов.

Фотополимеризация – изменение физико-химических свойств жидких и твёрдых фотополимеризующихся материалов под воздействием света или лазерного излучения.

Для иллюстрации неоднозначности существующих принципов классификации RP – технологий можно привести ещё один признак классификации «использование тепловых процессов». Согласно этому признаку, отдельные технологии из ранее описанной классификации, принадлежащие различным группам, объединяются в этой группе – в этом и заключается отсутствие инвариантности классификации RP – технологий на сегодняшний день.

Все технологии быстрого прототипирования были созданы за рубежом, поэтому имеют англоязычную аббревиатуру. Ниже для каждой из четырёх групп технологий приведено наименование наиболее распространённых RP – технологий.

Технологии на основе экструзии: FDM, DODJet, EBM, MJM.

FDM (Fused Deposition Modeling) – послойное наложение расплавленной полимерной нити.

EBM (Electron Beam Melting) – электронно-лучевая плавка.

DODJet (Drop-On-Demand-Jet) – построение модели путём напыления капель нагретого материала и последующего фрезерования расплывлённого слоя. В отдельных источниках эту технологию и FDM-технологию относят к разновидностям струйной технологии.

MJM (Multi – Jet Modelling) – многоструйная экструзия, эту технологию также относят к технологии трёхмерной струйной печати.

Технологии на основе гранулирования: SHS, SLS, 3DP. (SLM) DMLS, SHS (Selective Heat Sintering) – выборочное тепловое спекание.

SLS (Selective Laser Sintering – выборочное лазерное спекание порошковых материалов.

DMLS (Direct Metal Laser Sintering) – прямое металлическое лазерное спекание.

3DP (3D printing) – трёхмерная печать.

Технологии на основе ламинирования: LOM.

LOM (Laminated Object Manufacturing) – послойное склеивание плёночных материалов.

Технологии на основе фотополимеризации: SLA, SGC, DLP, MJM, PolyJet, PolyJetMatrix.

SLA (Stereo Lithography Apparatus) – стереолитография, облучение ультрафиолетовым лазером.

SGC (Solid Ground Curing) – облучение ультрафиолетовой лампой через фотомаску.

MJM (Multi Jet Modelling) – многоструйное распыление.

DLP (Digital Light Processing) – метод цифровой обработки света. PolyJet – технология послойного нанесения фотополимерных материалов на платформу с ультратонким слоем толщиной 16 мкм (распыление головкой каплеь смолы и засветка УФ-лампами).

PolyJetMatrix – технология, использующая несколько различных типов модельных материалов одновременно.

Первая аддитивная технология была предложена в 1984 Чарльзом Халлом (США) – стереолитография или SLA-технология для печати физических трёхмерных объектов по цифровым моделям из фотополимеризующейся композиции (ФПК).

Основателем LOM – технологий считается Михаил Фейген, который в 1985 году предложил послойно формировать объёмные модели из листового материала (плёнок, полиэстера, композитов, пластика и бумаги).

В 1986 году была запатентована SLA-технология, разработанная в 1984 году. В этом же году Чарльз Халл основал компанию 3D Systems и разработал первый коммерческую установку для стереолитографии. В этом же году доктора Карл Декарт и Джо Биман в Университете штата Техас в Остине разработали и запатентовали SLS – технологию.

В 1987 году израильской компанией Cubital была разработана SGC – технология.

В 1988 году компанией 3D Systems разработала модель SLA-250, которая была запущена в серийное производство для широ-

кого круга пользователей. В этом же году Скотт Крамп изобрёл FDM – технологию. В следующем 1989 году Скотт Крамп основал компанию Stratasys. А в 1991 году этой компанией был выпущен первый 3D-принтер серии Dimension с экструдированной печатающей головкой. В этом же году компания Helisys продала первую LOM – машину.

В 1992 году компания Stratasys продала первую машину на основе FDM – технологии. А фирма DTM продала свою первую установку, реализующую SLS – технологию.

В 1993 году Массачусетский технологический институт (MIT) запатентовал «трёхмерные способы печати».

В 1995 году в Массачусетском технологическом институте впервые введён термин «3D-печать». В этом же году Компания Z Corporation получила эксклюзивную лицензию от MIT использовать технологию 3DP.

В следующем 1996 году компания Stratasys (США) представила установку Genisys, компания Z Corporation представила установку Z402, а 3D Systems представила установку Actua 2100. К данному устройству быстрого прототипирования было впервые применено название 3D – принтер.

В 1997 году фирма EOS (Германия) продала SLA-технологии компании 3D Systems.

В 2005 году компания Z Corporation выпустила установку Spectrum Z510 – первый 3D-принтер с высоким качеством цветной печати.

В 2008 году компания Objet Geometries Ltd разработала принтер Connex500, печатающий различными материалами одновременно.

В 2010 году был напечатан первый автомобиль при помощи гигантских 3D-принтеров Dimension и Fortus компании Stratasys. В этом же году медицинская компания Organovo. Inc объявила о создании технологии, направленной на разработку искусственных кровеносных сосудов на 3D-принтере.

В 2011 году инженерами университета Саутгемптона (Великобритания) создан первый самолёт, напечатанный на 3D-принтере. В этом же году была создана установка для выращивания человеческих органов, использующая стволовые клетки.

В 2012 году в Венском технологическом университете (Австрия) создали 3D-принтер, печатающий со скоростью 5 м/с объекты с разрешением до 100 нм. В таблицу 1 внесены данные, иллюстрирующие типовые характеристики прототипирующих машин. В данном случае

под точностью здесь понимается минимальная толщина формируемого слоя. Например, заявленная погрешность для машины Dimension от фирмы Stratasys $\pm 0,178$ мм справедлива только по оси Z – в направлении печати. В плоскости печати для этой технологии характерно образование технологического бурта, величина которого существенно больше.

2.3. Анализ аддитивных технологий

Аддитивные технологии (AF – Additive Manufacturing), или технологии послойного синтеза, сегодня одно из наиболее динамично развивающихся направлений "цифрового" производства. Они позволяют на порядок ускорить НИОКР и решение задач подготовки производства, а в ряде случаев уже активно применяются и для производства готовой продукции.

Схематично различия в традиционном и аддитивном производстве можно изобразить следующей схемой:

Преимущества аддитивных технологий:

1. Улучшенные свойства готовой продукции. Благодаря послойному построению, изделия обладают уникальным набором свойств. Например, детали, созданные на металлическом 3D-принтере по своему механическому поведению, плотности, остаточному напряжению и другим свойствам превосходят аналоги, полученные с помощью литья или механической обработки.

2. Большая экономия сырья. Аддитивные технологии используют практически то количество материала, которое нужно для производства вашего изделия. Тогда как при традиционных способах изготовления потери сырья могут составлять до 80–85 %.

3. Возможность изготовления изделий со сложной геометрией. Оборудование для аддитивных технологий позволяет производить предметы, которые невозможно получить другим способом. Например, деталь внутри детали. Или очень сложные системы охлаждения на основе сетчатых конструкций (этого не получить ни литьём, ни штамповкой).

4. Мобильность производства и ускорение обмена данными. Больше никаких чертежей, замеров и громоздких образцов. В основе аддитивных технологий лежит компьютерная модель будущего изделия, которую можно передать в считанные минуты на другой конец мира – и сразу начать производство.

Аддитивные технологии дали возможность применить не только новые материалы, но и новый подход к проектированию изделий для

оптимизации конструкций с учётом возможностей аддитивных технологий. Ограничения классических технологий больше не сдерживают конструктора и позволяют создавать облегчённые детали и заменять узлы, состоящие из нескольких деталей, лишь одной. Так, при конструировании сейчас активно используют бионический дизайн по мотивам "систем", созданных природой в ходе эволюционного развития.

Такой подход даёт возможность оптимизировать конструкцию деталей и узлов, сэкономить материал при сохранении прочности конструкции.

Яркий пример оптимизации и эффективного применения АМ-оборудования показала компания General Electric. Была оптимизирована конструкция топливной форсунки авиадвигателя LEAP. Количество деталей этого узла сократили с 25 всего до 5 шт. Таким образом, удалось повысить надёжность элемента и добиться снижения массы. Учитывая, что в двигателе 19 топливных форсунок, можно смело говорить о серийном производстве.

Классификация аддитивных технологий. Аддитивное производство (от англ. *additive manufacturing*) представляет собой класс перспективных технологий кастомизированного производства деталей сложной формы по трёхмерной компьютерной модели путём последовательного нанесения материала (как правило, послойного) – в противоположность так называемому *вычитающему производству*.

Компании, производящие оборудование для изготовления изделий аддитивными методами, по-разному называют свои технологии. В литературе присутствует неопределённость по поводу наименования различных технологий.

Американская организация ASTM International (American Society for Testing and Materials), занимающаяся разработкой технических стандартов для широкого спектра материалов, изделий, систем и услуг, рекомендует два основных термина – Additive Fabrication (AF), Additive Manufacturing (AM), а также «легитимные» синонимы – *additive processes, additive techniques, additive layer manufacturing, layer manufacturing и freeform fabrication*, которые русскоязычным вариантом могут быть корректно переведены как «*аддитивные технологии*» (АТ), «*аддитивное производство*» (АП), а также технологии послойного синтеза.

На сегодняшний день устоявшейся классификации аддитивных технологий не существует. Различные авторы подразделяют АТ в зависимости от:

- применяемых строительных или модельных материалов (жидкие, сыпучие, полимерные, металлопорошковые и т. д.);
- наличия или отсутствия лазера;
- методов подвода энергии для фиксации слоя построения (с помощью теплового воздействия, облучения ультрафиолетовым или видимым светом, посредством связующего состава и т. д.);
- методов формирования слоя.

ASTM F2792 (США) классифицирует аддитивные технологии, разделяя их на 7 категорий (таблица 1):

1. *Material extrusion* – выдавливание материала;
2. *Material Jetting* – разбрызгивание материала, струйные технологии;
3. *Binder jetting* – разбрызгивание связующего;
4. *Sheet lamination* – соединение листовых материалов;
5. *Vat photopolymerization* – фотополимеризация в ванне;
6. *Powder bed fusion* – расплавление материала в заранее сформированном слое;
7. *Directed energy deposition* – прямой подвод энергии непосредственно в место построения.

Иногда используется классификация процессов аддитивного производства в зависимости от состояния материала: жидкого, порошкообразного и твёрдого (таблица 2).

Жидкостные процессы включают в себя:

- *стереолитографию* (Stereolithography),
- изготовление объектов путём послойной наплавки (Fused Deposition Modeling) и
- *струйную печать* (Inkjet Printing).

Порошковые материалы используют в таких технологиях как:

- 3D-печать,
- *селективное лазерное спекание* (Selective Laser Sintering),
- прямое лазерное спекание металлов (Direct Metal Laser Sintering),
- *селективную лазерную плавку* (Selective Laser Melting),
- *электронно-лучевую плавку* (Electron Beam Melting),
- *прямое нанесение металлов* (Direct Metal Deposition) и
- *точное лазерное формование* (Laser Engineered Net Shaping).

Твёрдотельные процессы включают в себя послойное изготовление объектов из листового материала (Laminated Object Modeling) и произвольное экструзионное формование (Extrusion Free Formation).

Можно отметить многообразие методов аддитивного производства в зависимости от технологий, материалов, оборудования, программного обеспечения и, конечно, конструкции, массы и габаритов детали.

Таблица 1

Классификация аддитивных технологий согласно стандарту ASTM F2792

Группа	Технология	Исходный материал	Источник энергии	Особенности
Material Extrusion	Fused Deposition Modeling (FDM)	Термопластики, керамические суспензии, металлические пасты	Термическая энергия	Невысокая стоимость установок; использование нескольких материалов; ограниченная точность; невысокое качество поверхности
	Contour Crafting			
Material Jetting	Polyjet/Inkjet Printing	Фотополимеры, воск	Термическая энергия / фотоотверждение	Печать из различных материалов; высокое качество поверхности
Binder Jetting	Indirect Inkjet Printing (Binder 3DP)	Полимерные порошки, керамические порошки, металлические порошки	Термическая энергия	Необходимость пропитки изделий после их построения; широкий выбор материалов; высокая пористость изделий
Sheet Lamination	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Металлические листы, полимерные плёнки, керамические ленты	Лазерный луч	Высокое качество поверхности; необходимость удаления остатков материала
Vat Photopolymerization	Stereolithography (SLA)	Фотополимеры, керамики (оксиды Al, Zr, пьезокерамики)	Ультрафиолетовый лазер	Высокая скорость построения; высокая точность изготовления; высокая стоимость исходных материалов

Окончание таблицы 1

Powder Bed Fusion	Selective Laser Sintering (SLS)	Полиамиды, полимеры	Лазерный луч	Высокая точность изготовления; высокая плотность изделий; необходимость использования поддержек
	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Металлические и керамические порошки		
	Selective Laser Melting (SLM)			
	Electron Beam Melting (EBM)		Электронный луч	
Directed Energy Deposition	Laser Engineered Net Shaping (LENS) Electron Beam Welding (EBW)	Металлические порошки и проволоки	Лазерный луч, электронный луч	Возможность ремонта изделий; создание функционально-градиентных изделий; низкое качество поверхности

Допустима следующая классификация методов АП:

- *экструзионный* (на основе технологии послойного наплавления, по международной классификации FDM или FFF);
- *проволочный* (производство произвольных форм методом электронно-лучевой плавки (EBF₃ – Electron Beam Freeform Fabrication));
- *порошковый* (с применением технологий лазерного спекания (DMLS, SLS); электронно-лучевой плавки (лазерная наплавка (SLM));

струйной трёхмерной печати (3DP); применяемые материалы – гипс, пластик, металлические порошки, песчаные смеси);

- ламинирование (LOM);

- полимеризация (используемые методы – стереолитография (SLA), цифровая светодиодная проекция (DLP)).

Таблица 2

Классификация процессов аддитивного производства (АП) по состоянию используемого материала

Состояние материала	Процесс	Материалы
Жидкое	Стереолитография (SL)	Полимеры
	Изготовление объектов путём послойной наплавки (FDM)	
	Струйная печать (IJP)	
Порошкообразное	3D-печать (3DP)	Полимеры, металлы, керамика
	Селективное лазерное спекание (SLS)	
	Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)	
	Селективная лазерная плавка (SLM)	
	Электронно-лучевая плавка (EBM)	Металлы
	Прямое нанесение металлов (DMD)	
	Точное лазерное формование (LENS)	
Твёрдое	Послойное изготовление объектов из листового материала (LOM) – листы	Полимеры, металлы, керамика и композиционные материалы
	Произвольное экструзионное формование (EFF) – проволока	

По способу нанесения материала аддитивные технологии классифицируют на струйные и лазерные способы.

К струйному способу относятся такие технологии, как моделирование методом наплавления (Fused deposition modeling) и Polyjet.

Американское общество по испытанию материалов (ASTM International) делит технологии струйной трёхмерной печати на две категории: *Material jetting* – разбрызгивание материала и *Binder jetting* – разбрызгивание связующего.

В первом случае через сопла подаётся непосредственно сам строительный материал, который после нанесения отвердевает. Во втором – на тонкий слой гипсового, полимерного или металлического порошка разбрызгивается клеящее вещество. Технология 3DP в своём изначальном виде представляла именно второй способ.

К лазерному способу относят послойное ламинирование (*Laminated object manufacturing*), селективное лазерное плавление (*Selective laser melting*), селективное лазерное спекание (*Selective laser sintering*), директивное лазерное спекание (*DMLS*), лазерная наплавка металла (*Laser metal deposition*) и лазерная стереолитография (*Laser stereolithography*), изготовление расслоённых продуктов (*LOM*) и другие.

Комплексный метод классификации предложил Pham, использовавший двумерную классификацию (таблица 3).

Одномерный проход относится к способу, с помощью которого слои построены. В первых технологиях использовался один точечный источник для сканирования по поверхности основного материала. В последующих системах количество источников увеличилось, чтобы повысить производительность, что стало возможным благодаря технологии осаждения капель, например устройства, которое можно встроить в виде одномерного массива разбрызгивающих сопел.

В комплексном методе классификации Pham использовал четыре отдельных классификации материала:

- жидкий полимер;
- частицы порошка;
- расплавленный материал;
- ламинированные листовые материалы.

Аддитивные технологии прямого изготовления изделий из металлов и сплавов (таблица 4) разделяют на две большие группы: *Powder Bed Fusion (PBF)* и *Directed Energy Deposition (DED)*.

Процессы плавления порошков на подложке – платформе в сформированном слое (*PBF*) были одними из первых коммерциализированных технологий АП, из которых первой на рынок было выпущена технология селективного лазерного спекания (*SLS – selective laser sintering*), разработанная в Университете штата Техас в Остине. Все остальные процессы *PBF* модифицируют этот базовый подход

тем или иным способом, чтобы повысить производительность машин, включить в обработку различные материалы и / или избежать патентных совпадений с уже известными методиками АП. Наиболее распространёнными источниками тепла для технологий PBF являются лазеры. Оборудование PBF, в котором используются лазеры, называется машинами для лазерного спекания (*LS – laser sintering*). Машины для лазерного спекания полимерных порошков и лазерного спекания металлических порошков значительно отличаются друг от друга.

Таблица 3

Классификация технологий послойного синтеза, предложенная Pham

Материалы	Одномерный проход	Двух-мерный проход	Массив одномерных проходов	Двумерный проход
Жидкий полимер	SLA (3D Sys)	Двойной луч SLA (3D Sys)	Object	Envisio ntech MicroT EC
Дискретные частицы	SLA (3D Sys), LST (EOS), LENS, Phenix, SDM	LST (EOS)	3D печать	DPS
Расплавленный материал	FDM, Solidscape		TermoJet	
Твёрдые листовые материалы	Solido PLT (KIRA)			

В настоящее время наиболее распространённым материалом, используемым в процессах PBF, является полиамид, термопластичный полимер, широко известный нейлон. В дополнение к чистым (беспримесным) полимерам в технологии PBF применяются полимеры с наполнителями, которые повышают их физико-механические свойства. Например, добавка стекла значительно повышает жёсткость материала, но также снижает его пластичность по сравнению с полиамидными материалами без наполнителей. EOS GmbH предлагает в качестве наполнителей полиамидных материалов алюминиевые час-

тицы, углеродное волокно и стеклянные наполнители своей собственной разработки.

Таблица 4

Классификация АП для производства металлических деталей

Классификация	Терминология	Материал
Powder bed fusion	Direct metal laser sintering (DMLS)	Металлический порошок
	Electron beam melting (EBM)	
	Selective laser sintering (SLS)	
	Selective laser melting (SLM)	
Directed energy deposition	Electron beam freeform fabrication (EBF3)	Металлический порошок, металлический провод
	Laser engineered net shaping (LENS)	
	Laser consolidation (LC)	
	Directed light fabrication (DLF)	
	Wire and arc additive manufacturing (WAAM)	
Binder jetting	Powder bed and inkjet 3D printing (3DP)	Металлический порошок
Sheet lamination	Laminated object manufacturing (LOM)	Металлический слоистый материал
	Ultrasonic consolidation (UC)	Металлическая фольга

С помощью технологий PBF можно производить и металлические изделия, используя любой металл, который можно расплавить.

В *PBF-технологиях* сначала формируется слой строительного материала, а затем происходит обработка этого слоя (лазером, электронным лучом, и иными способами) (рисунки 2).

Пошагово технология построения выглядит следующим образом:

- специальное программное обеспечение разбивает трёхмерную компьютерную модель на слои определённой толщины;
- на основную плиту наносится слой порошка при помощи специального подвижного блока;

- лазерный луч сканирует поверхность по траектории в соответствии с созданным ранее слоем модели.

Этот процесс повторяется от слоя к слою до тех пор до полного построения модели.

В технологии спекания порошка расходными материалами могут быть как пластик, так и металл. Здесь используется лазер, спекающий заданную форму в заранее нанесённом слое порошка. Технология применяется для изготовления функциональных узлов и деталей со сложной геометрией.

К группе PBF-технологий относятся DMLS (Direct metal laser sintering), EBM (Electron beam melting), SLS (Selective laser sintering) и SLM (Selective laser melting).

В *DED-технологиях* формирование слоя производится путём подачи строительного материала непосредственно в зону расплавления (рисунок 3).

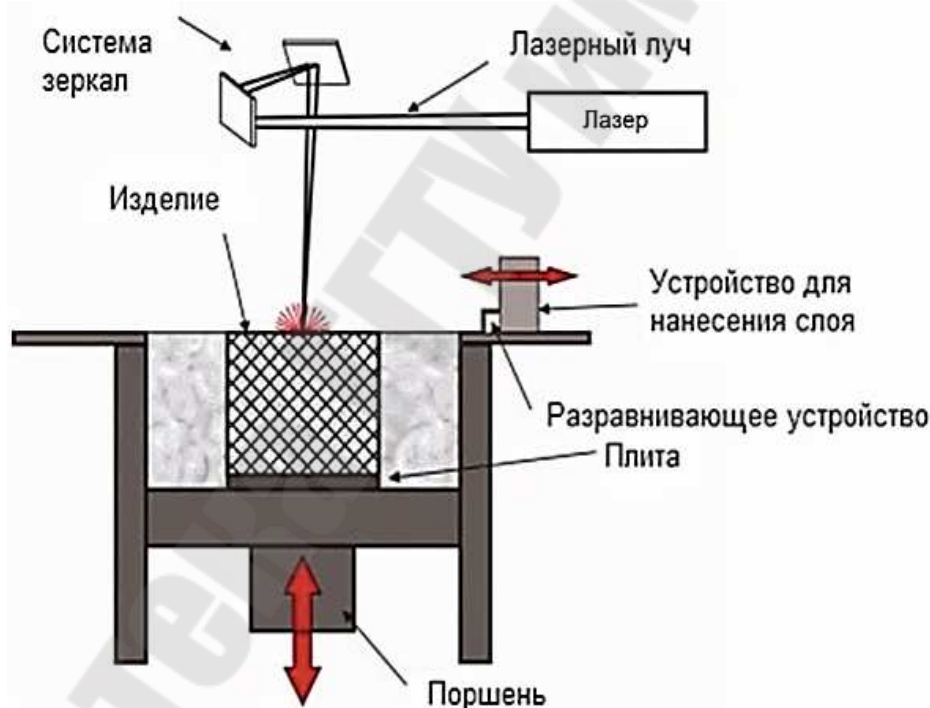


Рис. 2. Схематичное изображение установки, работающей по принципу PBF-технологии

Принцип данной технологии заключается в изготовлении изделий путём подачи металлического порошка в оплавляемую область заготовки. Основной рабочий орган машин – это сопловой аппарат для коаксиальной наплавки, представляющая собой агрегат, в котором расположены система фокусировки лазера, система охлаждения, система подачи материала, а также возможны элементы системы

управления (датчики, видеокамеры и т. д.). В зависимости от сочетания параметров построения детали коэффициент использования материала может варьироваться от 0,2 до 0,9 (т. е. от 20 до 90 % материала, поступившего через сопловые отверстия системы подачи, фактически формируют деталь).

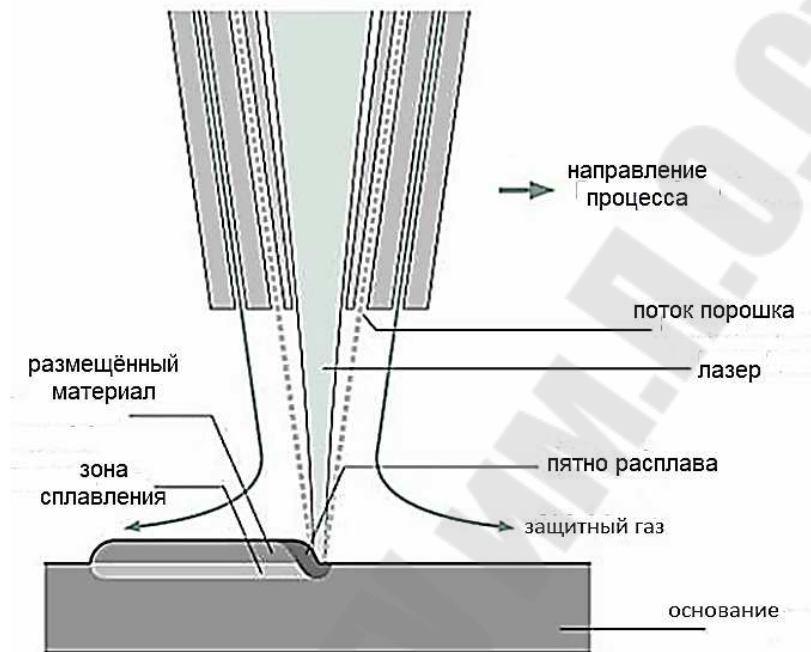


Рис. 3. Принципиальная схема формирования слоя по DED-технологии

Последовательность изготовления изделия данным методом выглядит следующим образом:

- с помощью программного обеспечения создаются оптимальные траектории движения напыляющей головки для получения качественной детали. Параметры лазерного излучения и подачи порошкового материала подбираются в соответствии с типом используемого материала, конфигурации изделия и т. д.;
- напыляющая головка перемещается в точку начала напыления;
- подача порошка начинается через форсунки, которые создают поток порошка, сходящийся в некоторой точке, отдаленной от самой головки;
- из центра головки исходит лазерное излучение, проходящее через точку схождения потоков металлического порошка;
- лазерный луч расплавляет поверхность подложки, на которую происходит напыление, образуя небольшую ванну расплава. Порошок, доставляемый в эту область, попадает в жидкий металл;

- после затвердевания ванны расплава образуется дорожка нанесённого металла.

Управление параметрами наносимой дорожки может производиться как вручную, так и через данные САПР-системы. Напыление, как правило, происходит в инертной атмосфере аргона, в которой контролируется содержание кислорода. Требования по содержанию кислорода варьируются в зависимости от типа используемого материала. Этот метод, также, как и метод PBF, позволяет изготавливать изделия с особой микроструктурой, образующейся благодаря высоким скоростям затвердевания металла.

Материалы, полученные с помощью газопорошковой наплавки, обладают высокими механическими свойствами. Подбор оптимальных параметров процесса позволяет получать сплошную структуру материала, а использование систем контроля процесса наплавки снижает вероятность образования дефектов и повышает точность процесса. Процесс использует множество материалов, таких как, сплавы на основе железа, титана, никеля, алюминия и др. В технологии DED обычно используется лазер, мощностью до нескольких киловатт и больший, по сравнению с селективным лазерным плавлением, диаметр пятна, что обеспечивает высокую скорость изготовления деталей.

Технологии, использующие непосредственную подачу исходного материала в область расплава заготовки, используются как для создания новых изделий, так и для ремонта существующих. В отличие от технологий, предусматривающих выращивание изделия в толще порошка, такие технологии обладают большей производительностью, позволяют получать функционально-градиентные изделия (изделия из нескольких материалов, либо с плавным переходом), но имеют ограничения при изготовлении тонких стенок и сложности геометрии изделий. Также, качество поверхности у технологий с непосредственной подачей материала оказывается ниже (таблица 5).

Процесс позволяет изготавливать изделия из нескольких материалов, элементы которого изготовлены из различных материалов. Также существует возможность изготавливать функционально-градиентные изделия с плавным переходом состава материала от одного элемента к другому или осуществлять «*in-situ*» синтез сплавов. Технология позволяет производить ремонт, модификацию, восстановление и добавление элементов к существующим деталям различных геометрий.

К этой группе технологий относятся Direct Metal Deposition (DMD), Laser Engineered Net-Shaping (LENS), Laser Metal Deposition (LMD) и др. Компании, использующие лазер, по-разному называют свои технологии, хотя, по технической сути, они родственны. Технологии и некоторые производители установок, в которых в качестве строительного материала используется металлический порошок, приведены в таблице 6.

Существует множество технологий, которые можно назвать аддитивными, объединяет их одно: построение модели происходит путём добавления материала (от англ. add – "добавлять") в отличие от традиционных технологий, где создание детали происходит путём удаления "лишнего" материала. Они позволяют использовать практически ровно то количество материала, которое необходимо для готовой детали. Кроме того, сокращается время на создание прототипа детали и самой модели агрегата. Производственный цикл запуска таких деталей ранее занимал 3–6 месяцев, а при применении аддитивных технологий – всего пару суток. Например, на изготовление камеры сгорания и турбины двигателя самолёта ушло по 10 часов.

Таблица 5

Сравнительные характеристики технологий

Характеристика/процесс	PBF	DED
1	2	3
Зона построения	Ограничена	Большая и изменяемая
Размер луча	0,05–0,1 мм	2–4 мм
Толщина слоя	100–100 мкм	500–1000 мкм
Скорость построения	Невысокая, 1–5 см ³ /ч	Высокая, 16–320 см ³ /ч
Поверхность построения	хорошая, шероховатость Ra=5–12 мкм, Rz=20–40 мкм	Грубая, шероховатость Ra=20–50 мкм, Rz=150–300 мкм, в зависимости от размера луча
Остаточные напряжения	Высокие	Высокие
Термическая обработка	Термическая обработка для снятия напряжений, горячее изостатическое прессование	Термическая обработка для снятия напряжений, горячее изостатическое прессование
Химический состав	Незначительное выгорание элементов	Незначительное выгорание элементов

Окончание таблицы 5

1	2	3
Возможности построения	Возможность построения со сложной геометрией с очень высоким разрешением. Возможность построения полых каналов.	Относительно простая геометрия с небольшим разрешением. Ограничения при построении полых каналов.
Ремонт/восстановление	Возможно только в ограниченных случаях (необходима горизонтальная поверхность)	Возможно; способен добавлять металл на любые поверхности.
Добавление металла на имеющиеся детали (наплавка)	Ограничено	Возможно; в зависимости от размеров возможна внутренняя наплавка
Построение функционально-градиентных материалов	Ограничено	Возможно
Мелкодисперсная структура, высокие механические свойства	Да	Да
<i>In-situ</i> синтез сплавов	Да	Да

Таблица 6

Производители оборудования для аддитивного производства

Категории АТ	Название технологии	Производитель
Powder Bed Fusion (PBF)	Laser Melting (LM)	Renishaw Inc.
	Selective Laser Melting (SLM)	SLM Solutions GmbH
	Laser CUSING	Concept Laser GmbH
	Electron Beam Melting (EBM)	Arcam AB
	Direct Metal Printing (DMP)	3D Systems Corp. (бывшая Phenix Systems)
	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	EOS GmbH
Directed Energy Deposition (DED)	Direct Metal Deposition (DMD)	DM3D Technology LLC (ранее POM Group)
	Laser Engineered Net Shaping (LENS)	Optomec Inc.
	Direct Manufacturing (DM)	Sciaky Inc.

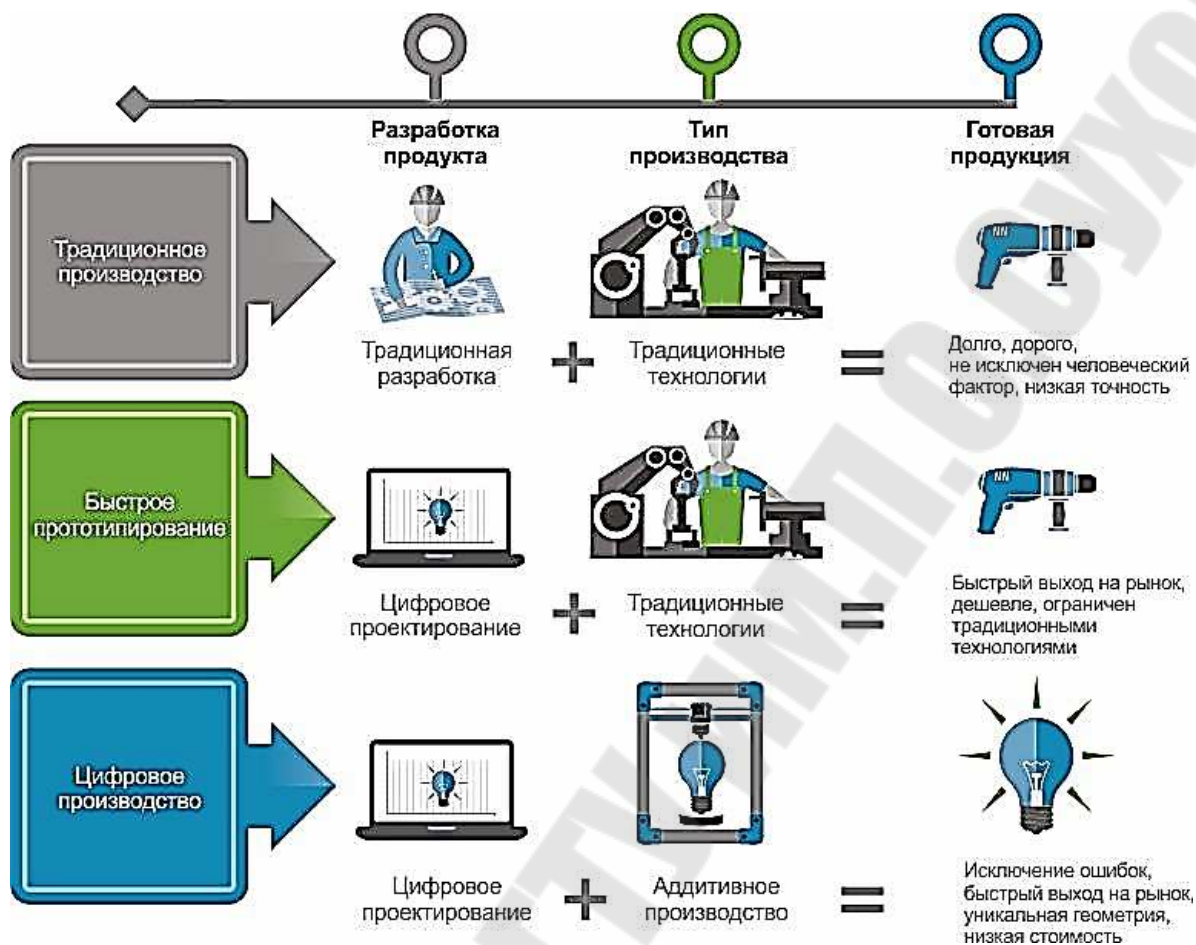


Рис. 4. Схема традиционного и аддитивного производства.



Рис. 5. Кронштейн до оптимизации, 2 033 г. Кронштейн после оптимизации, 327 г.

Развитие этого направления АФ-технологий стимулировало и развитие технологий получения порошков металлов. На сегодняшний

дней номенклатура металлических композиций имеет широкий спектр материалов на основе Ni и Co (CoCrMo, Inconel, NiCrMo), на основе Fe (инструментальные стали: 18Ni300, H13; нержавеющая сталь: 316L), на основе Ti (Ti6-4, CpTigr1), на основе Al (AlSi10Mg, AlSi12).



Рис. 6. Топливная форсунка двигателя LEAP от General Electric.



Рис. 7. Камера сгорания и турбина.

2.4 Технология послойного лазерного сплавления

Процесс послойного лазерного сплавления металлического порошка (Selective Laser Melting – SLM) впервые был реализован в 2004 году компанией SLM Solutions GmbH (Тервалула). Суть этого процесса заключается в следующем: CAD-модель изделия разбивается на слои от 30 до 100 мкм, на подложку наносится слой порошка, затем лазерный луч, сфокусированный на слое порошка, расплавляет его частицы, которые при последующей кристаллизации формируют твёрдую массу, в соответствии с геометрией текущего сечения изделия. Процесс происходит до тех пор, пока не будут изготовлены все слои изделия.

Особенность процесса – комплексное использование систем автоматизированного проектирования (САПР) для создания исходной 3D-модели и лазерной технологии синтеза объёмных изделий при послойном спекании частиц порошка и формирования готового изделия. При внесении конструктивных изменений в деталь или разработке ряда типоразмеров изменениям подвергается только 3D-модель детали при установленном технологическом процессе её получения, что сокращает производственное время изготовления продукции.

В соответствии с исходной 3D-моделью, подготовленной с помощью различных CAD-систем, происходит послойное спекание или плавление порошка в зависимости от мощности лазерного излучения. На начальном этапе формируются поддержки для образца. Исходный порошок наносят на специальное основание из различных материалов, разравнивают и подвергают лазерному воздействию. Затем основание опускают вниз и действия повторяют, слой за слоем формируя готовое изделие.

Другая технология SLM – direct deposition, то есть «прямое осаждение» материала. Газопорошковая смесь подаётся коаксиально вдоль оси лазерного луча, непосредственно в точку, куда подводится энергия и где происходит в данный момент построение фрагмента детали. При этом размер деталей практически не ограничен.

В процессе изготовления деталей также немаловажную роль играет защитная атмосфера, особенно при работе с титаном ввиду его химической активности. В процессе осуществляется постоянная продувка рабочей камеры инертным газом. Таким образом, технология селективного лазерного спекания позволяет воспроизвести модулируемое изделие с высокой степенью точности.

Уже сейчас при штучном и мелкосерийном производстве зачастую становится экономически выгодным «вырастить» небольшую партию деталей на SLS-машине, чем изготавливать литейную или штамповую оснастку. В сочетании с HIP (Hot Isostatic Pressing – горячее изостатическое прессование) и соответствующей термообработкой такие детали не только не уступают литым или кованным изделиям, но и превосходят их по прочности на 20–30 % (рисунки 7–8).



Рис. 8. Кронштейн.

С помощью 3D-печати уже изготавливают детали для авиационного двигателя ПД-14. Теперь, чтобы изготовить комплект завихрителей (рисунок 9), благодаря аддитивным технологиям требуется всего 5 дней. Ранее, по старой технологии, производители тратили на ту же работу около 2-х месяцев.



Рис. 9. Литейная SLA-модель и Al-отливка.

2.5 Технология послойного электронно-лучевого синтеза и напыления

Технология синтеза изделий электронным лучом (СИЭЛ) относительно новая, но уже успешно показавшая большие перспективы в аэрокосмической промышленности для изготовления широкой номенклатуры деталей и конструкций самолётов, вертолётов, космических ракет и подсистем. В основу технологии положена операция послойного спекания (плавления) металлического порошка в вакууме с помощью электронно-лучевой пушки. Данный процесс отличают быстрый переход к изготовлению трёхмерных изделий непосредственно от системы автоматизированного проектирования, возможность использования широкого спектра металлов и сплавов, в том числе тугоплавких.

Можно выделить несколько особенностей электронно-лучевого спекания (плавления) по сравнению с более традиционными прикладными технологиями:

1. Безокислительная среда для синтеза химически активных материалов;
2. Возможность синтеза тугоплавких металлов и сплавов;
3. Дополнительная очистка порошка в процессе обработки;
4. Объёмный источник теплоты вследствие пробега электронов в глубь порошка;
5. Малый диаметр пучка в месте его встречи с подложкой;
6. Высокая удельная поверхностная плотность луча;
7. Периодический характер приложения тепловой нагрузки к каждой точке поверхности подложки;
8. Наличие жидкого проводящего слоя в электромагнитном поле вследствие воздействия электронного луча;
9. Зависимость тока фокусировки луча от угла его отклонения (для электронных пушек без преломления луча).

Метод электронно-лучевого напыления, основанный на явлении испарения и конденсации паров различных материалов в вакуумной среде, позволяет получать слои из следующих комбинаций металлических и керамических систем: $MeCrAlY$ (где $Me - Ni, Co, Fe$), $MeCrAlYNfSiZr$, керамики $ZrO_2 - Y_2O_3$.

К числу достоинств метода следует отнести:

1. Относительно высокую производительность;
2. Возможность получения слоя толщиной 1–3 мкм, что снижает вероятность возникновения остаточных напряжений в слое;

3. Возможность формирования слоя из любого материала;
4. Высокую частоту и химическую однородность образующегося слоя;
5. Высокую степень автоматизации и контроля технологического процесса.

Возможные толщины слоя находятся в диапазоне от единиц нанометров до десятков микрон.



Рис. 10. Комплект завихрителей



Рис. 11. Изделия, изготовленные технологией электронно-лучевого синтеза

Создание произвольных комплексов нанесения покрытий методами послойного электронно-лучевого синтеза и электронно-лучевого напыления позволит значительно увеличить ресурс эксплуатации деталей и узлов ракетных комплексов, авиационных двигателей, наземных газотурбинных установок и получить характеристики, которые не достигаются традиционными способами, изменением состава материала и любой химической обработки.

Свойства КМ улучшают, корректируя комбинацию режимов синтеза изделий и термообработки. Термическую обработку можно производить в импульсном или непрерывном режиме не только поверхностного слоя, но и в процессе «роста» изделия, формируя тем самым программную структуру, например, с упрочняющими фибрами. Влиять на структуру материала можно, регулируя:

1. Скорость нагрева;
2. Температуру;
3. Время выдержки при заданной температуре;
4. Скорость охлаждения.

Управляющими параметрами для получения в каждом слое материала заданной структуры является ток пучка, скорость сканирования, диаметр пучка в месте встречи с мишенью, время импульса пучка, время паузы.

2.6. Технология послойного синтеза изделий ионным пучком

Для дальнейшего развития аддитивных технологий актуально стоит задача быстрого получения композиционных изделий сложной геометрической формы. Изделия с необходимым комплексом прочностных и пластичных свойств могут быть получены сочетанием основного и упрочняющего порошков. В качестве упрочняющего используют порошок химически активных тугоплавких материалов, которые способны реализовать различные многокомпонентные системы: карбиды, бориды, нитриды титана, молибдена, вольфрама, гафния, тантала, ниобия.

Разработка технологии послойного синтеза ионным пучком (СИП) и проектирование принципиально нового технологического оборудования открывают новые возможности в создании композиционных изделий из порошка различных химических составов, получении деталей с программированной структурой и заранее прогнозируемыми свойствами.

В отличие от широко распространённой технологии быстрого прототипирования лазерным или электронным лучом новый подход:

1. Открывает новые возможности в формировании химического состава композиционного изделия; в качестве элементов могут быть использованы ионы различных газов, которые при бомбардировке металлического порошка образуют новые химические соединения;
2. Позволяет значительно повысить точность изготовления изделий (размеры кроссовера ионного пучка при ускоряющем напряжении 120–150 кВ достигают 1 мкм, что на два порядка меньше электронного пучка);
3. Получать многокомпонентные сплавы из порошка различных химических составов;
4. Использовать при синтезе порошки химически активных тугоплавких металлов, т. к. процесс реализуется в вакууме;
5. Формировать структуру изделия непосредственно во время «роста» изделия.

3. ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА

Высокие темпы развития новых технологий (киберфизических систем, трёхмерной печати, интеллектуальной робототехники, облачных сервисов и др.) заставляют компании активно реформировать свой бизнес, внедрять и развивать новые подходы и технологии его ведения, обеспечивая высокое конкурентное качество продукции и высокую производительность.

В этих условиях стала очевидна необходимость рассматривать изделие как некий информационный объект, содержащий все необходимые данные об изделии на каждом этапе его существования – от идеи создания до утилизации, то есть на протяжении всего «Жизненного Цикла Изделия» (сокр. *ЖЦИ*).



Рис. 12. Этапы жизненного цикла изделия.

3.1. Коммуникационная роль трёхмерной модели изделия

ИПИ-технологии (сокр. от *Информационная Поддержка жизненного цикла Изделия*) подразумевают использование трёхмерных геометрических компьютерных моделей изделия как базового элемента ЖЦИ (рисунок 12). Построение пространственной геометрической модели изделия в настоящее время является ключевой задачей компьютерного проектирования. Именно эта модель используется для решения задач формирования чертежно-конструкторской документации, проектирования средств технологического оснащения и разра-

ботки управляющих программ для станков с ЧПУ и координатноизмерительных машин (сокр. *КИМ*).

По компьютерной модели с помощью методов и средств быстрого прототипирования может быть получен физический образец изделия. Трёхмерная модель может быть не только построена средствами определенной САД-системы, но и принята из другой САД-системы через один из согласованных интерфейсов (при их наличии для этой пары систем) или сформирована по результатам трёхмерного сканирования физического изделия-прототипа с использованием соответствующего оборудования.

В САД-системах применяют поверхностное (каркасноповерхностное), твердотельное и смешанное (гибридное) моделирование. При поверхностном моделировании сначала строится каркас – пространственная конструкция, состоящая из отрезков прямых, дуг окружностей и сплайнов. Каркас играет вспомогательную роль и служит основой для последующего построения поверхностей, которые «натягиваются» на элементы каркаса.

Хотя поверхности и определяют границы тела, но самого понятия «тело» в режиме поверхностного моделирования не существует, даже если поверхности ограничивают замкнутый объем. Это наиболее важное отличие поверхностного моделирования от твердотельного.

Другая особенность состоит в том, что элементы каркасноповерхностной модели никак не связаны друг с другом. Изменение одного из элементов не влечёт за собой автоматического изменения других. Это даёт большую свободу при моделировании изделий свободной формы, но одновременно значительно усложняет работу с регулярной геометрией в модели.

С другой стороны, твердотельная модель представляет собой целостный объект, занимающий замкнутую часть пространства. Данный объект строится с использованием параметров модели и соотношений между ними. Параметризация позволяет за короткое время «проиграть» (с помощью изменения параметров или геометрических соотношений) различные конструктивные схемы и избежать принципиальных ошибок. Благодаря этому всегда можно точно сказать, находится ли точка внутри твёрдого тела, на его поверхности или вне тела. При изменении в модели любого элемента будут изменяться все другие элементы, которые связаны с ним, и полная форма твёрдого тела, но целостность нарушена не будет.

Элементами, из которых строится твёрдое тело, могут быть:

- примитивы (элементы, соответствующие распространённым геометрическим фигурам, таким как сферы, цилиндры, конусы, кубы и т. п.);
- элементы вытягивания (полученные вытягиванием плоского контура перпендикулярно его плоскости);
- элементы вращения (полученные вращением плоского контура вокруг заданной оси);
- фаски;
- скругления;
- оболочки;
- рёбра жесткости.

Обычно твердотельный объект строится путем последовательного «добавления» или «вычитания» элементов. Так, если к уже имеющейся твердотельной модели «добавить» элемент вытягивания, то этот элемент образует на модели выступ, а при «вычитании» элемента на модели образуется углубление. Если при построениях доступны одновременно несколько твердотельных объектов, то над любыми двумя твердотельными объектами, пересекающимися в пространстве, можно выполнять булевы операции объединения, вычитания и пересечения.

При использовании операции пересечения двух объектов формируется новый объект, который состоит только из их общей части (на рисунок 13 иллюстрируется выполнение булевых операций: А – элемент типа «куб», В – элемент типа «сфера»).

Твердотельное моделирование предполагает возможность установки параметрических зависимостей между элементами твёрдого тела или нескольких тел. При этом изменение одного из параметров (например, длины элемента) приводит к соответствующей перестройке всех параметрически связанных элементов конструкции.

Такое моделирование, называемое параметрическим, даёт конструктору дополнительные удобства. Так, можно установить параметрические зависимости между элементами твердотельной сборки и, тем самым, автоматизировать контроль собираемости изделия.

Твердотельное моделирование позволяет быстро создавать модели изделий относительно простых форм (под простотой здесь понимается отсутствие сложных поверхностей). К таким изделиям можно отнести внутренние детали машин и механизмов, металлические корпусные детали и др. (рисунок 14).

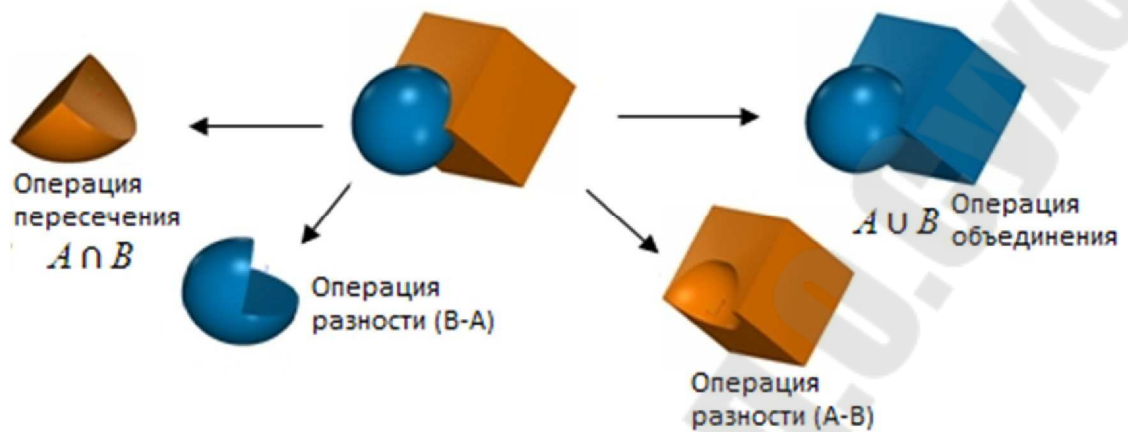


Рис. 13. Построение модели с использованием примитивов и различных булевых операций элементов.

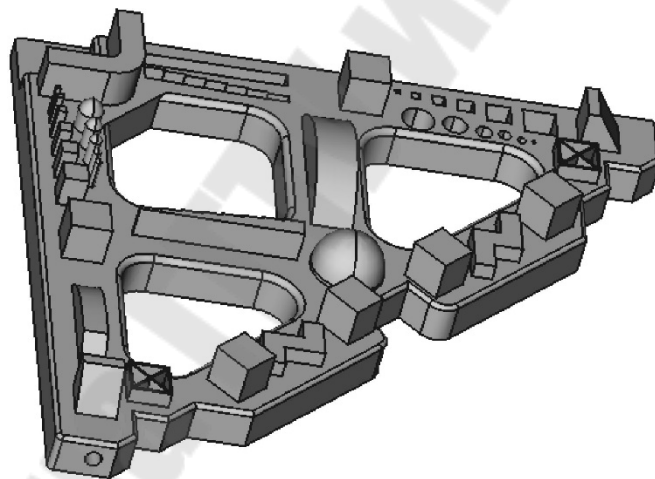


Рис. 14. Модель детали, построенная с помощью операций твердотельного моделирования

При гибридном моделировании обеспечивается возможность одновременной работы с твердотельными объектами и с поверхностями. При этом можно «отрезать» поверхностью часть твёрдого тела, превращать замкнутый поверхностями объём в твёрдое тело и т. п. Гибридное моделирование позволяет сочетать все удобства твердотельного моделирования с возможностью построения объектов сколь угодно сложной геометрической формы.

Гибридное моделирование, в частности, характерно при построении моделей пластмассовых изделий сложной пространственной формы, таких как различные детали автомобилей, самолётов, бытовых приборов и др. (рисунок 15).

Способность эффективно хранить и предоставлять информацию об изделии на основе трёхмерной модели напрямую зависит от парадигмы моделирования, которая закладывается в CAD-систему. Особенности представления данных связываются с определённым форматом модели, который обычно уникален для каждой CAD-системы и в большинстве случаев является закрытым для редактирования или анализа. Таким образом, передача модели от системы к системе является нетривиальной задачей, сопряжённой с множеством сложностей. Использование единой структуры трёхмерной модели упрощает не только получение данных, но и работу с моделью изделия на всех этапах ЖЦИ.

Современных стандартов описания трёхмерных моделей имеется достаточно много. При этом в популярных конверторах, которые преобразуют данные между различными видами моделей, насчитывается более 100 типов форматов, хотя они и не отражают специализированные варианты, применяемые внутри различных систем трёхмерного моделирования.

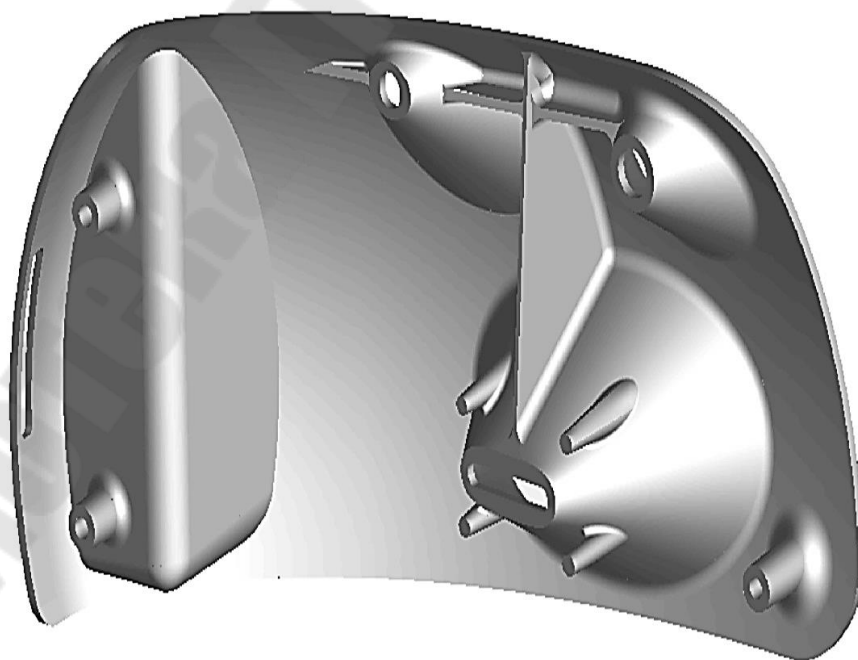


Рис. 15. Модель отражателя фары автомобиля, построенная с помощью операций гибридного моделирования

Рассмотрение даже такого количества моделей, ограниченного в соответствии с частотой использования, нецелесообразно. Поэтому выделим несколько форматов, которые являются наглядными представителями своих классов и позволяют отразить все особенности трёхмерного моделирования. К ним отнесём следующие форматы: 3ds, stl, ascii, max, sat/sab, step, iges. Отдельно выделяются форматы САД-систем, связанные с особенностями определённого ядра такие, как CATPart и 3dxml в CATIA, prt в Creo.

Все эти стандарты можно разделить на несколько типов и подтипов. Учитывая контекст их использования, деление будем проводить с точки зрения закладываемых в тот или иной формат возможностей для использования в технологической подготовке производства. Так, 3ds является одним из широко распространённых форматов, но его использование в сфере САД/САМ/САЕ крайне ограничено из-за специализации данного формата, связанной с трёхмерной анимацией.

Аналогичная ситуация с другими подобными форматами трёхмерной графики, такими как max. Ко второму типу отнесём такие форматы как STL, ASCII и т.п. Эти форматы могут использоваться как в компьютерной графике, так и для производственных задач.

Простота внутренней структуры и ограничения, накладываемые на содержание данных форматов, привели к широкому распространению их в качестве трансляторов для использования при решении определённого класса задач, таких как трёхмерное сканирование изделий или изготовление на установках быстрого прототипирования. Использование этих форматов в других сферах производства проблематично, так как их структура состоит из наборов координат, которые не могут быть представлены в виде примитивов без дополнительной трудоёмкой компьютерной обработки.

Совокупность различных форматов данных, используемых в САД-системах, можно разбить на два подтипа. Первый подтип – внутренние стандарты, которые открываются либо только определённой системой моделирования, либо несколькими системами, работающими на едином графическом ядре.

Некоторые из этих форматов могут восприниматься и сторонними программами-конвертерами, но качество такой обработки обычно оставляет желать лучшего. Конвертирование внутри одного формата, но для разных версий САД-системы, вызывает нарушения структуры модели и ошибки в отображении.

Второй подтип – трёхмерные модели, которые формируются одной из систем, но становятся доступными для отображения в различных программах-просмотрщиках (англ. viewers), которые обычно распространяются бесплатно. Такие программы могут отображать различную информацию (зачастую специализированную), но при этом внесение изменений или извлечение данных становится либо невозможным, либо крайне проблематичным. К таким стандартам можно отнести, например, стандарт 3DXML, активно продвигаемый компанией Dassault Systemes, но обладающий перечисленными выше ограничениями.

Третьим типом являются форматы-интерфейсы. Эти форматы специально разработаны для передачи данных от системы к системе, и в случае постоянной поддержки и обновлений позволяют на высоком уровне представлять информацию о модели с включением разных типов данных.

Наиболее распространены форматы SAT/SAB (ACIS-ядро), STEP и IGES. При этом формат SAT/SAB применяется в специализированных задачах и передаёт в основном трёхмерную геометрию с упором на обработку примитивов, что часто используется в таких системах контроля как координатно-измерительные машины (например, CarlZeiss DuraMax).

С другой стороны, IGES и STEP являются форматами – контейнерами с широкими возможностями внутреннего наполнения. Сама трёхмерная модель в таком случае может состоять либо из примитивов, либо иметь представление в виде точек (аналогично ASCII или STL). Формат IGES длительное время использовался для передачи данных (в первую очередь чертёжных) между системами. При этом зачастую передаваемая информация отображалась в целевой системе некорректно. Также имелись существенные ошибки в отображении трёхмерных моделей изделий.

Учитывая такие особенности, был начат проект STEP, предназначенный для замены формата IGES. После первого релиза STEP в 1994 г., интерес к дальнейшей разработке IGES угас, и версия 5.3 (1996) была последним выпущенным стандартом. Формат IGES обошли стороной многие тенденции развития трёхмерной графики, но он все-таки часто используется для передачи геометрии со структурой низкой сложности.

3.2. Использование трёхмерных моделей на различных этапах жизненного цикла изделия

Проектирование. Этот этап обычно разделяют на концептуальное (предварительное) проектирование и рабочее (более детализированное) проектирование. На этапе концептуального проектирования формируются и уточняются технические требования к изделию, осуществляется поиск и выбор принципиальных решений, обеспечивающих требуемую функциональность. Трёхмерные модели могут использоваться для представления концептуальных решений (например, принципа функционирования механического устройства), их анализа и последующего отбора.

На этапе рабочего проектирования концептуальные решения, выбранные ранее конкретизируются: определяется состав узлов и деталей, точные геометрические размеры изделия, используемые материалы. В результате рабочего проектирования формируется конструкторская документация. При этом 3D модели служат основной формой представления геометрической информации об изделии, позволяют проводить компьютерные инженерные расчёты, анализировать собираемость деталей и узлов, производить прототипы (функциональные, тестовые, рабочие), получать чертёжно-конструкторскую документацию.

Подготовка производства. На этапе подготовки производства, который является одним из самых длительных и сложных, выделим подэтап технологическая подготовка производства (сокр. *ТПП*). До появления средств трёхмерного компьютерного моделирования исходной информацией для этапа ТПП служила чертёжно-конструкторская документация.

В настоящее время трёхмерные модели рассматриваются не только как составная часть конструкторской документации на изделие, но и как полная замена описания изделий в виде чертежей. При этом часть задач ТПП уже не может быть в принципе решена без трёхмерной модели. К таковым можно отнести задачи многокоординатной обработки, требующие сложных математических вычислений, которые не возможно провести вручную, либо задачи применения аддитивных технологий, базирующейся только на использовании трёхмерной модели.

Производство. На этапе производства трёхмерные модели используются для анализа и оптимизации производственных процессов. Например, в роботизированной линии по сборке сложного изделия

трёхмерные модели технологического оборудования совместно со специализированным программным обеспечением для виртуального моделирования производственных процессов позволяют не только контролировать столкновения, но и обеспечивать синхронизацию действий отдельных роботов и людей по времени.

Реализация, эксплуатация, ремонт и утилизация. Этапы реализации, эксплуатации, ремонта и утилизации современных изделий невозможен без информационной поддержки (в коммерческих предложениях, для рекламных целей или в качестве элементов и составных частей документации по эксплуатации и ремонту).

Например, слайды, анимационные фильмы и другие подобные данные, могут выгодно представить созданное изделие и пояснить принципы его работы. Такая поддержка организуется на базе трёхмерных моделей. В целом количество способов применения трёхмерных моделей для решения задач информационной поддержки этапов ЖЦИ достаточно обширно.

4. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОТОТИПЫ

4.1. Трёхмерное сканирование

Задачи модификации технологического процесса на основании анализа изготовленного изделия, изучения собираемости деталей, высокоточного контроля непосредственно на рабочем месте или проведения виртуальных испытаний на основе трёхмерных моделей выявили необходимость создания нового класса оборудования, получившего название «трёхмерный сканер».

В данный класс оборудования входят различные устройства, метод работы которых зачастую коренным образом отличается друг от друга, но все они позволяют формировать трёхмерную модель на основе физического объекта. Методов контроля изделия или формирования трёхмерной модели существует много, в том числе электромагнитные и ультразвуковые измерения, томография поверхности, но наиболее часто используемые можно разделить на три группы:

- точечная триангуляция;
- линейная триангуляция;
- интерференционное проецирование.

Точечная триангуляция. При использовании точечной триангуляции с помощью щупа в один момент времени получают координаты одной точки. Схема действия представлена на рисунке 16.

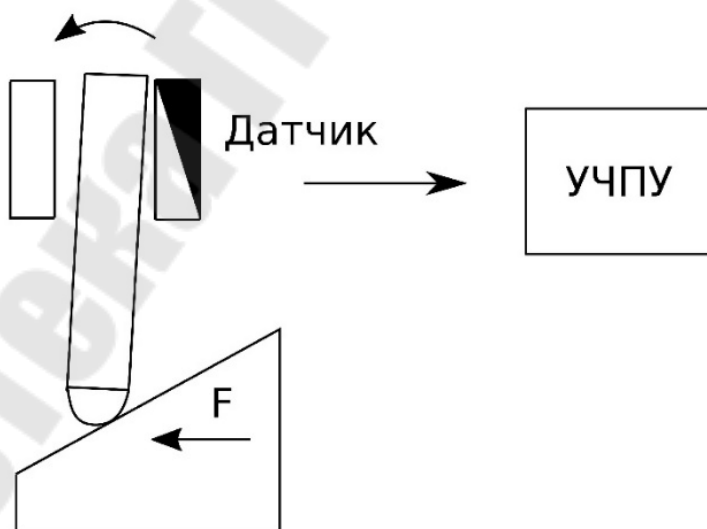


Рис. 16. Схема действия систем сканирования, основанных на методе точечной триангуляции

Для получения всей модели изделия производится обход по характерным точкам. Если объект измерения представляет собой сложную модель, тогда количество измерений приходится увеличивать

пропорционально сложности. Поверхность между ближайшими измеренными точками выстраивается по математическим алгоритмам, тем самым вносится погрешность в построение модели.

На рисунке 17 приведена увеличенная фотография модели, полученной методом точечной триангуляции. Метод точечной триангуляции обеспечивает высокую точность передачи конкретных параметров модели. Такая точность реализуется благодаря фиксированному положению объекта на протяжении всего процесса измерения.

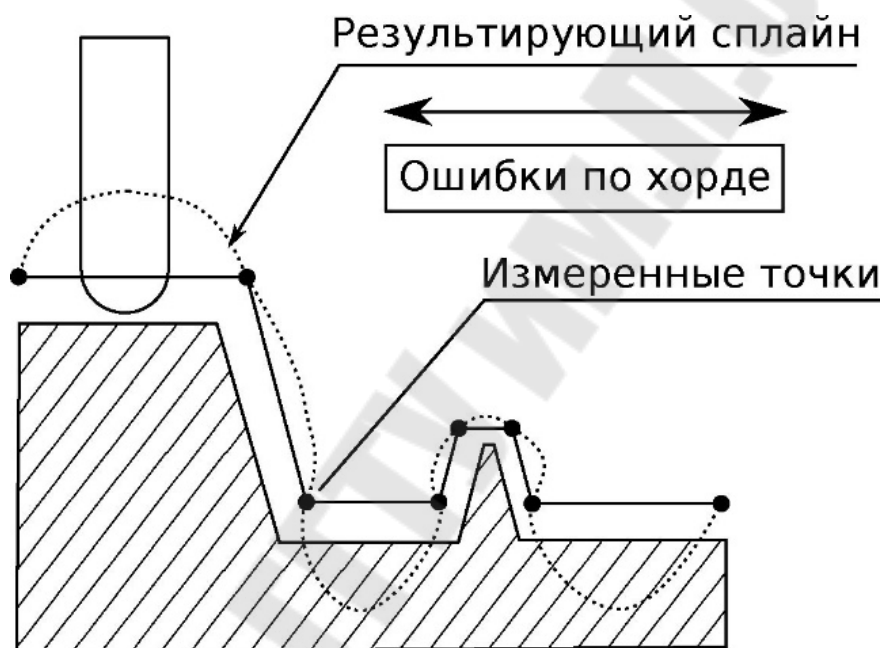


Рис. 17. Схема действия систем сканирования, основанных на методе точечной триангуляции

Линейная триангуляция. При линейной триангуляции с помощью луча лазера или источника света проецируется полоса, которая считывается цифровой камерой. Схема действия систем, основанных на данном методе, приведена на рисунке 18.

Последовательно проецируя полосу на все поверхности, объект охватывается полностью. Считанные полосы преобразуются в координаты составляющих их точек. На рисунке 19 изображена схема получения координат точек поверхности.

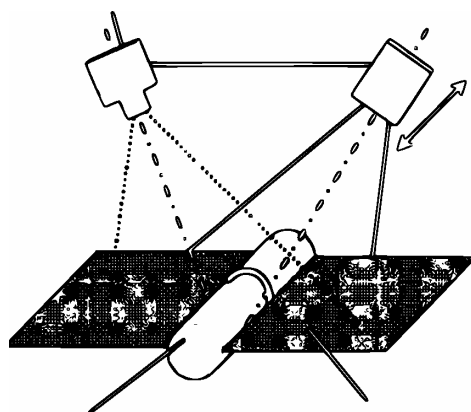


Рис. 18. Схематическое изображение метода линейной триангуляции

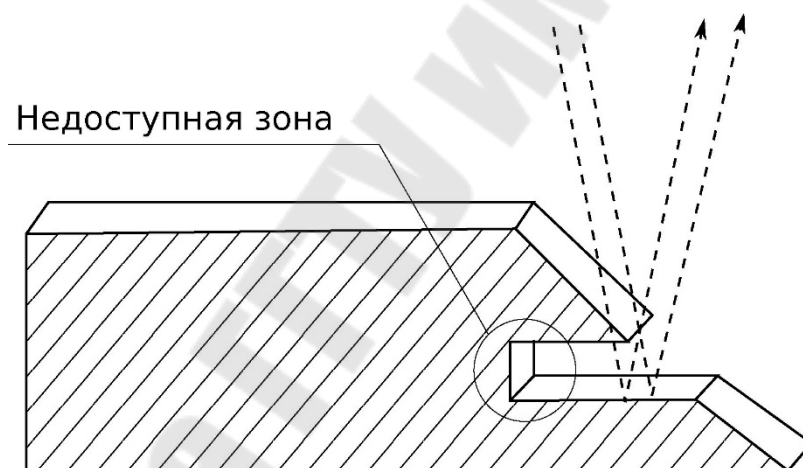


Рис. 19. Схема, демонстрирующая причину появления недоступной зоны для систем, основанных на методе линейной триангуляции

В связи с особенностями проецирования полосы, возникают ограничения по возможности сканирования объектов. На рисунке 20 изображена зона на поверхности изделия, недоступная для лазерных сканеров.

Получен α
Получено D
Вычислено Z

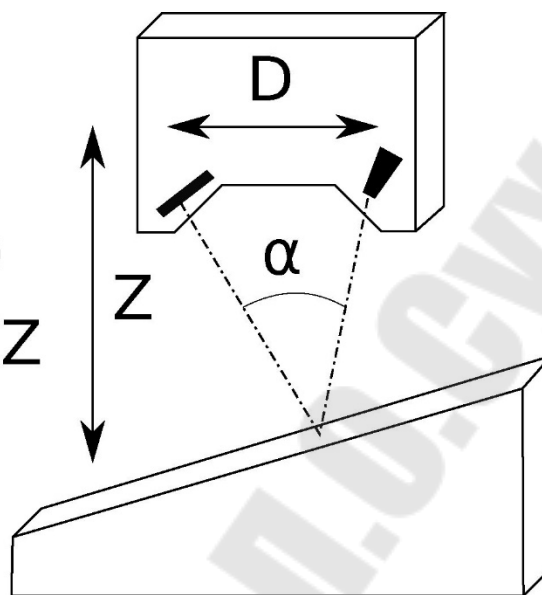


Рис. 20. Схема получения координат точек на поверхности объекта.

Интерференционное проецирование Интерференционные трёхмерные сканеры основаны на проецировании белого света поверх считываемого цифровыми камерами участка поверхности. Схема работы систем, основанных на данном методе, приведена на рисунке 21. Цифровой камерой считывается положение точек объекта сразу со всей измерительной площади, за счёт проецирования множества линий на участок поверхности. На рисунке 22 изображена деталь, на которую спроецированы интерференционные линии.

Система сканирования производит автоматический сдвиг линии и получает координаты точек со всего участка поверхности изделия. Для получения полной модели изделие сканируется с разных сторон.

За одно измерение проецируется несколько интерференционных картин, покрывающих всю исследуемую область. Используя снимки с камер и учитывая постоянство угла между камерами, программным обеспечением системы определяются координаты точек на поверхности объекта.

На рисунке 23 изображён метод получения координат точек с поверхности и метод проецирования интерференционных полос.

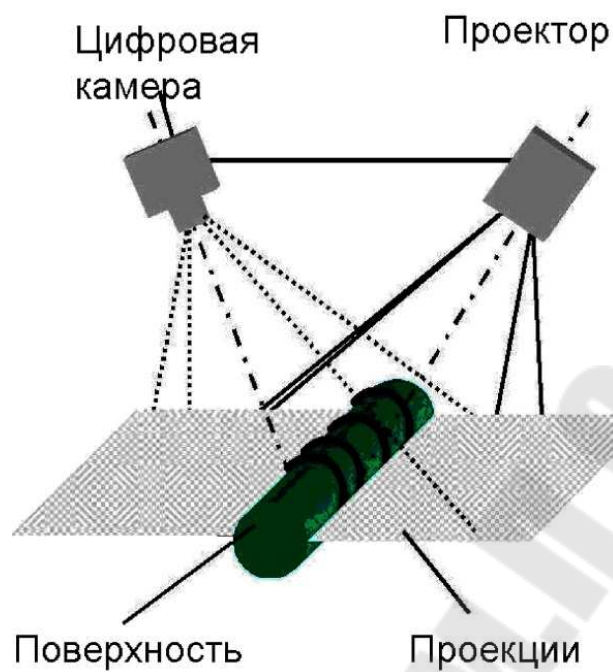


Рис. 21. Схематическое изображение метода интерференционного проецирования



Рис. 22. Проецирование множества интерференционных полос на поверхность изделия

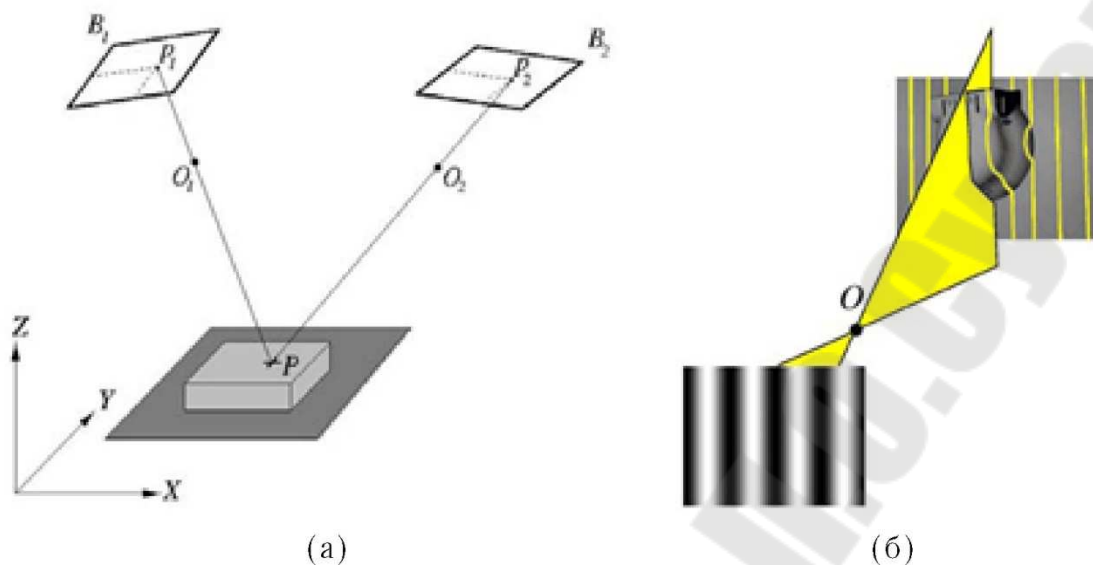


Рис. 23. Метод получения координат точек с поверхности (а) и проецирования интерференционных полос (б).

Метод точечной триангуляции предоставляет повышенную точность сканирования по сравнению с другими за счёт определения положение точек поверхности контактным способом. Для достижения высокой точности измерений требуется, чтобы система сканирования находилась в строго фиксированном положении, поэтому установки, основанные на методе точечной триангуляции, являются не мобильными или ограниченно мобильными.

Метод линейной триангуляции уступает по точности всем представленным методам сканирования. Большинство систем, основанных на данном методе, являются мобильными. Скорость работы при линейной триангуляции намного больше, чем у точечной триангуляции, но ниже чем у интерференционного проецирования.

Метод интерференционного проецирования уступает по точности методу точечной триангуляции. Скорость оцифровки выше, чем у других методов. Точность передачи сложной геометрии сравнима с точностью у метода линейной триангуляции.

На методе интерференционного проецирования основан ряд мобильных систем (рисунок 24). Таким образом, в зависимости от требований имеется возможность выбрать метод, позволяющий получить оптимальные характеристики для конкретной задачи.



Рис. 24. Мобильный трёхмерный сканнер ATOS

4.2. Построение моделей изделий на основе трёхмерного сканирования (реверс-инжиниринг)

Реверс-инжиниринг – изучение технологических принципов приборов, изделий или систем путём анализа его структуры, функций и выполняемых действий. Реверс-инжиниринг применяется во многих областях и является одним из ключевых способов анализа, позволяющего создавать изделия, устройства и системы без наличия документации, но с доступом к объекту исследования. Для производства изделий такая задача особенно актуальна в связи с переходом от бумажных технологий к цифровым данным, что в свою очередь приводит к отсутствию большого количества данных требуемых для производства в цифровой форме.

Ряд производственных задач (например, быстрое прототипирование или работа с некоторыми САМ-системами) не требует твердотельной геометрии, а позволяет оперировать напрямую с трёхмерным сканом (облаком точек) изделия, но число таких задач значительно меньше по сравнению с теми, которые требуют твердотельных или поверхностных моделей. Реверс-инжиниринг геометрии изделий под-

разумеает построение твердотельных моделей на основе трёхмерного скана изделия.

В связи с тем, что большинство систем трёхмерного моделирования не поддерживают формирования твердотельной модели на основе триангулярной поверхности, то возникла потребность создания специализированных средств для преобразования сканированных данных в поверхности, с которыми могут работать САД-системы.

В таких известных системах моделирования как Cimatron и CATIA были созданы специальные модули для работы сканированными поверхностями. Также имеются специализированные системы для осуществления реверс-инжиниринга трёхмерной геометрии. При этом в зависимости от сложности изделия могут применяться три подхода к реверс-инжинирингу:

- а) Использование трёхмерного скана как каркаса для поэтапного выстраивания геометрии.
- б) Трёхмерное моделирование на основе набора примитивов.
- в) Построения твердотельной геометрии из отдельных «патчей», покрывающих трёхмерный скан.

Первый подход обычно не требует дополнительных модулей, что позволяет ограничиться функционалом САД-систем. Применяется для изделий высокой точности с элементами криволинейной формы. В данном подходе трёхмерный скан используется в качестве основы для создания ориентиров (точки, линии, плоскости), построения базовой системы координат и измерения размеров. Затем трёхмерный скан используется только для сравнения с построенной моделью и визуального контроля. Характерным примером использования такого подхода является турбинная лопатка (рисунок 25 а), которая строится на основе набора сечений (рисунок 25 б).

Второй подход применяется для большинства изделий и в зависимости от сложности изделия может быть использован для построения полной модели или только набора ключевых элементов, которые позже объединяются с поверхностями свободной формы.

Примитивы могут быть созданы как в специализированном программном обеспечении для реверс-инжиниринга, что позволит провести эту процедуру в максимально автоматизированном режиме, так и могут быть измерены в программном обеспечении, которое взаимодействует с трёхмерным сканером с последующим построением в САД-системе. Последний вариант наиболее универсален и не требует дополнительных капиталовложений (рисунок 26).

Примитивы могут быть переданы в CAD систему через стандартные интерфейсы (например, IGES), либо измерены для последующего построения. После импорта в CAD-систему выполняется поэтапное восстановление трехмерной модели и её улучшение (рисунок 27).

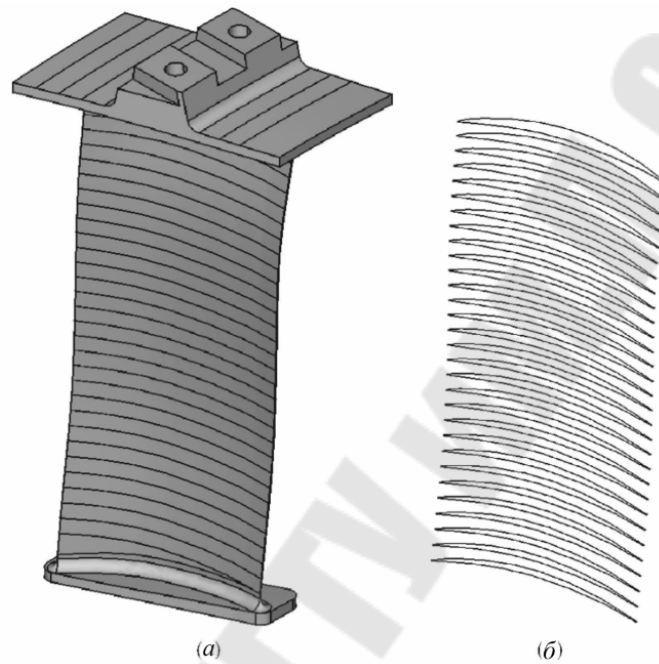


Рис. 25. Турбинная лопатка (а), построенная на основе набора сечений (б)

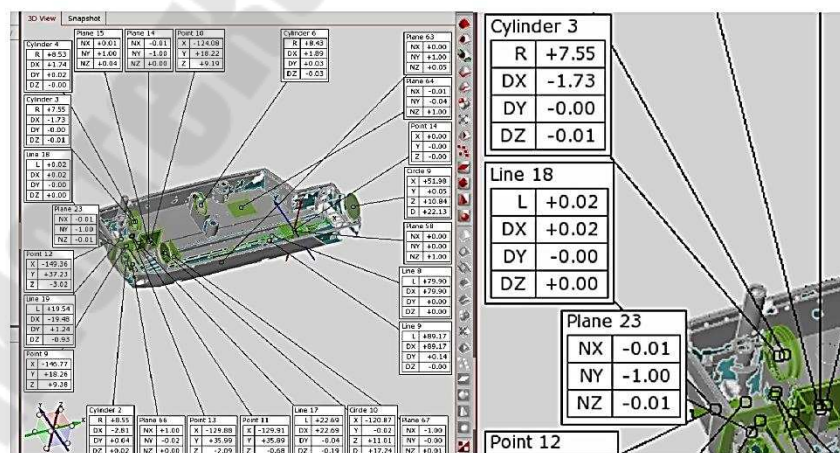


Рис. 26. Корпус с выделенными на нём примитивами.

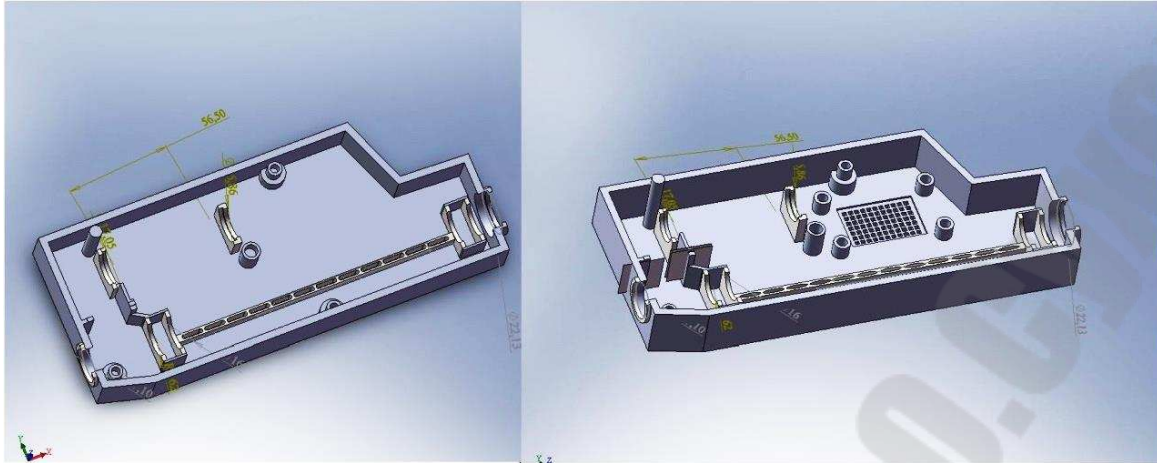


Рис. 27. Поэтапное восстановление трёхмерной модели

Третий подход применяется для построения моделей свободной формы. При этом точность получаемой модели получается ниже, чем для представленных выше подходов, но и скорость построения значительно выше, а в некоторых случаях и процесс построения может быть полностью автоматизирован.

Основная проблема при таком преобразовании в том, что триангулированная модель состоит из треугольников, не лежащих в одной плоскости, поэтому для формирования единой поверхности требуется «сшить» между собой все части.

Так как количество полигонов характеризует детализацию модели, то для получения точной поверхности требуется объединить десятки, сотни тысяч или, в некоторых случаях, миллионы треугольников. Поверхность, состоящая из такого количества частей, будет обрабатываться большое количество времени даже на высокопроизводительных компьютерах, что потребует оптимизировать данный процесс.

В связи с необходимостью создания поверхностей, в которых сотни тысяч треугольников заменяются десятками частей, системой Geomagic Wrap или её аналогами используется специальный алгоритм преобразования, который позволяет при формировании поверхности из нескольких частей сохранить высокую точность. Такой механизм положен в основу инструментария, который может быть настроен и использован как в ручном, так и в автоматизированном режиме.

В случае выбора ручного метода построения поверхности, вначале требуется создать контуры модели, на основе которых будет строиться сетка. Контуры требуются для создания границ, которые

разделяют области с различной кривизной. На рисунке 28 представлена модель с определенными границами. Если границ, полученных при автоматическом определении недостаточно, то дополнительные границы можно добавить вручную. Для этого используется инструмент «кисть».

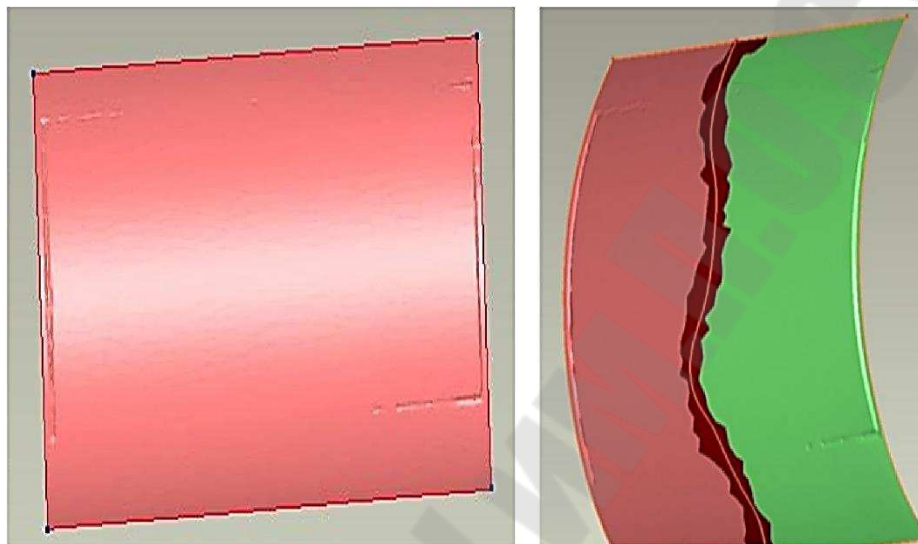


Рис. 28. Внешний вид модели с выделенными границами и пример создания новой границы

На основе созданных границ формируются патчи. Размеры ячейки сетки задают участки, в рамках которых будет формироваться отдельная часть поверхности. Их количество задаётся в зависимости от необходимой точности (рисунок 29).

На основе патчей создаётся сетка, представляющая собой небольшие ячейки, между которыми происходит сглаживание для формирования объединённой поверхности.

Далее система по сформированной сетке «натягивает» CAD – поверхность, которая впоследствии может быть экспортирована в STEP или IGES-формате. При автоматическом построении моделей применяются различные принципы в зависимости от используемых систем. Так, система Geomagic Wrap при построении в автоматическом режиме проходит те же этапы, что и в ручном, но со сниженной точностью, что позволяет получить корректную поверхность достаточно быстро. CAD – система с открытым исходным кодом FreeCAD использует схожий принцип «натягивания» поверхности, но в качестве основы используются отдельные треугольники.

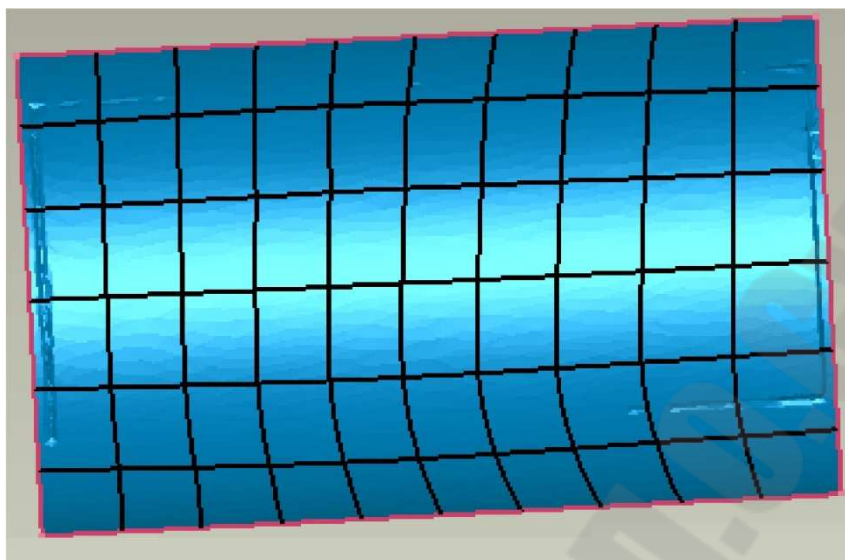


Рис. 29. Построенные на основе отсканированной модели патчи.

5. КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Обеспечение высокого качества выпускаемой продукции является основой её конкурентоспособности. Показатели качества изделий тесно связаны с точностью обработки. Полученные при обработке размер, форма и расположение элементарных поверхностей определяют технические параметры продукции, влияющие на её качество, надёжность и экономические показатели производства и эксплуатации.

Одним из универсальных средств контроля изделий является координатно-измерительная машина (сокр. *КИМ*). На КИМ возможен контроль геометрии отдельных элементов, проверка их взаимного расположения, контроль точности изготовления заданной формы поверхности и т. д. При этом контролироваться могут как простые изделия, так и изделия со сложной пространственной геометрией.

Измерительные машины любого типа (портальные, многоосевые, измерительные руки, оптические) являются сложными устройствами, требующими как навыков обращения с ними, так и корректно выстроенного алгоритма использования, зафиксированного в виде стандартов и регламентов. В КИМ портального типа (рисунок 30) используется координатный метод измерения, сводящийся к последовательному нахождению координат ряда точек изделия и последующему расчёту размеров с учётом отклонений размера, формы и расположения в соответствующих системах координат.

Традиционные портальные КИМ обычно применяются в тех случаях, когда точность измерения является наиболее критичным параметром. Самая высокая точность портальной КИМ возможна лишь в условиях регулируемой температуры и влажности. При любых отклонениях точность будет нарушаться.

Современные КИМ используют специализированное программное обеспечение как для контроля, так и для обработки результатов. Часть программных систем позволяет даже проводить контроль поверхностей свободной формы и их сравнение с САД-моделями. В процессе работы на экран монитора выводится САД-модель, положение щупа в реальный момент времени, расположение измеряемых точек и величина их отклонения. Это упрощает и ускоряет процесс контроля.

С помощью КИМ можно не только контролировать детали поточечным ощупыванием, но и с использованием сканирующего ощупывания. Возможность сканирования помогает решать некоторые

проблемы при измерении, например, определение формы или положения. Чтобы измерить форму детали необходимо задать большое количество расположенных на ней точек. Без сканирования этот процесс занимает достаточно много времени, при этом плотность точек достаточно низкая, а используя сканирование можно измерить огромное количество точек на любой указанной траектории, что помогает достаточно точно определить форму детали (рисунок 31).



Рис. 30. КИМ фирмы DEA и измерительная головка

Перед началом каких-либо действий оператор КИМ получает задание на проведение требуемых работ. В задании обычно присутствует наименование детали, её описание, предыдущие данные её контроля (если таковой проводился) и контролируемые параметры. Дополнительно к заданию должны прилагаться трёхмерная модель детали, и чертежи (либо только САД-модель с трёхмерными аннотациями), где указаны все контролируемые параметры и их допуски.

Для начала работы необходимо определить состав видов конструкторско-технологических элементов (сокр. КТЭ), которые включает в себя контролируемая деталь. Как правило, даже в самой простой детали может содержаться множество КТЭ, и правильное их определение будет влиять на всю дальнейшую работу оператора.

При этом у отдельного элемента детали могут контролироваться различные параметры, которые измеряются отличным друг от друга способом. Такие элементы разделяются на несколько отдельных КТЭ. Например, измерение диаметра отверстия и его же соосности относи-

тельно какой-либо базы. Эти характеристики не могут быть внесены в один КТЭ, так как принципы их измерения отличаются сразу по нескольким параметрам:

- для измерения диаметра отверстия требуется всего 4–8 точек, а при измерении отклонения от соосности для более корректного измерения требуется ощупать уже 16 или более точек;

- при измерении диаметра используется всего один элемент детали, так как диаметр не зависит от каких-либо других элементов или их расположения, а для измерения соосности КТЭ должен включать в себя два элемента: сам измеряемый элемент и базовый элемент или ось, относительно которой рассматривается измеряемый параметр.

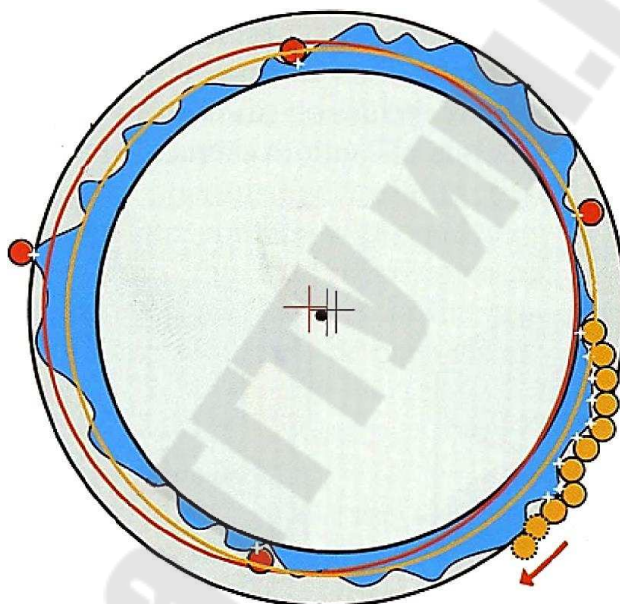


Рис. 31. Диаграммы, отражающие отличия методов точечного и сканирующего контроля на реальной детали.

Программы измерения должны учитывать такую многовариантность, то есть иметь несколько сценариев (условий проверки).

5.1. Выбор методики обмера элементов детали

Для обмера изделий с использованием координатно-измерительных машин используется специализированный термин «ощупывание», определяющий касание поверхности для получения точек и проведения последующих измерений.

Существует несколько основных правил по методике ощупывания элементов детали на КИМ. Большинство поверхностей детали

можно разбить на простейшие геометрические элементы: конус, цилиндр, плоскость и сфера. Каждый из этих элементов имеет свою методику ощупывания. Конус и цилиндр ощупывается как две окружности в верхней и нижней части элемента. Особенность работы с цилиндром заключается в том, что при его очень малой высоте для контроля диаметра используется только одна окружность, то есть цилиндр становится вырожденным. При тех же условиях измерение конуса оказывается невозможно.

Обмер цилиндра. Для измерения цилиндра сначала нужно выделить контролируемые параметры. Они влияют на количество точек, которыми будет определен элемент. Далее нужно оценить высоту цилиндра, если она меньше или равна 5 мм, то считается, что на таком цилиндре невозможно ощупать две окружности (рисунок 32).

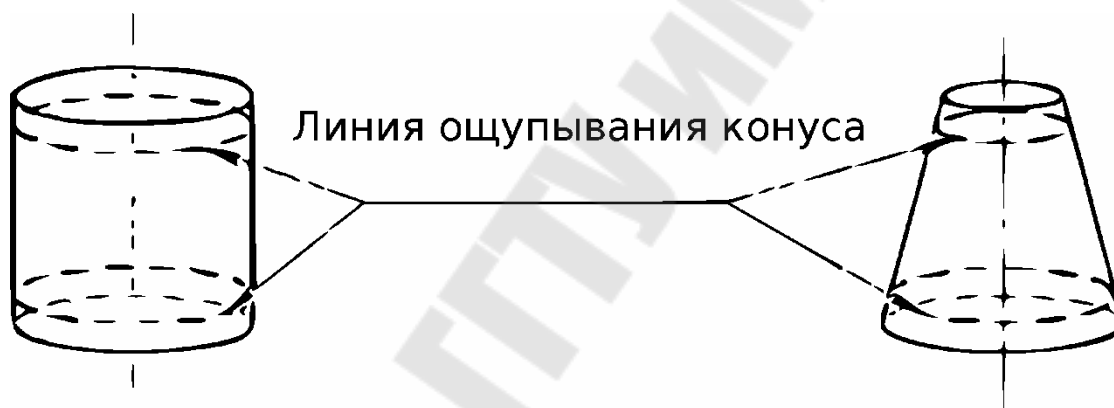


Рис. 32. Ощупывание цилиндра и конуса.

Ключевые причины: не существует настолько малого диаметра шарика щупа, а также человек не сможет подвести щуп точно к предполагаемым измеряемым точкам, не используя дополнительное увеличительное оборудование.

Ещё одним фактором, влияющим на выбор методики обмера, является отношение величины диаметра к высоте цилиндра: при большом диаметре и малой высоте ось элемента определяется с большой погрешностью, поэтому чаще всего программа автоматически определяет такой элемент как окружность. В данном случае рассматривается типовая КИМ высокой точности (типа DEA Global Performance). Для прецизионных КИМ с точностью в десятки-сотни

нанометров учитываются другие масштабы измерения, но общая методика остаётся неизменной.

Обмер конуса. Для конуса действуют все те же правила, что и для цилиндра, но считается, что измеряемый конус по высоте всегда превышает 5 мм. В противном случае этот элемент измерить на КИМ невозможно.

Обмер плоскости. При выборе методики ощупывания плоскости, требуется знать, нужен ли контроль её формы или положения. Для определения плоскости требуется ощупать минимум три точки, желательно максимально удалённых друг от друга. Так как плоскость не может быть абсолютно идеальной, то для исключения погрешности формы рекомендуется ощупывать не 3, а 4 точки. Если же плоскость очень большая, то также рекомендуется взять несколько точек в её средней части.

Если же для плоскости требуется выполнить контроль формы или положения её относительно какого-либо другого элемента, то рекомендуется использовать большое количество определяющих её точек. Конкретное число точек определяется лишь величиной плоскости. Для более точного контроля рекомендуется применять сканирование. Существует несколько видов траектории движения щупа при сканировании:

а) Сканирование сеткой. Это самый распространённый способ сканирования плоскости. Траектория щупа имеет вид змейки с контролируемым шагом и шириной. Данный вид сканирования подходит не для каждой плоскости, так как чаще всего они имеют отверстия или различные выступающие элементы, так как в данном виде щуп обходить эти препятствия не будет.

б) Сканирование по окружности. Данный способ подходит для сканирования плоскости вокруг какого-либо отверстия или круглого выступающего элемента, например, для определения торцевого бие-ния.

В общем случае для ощупывания элемента типа:

- прямая требует задания 2 точек;
- окружность – 3 точек;
- плоскость – 3 точек (желательно 4 максимально удаленных друг от друга);
- цилиндр – 5 точек (желательно 6: по 3 в различных сечениях, максимально отдалённых друг от друга);

- конус – 6 точек, по 3 в различных сечениях, максимально отдалённых друг от друга;
- сфера – как минимум 4 точки, 2 у полюса; 2 вдоль экватора.

Для различных случаев существуют следующие методики ощупывания:

Форма или положение элемента не измеряются, высота элемента < 5 мм. При ощупывании такого элемента достаточно ощупать всего 3 точки. Для исключения погрешности формы, рекомендуется ощупать 4 точки. Измерение следует производить на одной высоте цилиндра, поэтому элемент будет принят за окружность. Если же в качестве метода обмера использовать сканирование, то добавляется погрешность определения размера. Она может появиться из-за плохой очистки детали или попадания пыли в зону сканирования, а также на измерение начинает оказывать влияние микрогеометрия. Конус при таких условиях проконтролировать нельзя (рисунок 33).

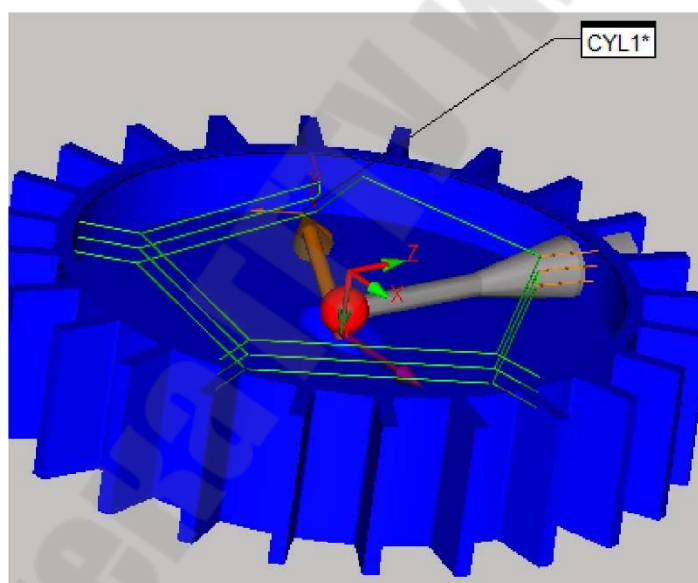


Рис. 33. Пример ощупывания поверхности высотой < 5 мм.

Измеряются форма или положение элемента, высота элемента < 5 мм. Из-за малой высоты цилиндра нельзя точно определить его ось, то есть необходимо работать с усреднённым центром цилиндра. Это создаёт некоторую дополнительную погрешность, но при такой малой высоте она оказывается незначительной. Количество контролируемых точек напрямую влияет на точность определения

положения усреднённого центра: чем больше точек ощупано, тем меньше погрешность.

Для определения позиции центра измеряемой окружности цилиндра или её формы рекомендуется ощупать не менее 8 точек. Для более точного определения искомого центра или формы рекомендуется использовать сканирование. При сканировании щуп не отрывается от детали, что позволяет ощупать большое число точек за сравнительно небольшой промежуток времени. Конус при таких условиях проконтролировать нельзя.

Форма или положение элемента не измеряются, высота элемента > 5 мм. Для контроля размеров такого цилиндра достаточно ощупать всего 5 точек, но, как было сказано выше, для исключения погрешности формы, лучше использовать 8 точек: 4 в верхней части цилиндра и 4 в нижней. Для более точного измерения рекомендуется также ощупать 4 точки в центральной части цилиндра, так как он может иметь бочкообразную или вогнутую форму. Для конуса достаточно ощупать 8 точек: 4 в верхней части конуса и 4 в нижней.

Измеряются форма или положение элемента, высота элемента > 5 мм. Для контроля формы или положения такого цилиндра минимальное количество ощупываемых точек – 16: 8 в верхней части цилиндра и 8 в нижней. Для более точного измерения формы или положения рекомендуется использовать сканирование, а также ощупывать точки в центральной части цилиндра, так как он может иметь бочкообразную или вогнутую форму. Для конуса достаточно ощупать 16 точек: 8 в верхней части конуса и 8 в нижней.

Также можно выделить следующие общие методы контроля:

– *Ощупать* точки элементов на двух высотах, не менее 8 точек на каждой (или использовать сканирование).

– *Ощупать* точки элемента на двух высотах, не менее 4 точек на каждой.

– *Ощупать* точки элемента на одной высоте, не менее 8 точек (или использовать сканирование).

– *Ощупать* 4 точки по окружности на одной высоте.

– *Ощупать* элемент сканированием (вид сканирования: сетка).

– *Ощупать* 4 точки, максимально удалённые друг от друга.

В итоге приведённый подход позволяет для выбранного типа деталей простыми методами определить наборы имеющихся КТЭ, которые обеспечат создание последовательности контроля и конкретной схемы построения. При этом учитываются:

- геометрические особенности конкретной детали;
- состав контролируемых параметров;
- влияние значения параметров на конкретный метод обмера;

возможности КИМ.

Для контроля изделия необходимо сформировать комбинации примитивов и построить связывающие их элементы, которые непосредственно будут определять тот или иной контролируемый параметр. Таким образом, непосредственно оператором с использованием КИМ выполняется сбор точек, которые образуют элементы.

Далее все расчёты производятся в программном обеспечении путём формирования вспомогательных примитивов или связей между ними. Далее для контроля партии изделий достаточно установить одну деталь из партии, определить её расположение в системе и провести контроль по заранее сформированной программе.

При закреплении детали на столе КИМ необходимо учитывать, что контроль заданных размеров должен быть произведён с минимальным количеством перезакреплений, а также должен быть обеспечен беспрепятственный подход щупа к контролируемым элементам и использование оснастки, обеспечивающей минимальную трудоёмкость измерений.

Деталь должна иметь жёсткую фиксацию, исключаящую её перемещение, нельзя допустить повреждение детали или её деформацию. Если создаётся ситуация, когда щуп машины не может подойти к измеряемой поверхности, либо касание происходит с нарушением методики измерения, деталь необходимо перезакрепить. При этом появляются дополнительные погрешности, которые необходимо учитывать при расчёте суммарной погрешности измерения.

Процедуры измерения элементов можно отнести к трём типам:

- а) Измерение контролируемых элементов.
- б) Измерение вспомогательных элементов.
- в) Измерение элементов для базирования.

Базирование имеет большую важность, так как является основой автоматизации измерения. Обычно используют стандартную схему базирования «3 – 2 – 1», широко распространённой разновидностью которой является вариация «плоскость – линия – точка».

Как было описано ранее, для контроля изделия оно разбивается на отдельные элементы, именуемые конструкторско – технологическими элементами (сокр. *КТЭ*). Такие элементы соответствуют определённому типу геометрии с набором параметров, которые нужно

проконтролировать. Способ их измерения и последующего контроля не меняется от детали к детали, поэтому может быть зафиксирован.

В результате каждую новую деталь можно разбивать на КТЭ и строить программу контроля по уже имеющимся программам для деталей со схожим конструктивом. При наличии средств компьютерного анализа геометрии изделия такие элементы могут выделяться автоматически, что позволит создавать программу с минимальным участием оператора.

5.2. Основные этапы создания программы измерения

Создание программы измерения включает ряд действий по работе с КИМ и программного обеспечения КИМ. Основные этапы создания программы измерения (сокр. *ПИ*).

Выбор щуповой системы. В зависимости от сложности детали, числа измеряемых параметров и размеров геометрических элементов необходимо выбрать конфигурацию щуповой системы. При этом могут варьироваться: число щупов в щуповой системе, их взаимное расположение, положение щупа в пространстве, размеры щупа.

Щуповую систему можно выбрать в ПО КИМ из списка уже имеющихся, если же требуемый вариант отсутствует, то его можно создать. Принципы, по которым выбирается щуповая система:

- *упрощение калибровки*, например, если щуповая система содержит только один щуп, то необходимо откалибровать лишь его, а не пять как у «звезды», что значительно сокращает время работы и увеличивает точность измерений;
- *удобство работы* – одним щупом проще работать, так как в процессе подхода к детали не мешают боковые щупы;
- *удобство работы* – упрощённое задание плоскости безопасности.

Калибровка КИМ. Если на предыдущем этапе инженер-метролог решил создать новую щуповую систему, то перед началом работы с КИМ её необходимо откалибровать. Калибровка производится по специализированной калибровочной сфере особой точности.

Обмер/ощупывание базовых элементов детали. Переопределять базовое выравнивание нужно лишь тогда, когда устанавливается новая деталь или заново закрепляется старая. После выбора щуповой системы, нужно задать базу детали, то есть её положение в пространстве. Базовое выравнивание необходимо для определения расположения детали в рабочем пространстве КИМ.

Стандартная система координат у КИМ состоит из трёх элементов, ограничивающих деталь в пространстве, лишая её всех 6 степеней свободы (при необходимости). КИМ и её ПО работают с точками или их множеством. Каждая точка задаётся 6 параметрами – это 3 координаты, определяющие расположение точки в пространстве системы координат машины и 3 вектора, которые определяют, как направление касания щупа, так и кривизну поверхности детали.

Достаточно ощупать несколько базовых геометрических элементов, так как остальные элементы ПО КИМ определит по 3D-модели детали и их останется только извлечь. В качестве базовых необходимо выбирать наиболее крупные или протяжённые элементы.

Выравнивание. Выравнивание позволяет позиционировать детали в координатном пространстве КИМ. В общем случае деталь может быть развёрнута относительно этих координат. Чтобы КИМ смогла в ходе автоматического прогона ощупать деталь и точно определить её положение на рабочем столе, перед началом измерений необходимо определить (рассчитать) её положение относительно осей КИМ.

Именно это выполняется во время расчётного выравнивания: система координат детали наклоняется и разворачивается при помощи вычислений до тех пор, пока базовые геометрические элементы детали не совпадут с осями системы координат детали. Для определения полного положения детали в рабочем пространстве необходимо ограничить её по всем шести степеням свободы (три вращательные, и три поступательные).

Обмер/ощупывание контролируемых элементов. Для того чтобы измерить элементы нужно указать ПО КИМ сами элементы и способ их ощупывания. В зависимости от вида элементов, их размеров и набора контролируемых параметров методы их ощупывания могут быть различными.

При наличии САД-модели и выполненном позиционировании (базирование путём выравнивания) КИМ автоматически определяет положение всех элементов, поэтому достаточно задать лишь методику ощупывания. В случае отсутствия САД – модели придётся ощупывать на КИМ каждый измеряемый элемент, чтобы определить его позицию относительно системы координат детали.

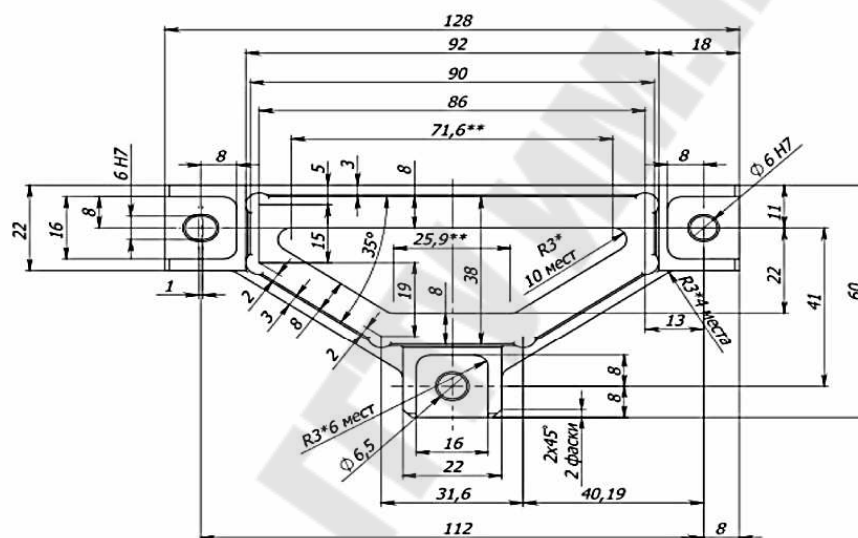
Для измерения контролируемых параметров можно использовать как реальные элементы детали, так и создавать мнимые, такие как пересечения или проекции. Также можно задавать мнимые элементы из

нескольких уже имеющихся, например создание линии проходящей через центры двух окружностей.

Измерение детали. Данный блок работ включает непосредственно обмер детали и контроль её параметров.

Формирование отчёта об измерении. Структура и содержание отчёта (рисунок 34) задаются в ПО КИМ в зависимости от потребности и пожеланий инженера-метролога.

Результат измерений						
Заказчик:			Номер партии:			
Заказчик			<Part Number>			
Проверка выполнена в:			Имя партии:			
Лаборатория КИМ			инвар_005_все разм			
Комментарий:			Версия программы:			
<Комментарий>			1			
№	Описание	+Верх. доп.	- Ниж. доп.	Измерено	В доп.	Вне доп.



21	128.000 (РАЗМ27-М)	0.000	0.400	127.882	✓	
22	90.000 (РАЗМ29-М)	0.350	0.000	90.046	✓	
23	60.000 (РАЗМ3-М)	0.000	0.300	59.869	✓	
24	38.000 (РАЗМ9-М)	0.250	0.000	38.082	✓	
25	16.000 (РАЗМ12-М)	0.180	0.000	16.127	✓	
26	22.000 (РАЗМ16-М)	0.000	0.210	21.890	✓	
27	16.000 (РАЗМ22-М)	0.180	0.000	16.120	✓	
28	22.000 (РАЗМ19-М)	0.010	0.210	21.911	✓	

Подпись: _____ Проверил: _____ Дата: _____

Рис. 34. Отчёт по результатам контроля на КИМ.

Задание плоскостей безопасности. Для предотвращения столкновения щупа с деталью или с используемой оснасткой задаются плоскости безопасности. Плоскости безопасности представляют собой поверхности виртуального параллелепипеда внутри которого находится деталь вместе со средствами закрепления, за пределы которого

го в обязательном порядке отходит щуп после измерения каждого элемента детали. Плоскости безопасности создаются либо заданием их координат вручную, либо снятием виртуальных точек в двух противоположных концах параллелепипеда.

6. КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В ОБЛАСТИ АНАЛИЗА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ МИКРОСТРУКТУРЫ СПЛАВОВ

При оптимизации химического состава литых железоуглеродистых сплавов, например, быстрорежущих сталей и технологии получения заготовок инструмента основной целью является формирование такой структуры, которая обеспечила необходимую теплостойкость, прочность и износостойкость изделия, высокие показатели которых, в свою очередь, явились бы гарантией предотвращения преждевременного выхода их из строя.

Для практического использования литейных технологий чрезвычайно важно обеспечить высокие показатели ударной вязкости образцов сплава, что гарантируется только тщательным контролем его структурных параметров. Тщательность и оперативность контроля может быть достигнута только применением автоматизированных методов обработки изображения микроструктур. Эти методы, в свою очередь, могут быть применимы только в случае правильного выбора контролируемых параметров.

В данной области исследований широко применяются информационные технологии, которые можно разделить на следующие типы:

- Компьютеризированное оборудование с программным обеспечением.
- Программное обеспечение для анализа микроструктур.
- Базы данных микроструктур.

Промышленный программно-аппаратный комплекс анализа изображений SIAMS 700.

Для осуществления автоматизированной обработки микроструктур применяют промышленный программно-аппаратный комплекс анализа изображений SIAMS 700 представлен на рисунке 35.

Анализатор SIAMS 700 является средством измерения «Анализатор фрагментов микроструктуры твёрдых тел». Применение Анализатора SIAMS700 делает структурный анализ материалов лёгким и точным.

Аппаратное обеспечение

1. Микроскоп оптический
2. Моторизованный столик для микроскопа
3. Цифровая микроскопная видеокамера высокого разрешения SIMAGIS

4. Вычислительная станция SIAMS Visual Station, периферийные устройства

5. Планшетное устройство оцифровки макроструктуры

Дополнительно поставляется оборудование для изготовления шлифов:

1. Отрезные станки
2. Прессы для горячей запрессовки образцов, материалы для холодной заливки
3. Шлифовально-полировальные станки, устройство для электролитической полировки
4. Автоматизированные линии и ванны для макротравления

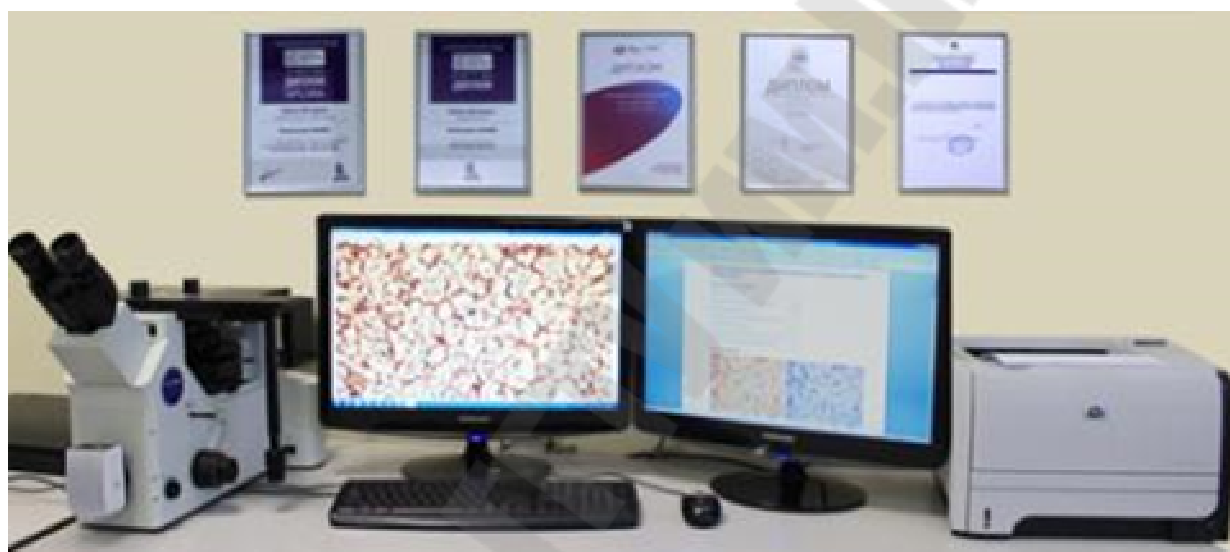


Рис. 35. Комплекс SIAMS 700.

Программное обеспечение SIAMS 700

Пакет программного обеспечения комплектуется из набора модулей, которые предоставляют лаборанту совершенно новый подход к работе:

1. Коллективной работы и удалённой сервисной поддержки в режиме On-Line.
2. Построения панорамного изображения в режиме обычного просмотра образца.
3. Просмотра «живого» видео и съёмки микроструктуры на удалённых рабочих местах.
4. Создания автоматически пополняемых атласов структур.
5. Прямого экспорта результатов анализа в интегрированный с анализатором.

6. Электронный журнал и построения контрольных карт Шухарта.

Весь пакет программного обеспечения состоит из модульной структуры. Нужные модули можно выбрать исходя из решаемых задач.

Модуль «Инструментальная платформа «SIAMS Photolab»

Модуль представлен на рисунке 36. Интерфейс платформы представляет собой электронные таблицы SIMAGIS для размещения изображений, математических функций их обработки и результатов.

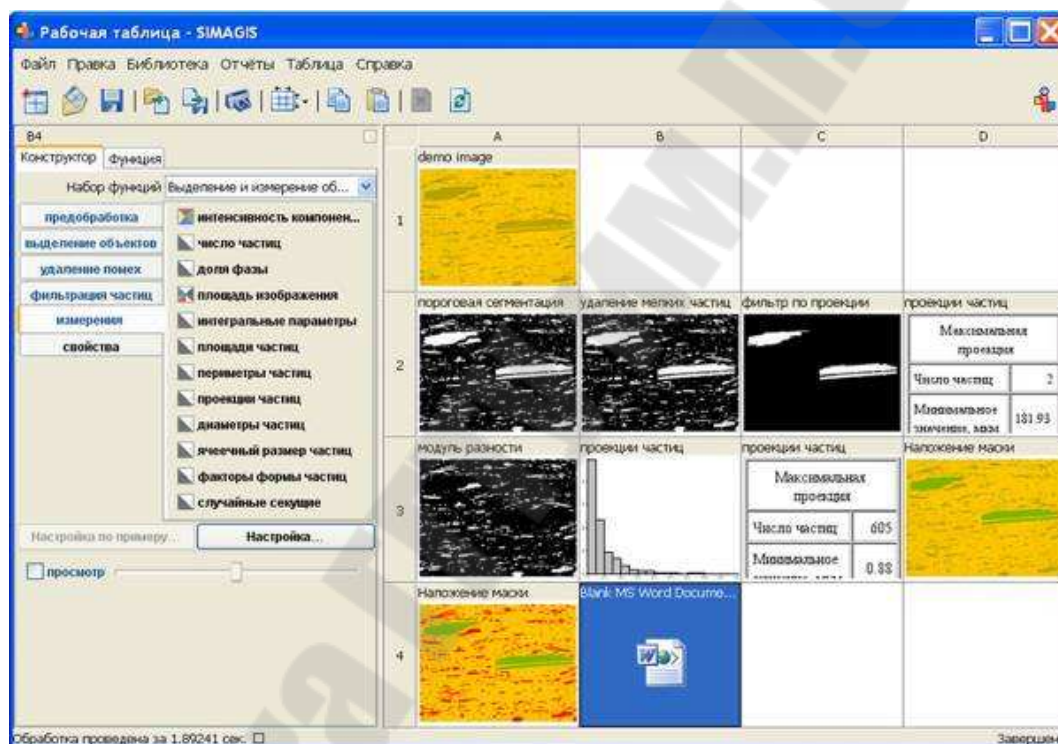


Рис. 36. Окно программы «SIAMS Photolab»

Возможности модуля:

- Визуализация и ввод изображений микроструктуры образцов с микроскопа, цифрового фотоаппарата или сканера.
- Экспорт и сохранение графических изображений в форматах tif, tiff, jpg, jpeg, png, bmp, img.
- Получение пользователем сфокусированного изображения по серии расфокусированных.
- Создание панорамы смежных полей зрения.

- Повышение качества изображения: настройка цветового баланса, изменение яркости и контраста, выравнивание освещённости
- Выделение различных деталей структуры, исходя из поставленной задачи: вычитание помех, фильтрация частиц по форме, размеру, цвету, яркости и другим характеристикам, наложение маски на выделенные элементы структуры.
- Измерение любых размерных и планиметрических характеристик структурных составляющих.
- Использование готовых алгоритмов – примеров методик анализа для самообучения пользователя принципу составления своих собственных алгоритмов.
- Встроенный «Конструктор решений» – инструмент для создания собственных методик для одновременного анализа любого количества полей зрения.
- Создание и сохранение отчёта в формате MS Word. Возможен экспорт результатов анализов в MS EXCEL.
- Создание альбомов изображений микроструктур по заданной классификации и выбранному варианту оформления.

Модуль «SIAMS StatBook»

Предназначен для формирования электронного лабораторного журнала. Результаты анализа микроструктур передаются в «SIAMS StatBook» из любой методики программного обеспечения SIAMS нажатием одной кнопки.

Модуль «Сетевая платформа «SIAMS Apps»

Сетевая платформа «SIAMS Apps» предназначена для коллективной работы, систематизации и хранения изображений и результатов анализа структур, удалённого доступа к информации. «SIAMS Apps» объединяет автоматизированные методики анализа, инструменты для измерений и информационную систему. Система устанавливается отдельно, на сервере, обеспечивая работу на любом персональном компьютере, входящих в сеть организации.

Модуль «Тематические электронные атласы для металлографического анализа методом сравнения».

Возможности модуля:

- Упорядоченное хранение большого количества графических изображений микроструктур.
- Одновременный просмотр двух изображений микроструктур (исследуемого и выбранного или эталонного из атласа).

- Авто подбор наиболее подходящих вариантов микроструктур для сравнения по требуемым параметрам.
- Привязка изображений микроструктур к идентификационным признакам образца и результатам сравнительного анализа.
- Дополнение атласа новыми изображениями микроструктур по окончании очередного исследования по выбору пользователя.
- Помощь в формировании выводов по результатам сравнительных анализов на основании имеющихся.
- Автоматическое формирование отчёта по результатам анализа нескольких полей зрения.

Модуль «SIAMS VideoPanorama»

Данный модуль предназначен для создания панорамных изображений микроструктуры исследуемых образцов. В работе модуля не используется моторизованный столик микроскопа. Оператор вручную управляет столиком микроскопа и в реальном времени происходит построение панорамного изображения просмотренных областей образца. Работу модуля можно посмотреть здесь: <https://goo.gl/4cpzWi>

Модуль «SIAMS AutoScan»

Данный модуль предназначен для управления моторизованным столиком микроскопа и построения панорамных изображений без участия оператора.

Модуль «SIAMS Video»

Данный модуль предназначен для удалённого просмотра микроструктур исследуемых образцов под микроскопом в режиме реального времени, что не требует установку специального программного обеспечения на компьютер, подключённый к микроскопу. После включения модуля «SIAMS Video» на компьютере, к которому подключён микроскоп, начинается прямая трансляция с видеокамеры микроскопа, которую могут просматривать авторизованные пользователи «SIAMS Apps». Оператор управляет трансляцией, управляя микроскопом и пользователи, наблюдающие видеотрансляцию, могут захватывать и сохранять изображение требуемого интересующего поля зрения в любой момент времени.

Методики Анализатора SIAMS 700

Методики систематизированы по различным исследуемым материалам, например, стали, чугуны, сплавы на основе вольфрама и другие. Для каждого материала сгруппированы методики по типу контролируемых параметров микроструктур, например анализ разме-

ра зерна, анализ глубины слоя и другие. В анализаторе SIAMS 700 методики делятся на три типа:

- автоматические (А);
- полуавтоматические (П);
- Методики сравнения со стандартными шкалами нормативных документов (Ср).

Автоматические методики.

Предназначены для автоматизации всего процесса анализа – от ввода изображения с видеокамеры микроскопа, до распечатки сформированного по результатам исследования отчёта. Каждая из методик работает по своему собственному алгоритму, удовлетворяя методологическую преемственность по отношению к российским и зарубежным стандартам. Методики представлены на рисунке 37.

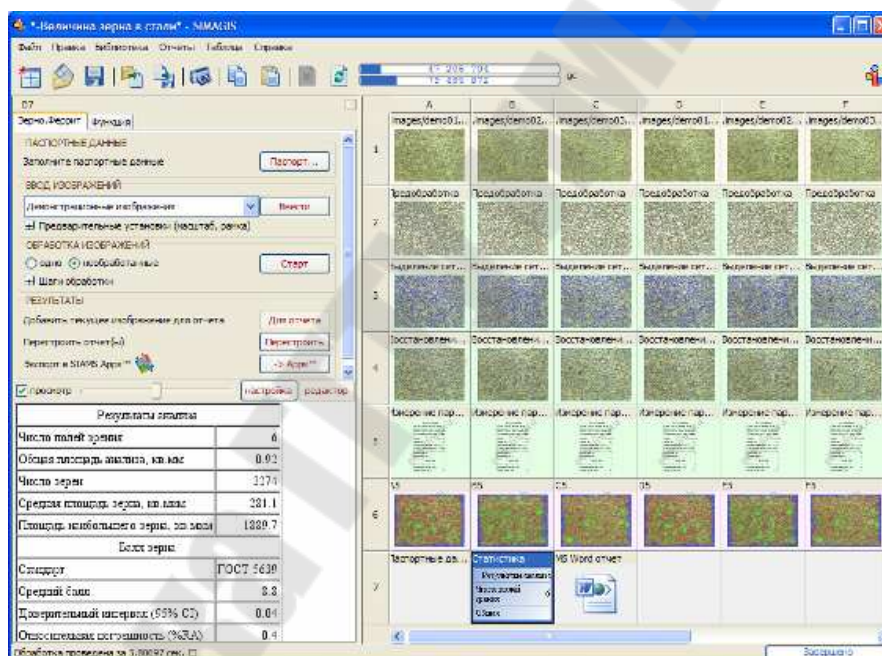


Рис. 37. Окно программы.

«Автоматические методики Анализатора SIAMS 700»

Возможности методик:

- Одновременный анализ нескольких полей зрения с получением результатов по каждому полю зрения.
- Каждая методика открывается в своём окне программы в виде единой таблицы, в ячейках которой последовательно расположены все исходные, обработанные изображения и промежуточные микроструктуры и результаты анализа для каждого поля зрения и для всего образца.

- Существует возможность проверки правильности выделения структурных составляющих исследуемых образцов с помощью включения регулировки прозрачности маски или режима мерцания маски.
 - Представленная в виде электронной таблицы методики дают возможность пользователю на любом этапе анализа произвести корректировку настройки функций для более точного выделения структурных составляющих. При этом программа автоматически пересчитывает все далее идущие этапы и перестраивает отчёт.
 - Возможность ручной корректировки микроструктур, выделением объектов измерения при помощи встроенного графического редактора.
 - Автоматическое формирование сводной таблицы результатов, отчёта.
 - Автоматическое формирование в протокол графиков, сводных таблиц, обработанных и исходных фотографий микроструктур.
 - Совместимость с приложениями «SIAMS VideoPanorama», «SIAMS StatBook», «Тематические электронные атласы».
 - Полуавтоматические методики.
 - Возможности методик:
 - Автоматическая обработка результатов по указанным объектам.
 - Поочерёдный анализ нескольких полей зрения с получением результатов по каждому полю зрения.
 - Автоматическое формирование сводной таблицы результатов, отчёта.
 - Автоматическое включение в отчёт графиков, сводных таблиц, исходных и обработанных изображений микроструктур.
 - Совместимость с приложениями «SIAMS StatBook», «SIAMS VideoPanorama», «SIAMS Apps», «SIAMS AutoScan».
- Рабочее окно методики представлено на рисунке 38.

Методики сравнения со стандартными шкалами нормативных документов

Данные методики предназначены для автоматизации визуального сравнения микроструктуры образца с фотографиями микроструктур, приведённых в ГОСТ. Анализ проводится по произвольному количеству полей зрения с сохранением результатов. Из стандартного ряда фотографий, пользователь выбирает одну со структурой, соответствующей анализируемой.

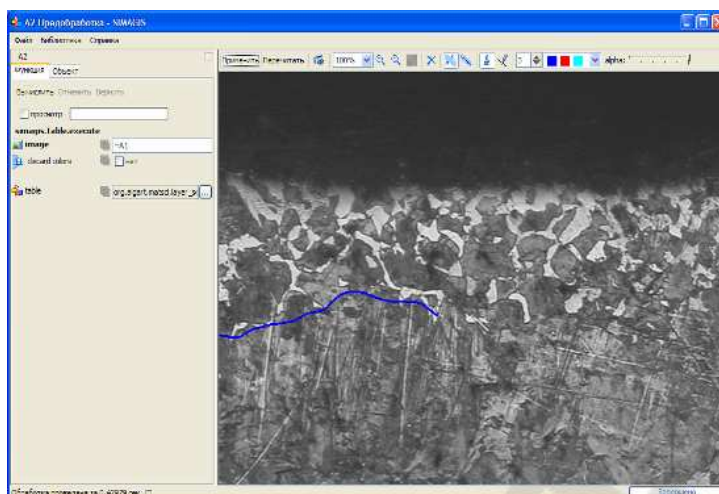


Рис. 38. Окно программы «Полуавтоматические методики Анализатора SIAMS 700».

Возможности методик:

- Автоматическое формирование изображений к единому масштабу.
 - Синхронное изменение масштаба сравниваемых микроструктур.
 - Автоматическое присвоение балла микроструктуры.
 - Анализ любого количества полей зрения с сохранением результатов анализа.
 - Автоматическое формирование отчёта.
 - Возможность самостоятельного создания пользователем шкал эталонов сравнения на основе микроструктур.
 - Интеграция с приложениями «SIAMS StatBook», «SIAMS Apps»
- Рабочее окно методики представлено на рисунке 39.

Рентгеновский дифрактометр ДРОН 3.0

Общие сведения

Дифрактометр ДРОН-3.0 предназначен для выполнения широкого круга рентгеноструктурных исследований монокристаллов и поликристаллов различных материалов. Применение специальных приставок делает возможным проведение исследований с охватом области углов, начиная с 12 минут; в температурных интервалах от +20 до +2000 °С и от +20 до –180 °С. В основе данного метода лежит явление дифракции рентгеновских лучей на трёхмерной кристаллической решётке. Фотография ДРОН 3.0 представлена на рисунке 80.

Для определения фазового состава и параметров тонкой структуры исследуемых образцов проводится съёмка полной рентгено-

граммы в непрерывном режиме с шагом по углу $0,1^\circ$. Интервал углов $2\theta = 10^\circ - 90^\circ$ выбирается с учётом нахождения линий предполагаемых фаз картотеки.

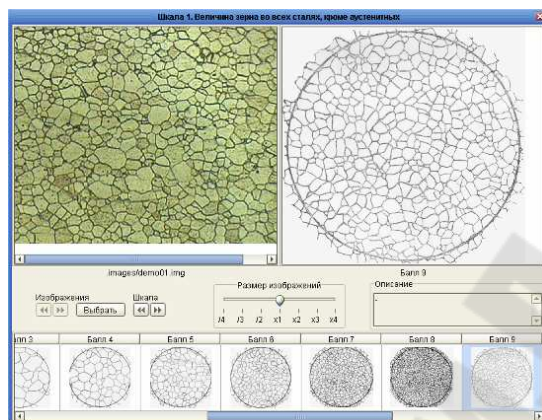


Рис. 39. Окно программы «Методики сравнения со стандартными шкалами нормативных документов».

Аппаратное обеспечение

Основными частями дифрактометра ДРОН-3.0 являются:

- Рентгеновский аппарат;
- Гониометрический блок;
- Блок автоматического управления;
- Персональный компьютер;
- Устройство вывода информации.

Программное обеспечение.

Расшифровка фазового состава полученной рентгенограммы проводится в программе *Crystallographica Search-Match (Oxford)* и включает:

- удаление фона (автоматически или по точкам);
- автоматическую разметку линий с удалением $K\alpha_2$ дублетов и расчётом характеристик пиков;
- выбором порога чувствительности (0–100 %) и ширины линии;
- Идентификация фазового состава проводится в режимах:
- автоматического поиска эталонных образцов в полной базе данных *PDFWIN 2,0*, включающей более 120 тысяч карточек;
- создания собственной базы данных в программе *Crystallographica Search-Match* по данным элементного состава, из-

вестной сингонии и др., значительно сужающей число эталонных карточек, позволяющей повысить точность и увеличить скорость индирования рентгенограмм. Рабочее окно программы представлено на рисунке 41.



Рис. 40. Дифрактометр ДРОН 3.0

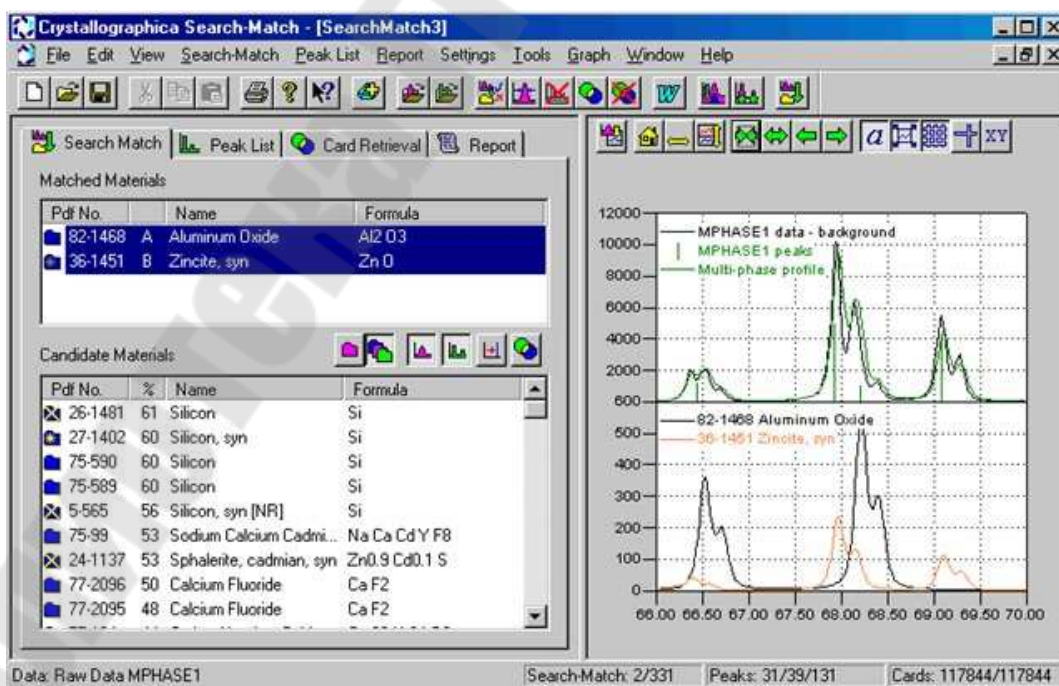


Рис. 41. Рабочее окно программы «Crystallographica Search-Match»

По анализу рентгенограмм сравнения проводится отбор и идентификация фазового состава образца. Результаты идентификации фазового состава включают в себя данные о параметрах рентгеновского спектра, подобранных карточках (название, химическая формула и номер), характеристике пиков (угол, межплоскостное расстояние, интенсивность, полуширина и принадлежность к карточке).

Для расчёта параметров тонкой кристаллической структуры (размер ОКР, плотность дислокаций, относительная средняя микродеформация, параметр решётки) выбираются линии двух порядков отражения от одной плоскости, которые для надёжной регистрации имеют достаточную интенсивность и не совпадают с другими отражениями

Пост микроконтроля МК-3Т. Общие сведения

Пост микроконтроля (рисунок 42) – измерительный комплекс на базе микроскопа МИ-1, предназначен для контроля и измерения структуры, состава и свойств металлов, сплавов при производстве в металлургии, входном контроле металлов в машиностроении.



Рис. 42. Пост микроконтроля МК-1

Заложенные в оптической составляющей микроскопа возможности, позволяют широко его использовать для анализа микроструктур сплавов.

Пост микроконтроля МК-3 оснащён качественной оптикой высшего класса с увеличенным полем наблюдения, что позволяет рассматривать исследуемые объекты без существенных потерь времени на поиск объектов при изменении увеличения. В соответствии с

поставленной задачей, объекты можно исследовать в светлом и тёмном поле, реализовав режим поляризационного контраста. Пост микроконтроля МК-3 позволяет осуществлять TV контроль и компьютерный анализ изображения.

Аппаратное обеспечение

Пост микроконтроля МК-3 состоит из следующих комплектующих:

- Компьютер
- Микроскоп МИ-1

Программное обеспечение

Поставляемое к посту программное обеспечение – SimpleIM. Рабочее окно программы представлено на рисунке 43

С помощью данного оборудования можно осуществлять следующие технологические операции:

- измерение геометрических размеров;
- измерение площади и процентного количества включений;
- подсчёт и измерение различных коэффициентов формы и распределения частиц;
- автоматизация измерений в зависимости от типа материала на изображении;
- специальные алгоритмы восстановления границ зёрен для однофазных и многофазных материалов;
- вычисление относительной однородности материала с помощью функции Измерение однородности;
- возможность быстрого создания отчётов о результатах эксперимента на основе сохранённых шаблонов;
- отображение подробной статистической информации в виде таблиц и гистограмм;
- представление данных и форматирование изображений в стандартизованном формате.

Данные измерений для ASTM-стандартов представляются в формате, совместимом с промышленными стандартами.

Программа анализа изображений NEXSYS. Компания «Новые экспертные системы» является разработчиком специализированного программного обеспечения NEXSYS ImageExpert™, которое состоит из нескольких самостоятельных программ для работы с микроструктурами. Так же этот пакет используется и в других областях исследований, таких как медико-биологических или экологических, научных

исследований в области твёрдого тела, жидкостей или плазмы, и многие другие задачи.

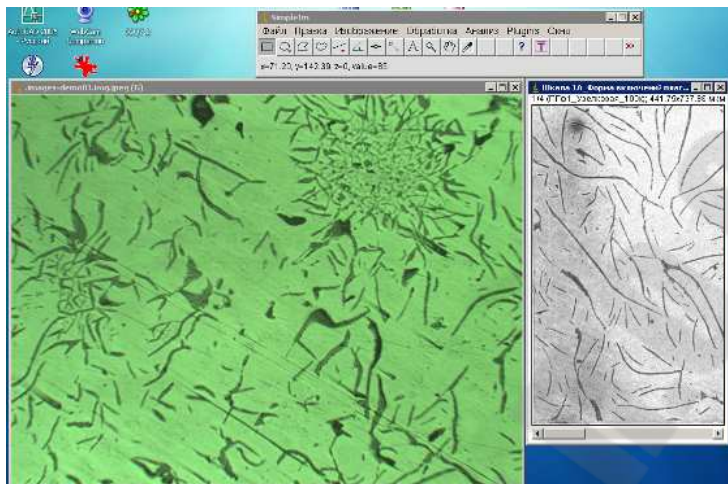


Рис. 43. Рабочее окно программы SimpleIM

NEXSYS ImageExpert™ Pro 3. Этот программный продукт предназначен для количественного анализа изображений. Широкий набор функций по обработке изображений и выделению интересующих структурных элементов позволяют использовать анализатор для решения широкого круга задач. Наличие оптимального набора инструментов намного упрощает применение ручных операций. На стадии предварительной обработки он позволяет, к примеру, восстановить резкое изображение из ряда частично-резких, устранить дефекты освещённости шлифа, усилить чёткость мелких деталей. Для выделенных объектов на изображениях рассчитывается несколько десятков количественных параметров, при этом их подборка и точность вывода настраиваются пользователем под конкретные виды анализа. Полученные количественные данные формируются и представляются в соответствии с требованиями российских и международных стандартов. Отчёты формируются в среде текстового редактора Microsoft Word. Рабочее окно программы изображено на рисунке 44.

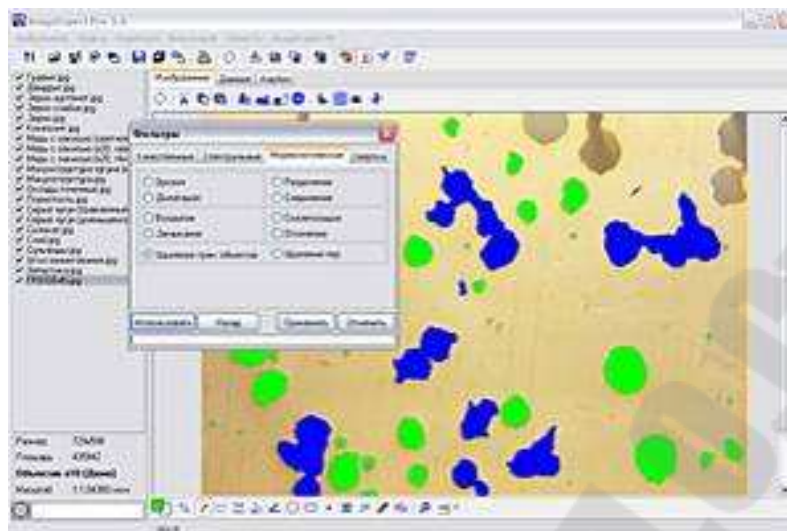


Рис. 44. Окно программы NEXSYS ImageExpert™ Pro 3

NEXSYS ImageExpert™ Sample 2. Данное программное обеспечение предназначено для качественного анализа изображений и ориентировано на анализ структур посредством сравнения с эталонами. Изображения с камеры напрямую поступают в программу анализа, затем автоматически масштабируются и пользователь назначает каждому полю зрения балл, сравнивая с эталонами в правой части программы, пролистывая их один за другим. На основе полученной статистики формируется автоотчёт в Microsoft Word, включающий название шкалы стандарта, изображение, баллы по полям зрения, гистограмму и таблицу, общую статистику и вывод, а также подпись оператора.

Также, в данной программе, пользователи имеют возможность ввести в анализатор требуемые стандарты самостоятельно, и при необходимости дополнительно приобретать комплекты эталонных шкал у производителя. Рабочее окно программы изображено на рисунке 45.

NEXSYS ImageExpert™ MicroHardness 2. Данная программа является продолжением новой технологии ImageExpert™ третьего поколения и предназначена для измерений микротвёрдости фазовых структурных составляющих и для получения распределения микротвёрдости по толщине, например химико-термически обработанных слоёв. Программа позволяет получать изображения отпечатков с цифровых или аналоговых видеокамер в реальном времени или загружать полученные ранее изображения из файлов. Проведение предварительной калибровки аппаратно-программного комплекса позволяет получать адекватные значения микротвёрдости. Методика анализа

производится в полном соответствии с ГОСТ 9450–76 «Измерение микротвёрдости вдавливанием алмазных наконечников» по методу восстановленного отпечатка. Рабочее окно программы изображено на рисунке 46.

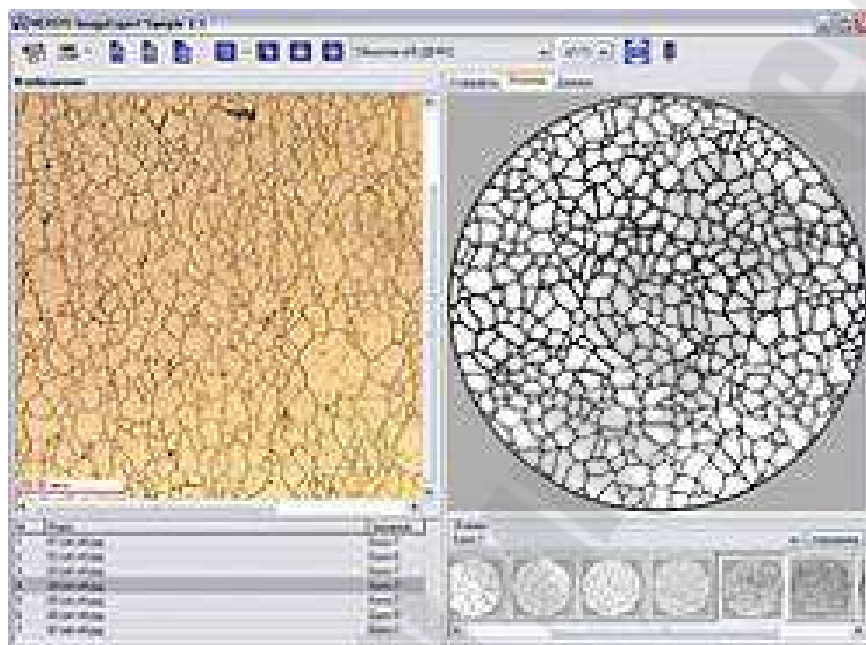


Рис. 45. Окно программы NEXSYS ImageExpert™ Sample 2

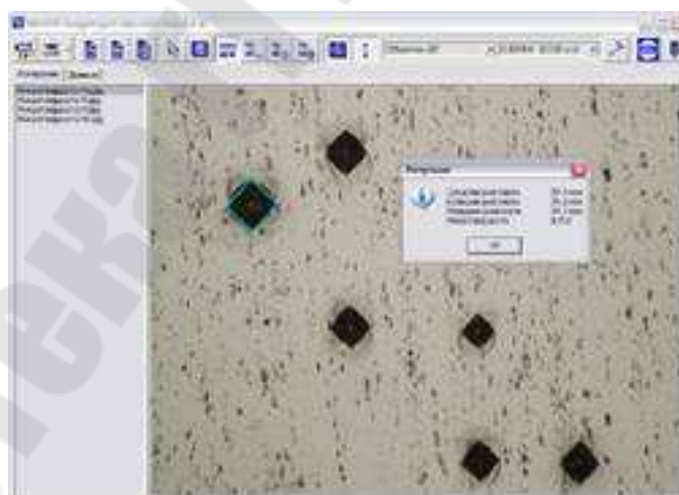


Рис. 46. Окно программы NEXSYS ImageExpert™ MicroHardness 2

NEXSYS ImageExpert™ Gauge. Данная программа предназначена для получения изображений анализируемых структур и материалов, наблюдаемых в микроскопе, с проведением оператором простых геометрических измерений элементов структуры в реальных физических единицах.

Мастер съёмки, встроенный в программу, работает с широким спектром аналоговых и цифровых видеокамер. Пользователь, ведя съёмку в «живом» времени, имеет возможность сохранять отдельные её кадры. Для удобства оператора реализована возможность ступенчатого масштабирования для режима отображения видео и для сохраняемых изображений. Анализатор поддерживает наиболее популярные графические растровые форматы: bmp, jpg, gif, tif, psx, pcd, psd. Полученные изображения могут быть сохранены или распечатаны на принтере. Для загруженных изображений можно получать такие геометрические параметры, как линейная длина; значения углов определяемых по трём точкам или по двум не пересекающимся отрезкам; параметры окружности определяемой по трём точкам на её границе; параметры выпуклого четырёхугольника, определяемого по четырём точкам в углах фигуры. Рабочее окно программы изображено на рисунке 47.

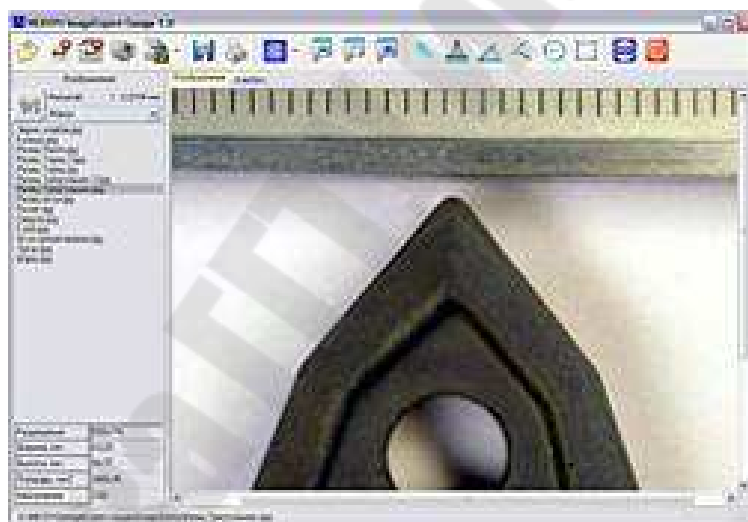


Рис. 47. Окно программы NEXSYS® ImageExpert™

Программа анализа SW Complex Analysis. Общие сведения. Программное обеспечение SW Complex Analysis предназначено для качественной и количественной оценки неоднородностей, возникающих во время эпитаксиального роста полупроводниковых структур методом МОСГФЭ. Использование данного программного обеспечения помогает оптимизировать параметры роста с целью значительного сокращения необходимого времени и материальных затрат при калибровке реактора перед выводом его на проектную мощность и при периодической эксплуатации.

Решаемые задачи:

- Построение карт сопротивления пластин: анализ однородности легирования;
- Обработка и визуализация данных, получаемых с установки фотолюминесценции: карты фотолюминесценции и отражения на белом свете брэгговского зеркала;
- Объединение данных по отдельным пластинам в единую структуру подложноносителя;
- Построение радиальных сечений исходных данных (линейных профилей) как пластин, так и всего подложноносителя;
- Количественный анализ неоднородности: статистический анализ данных.

Помимо главных задач, связанных с контролем качества роста полупроводниковых структур и оценки неоднородности, возникающей во время МОСГФЭ, программа может открывать, анализировать и отображать в 3D текстовые файлы с массивом вершин, а также проводить количественный анализ яркости (и построение трёхмерного профиля) изображений по четырём моделям расчёта светимости. В программу также включён инструмент для визуальной оценки длины волны светящегося объекта по его фотографии.

Анализ приведённых программ подтверждает возможность их использования для оценки структурных параметров структуры железоуглеродистых сплавов с вероятным прогнозированием их свойств и контроля качества. Рабочее окно программы изображено на рисунке 48.

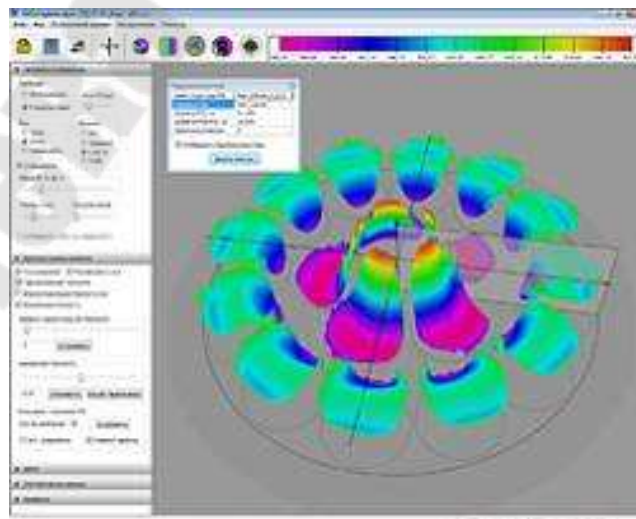


Рис. 48. Окно программы SWComplexAnalysis

Программа анализа изображений «Thixomet® Pro». Общие сведения. Программа анализа изображений «Thixomet® Pro» специально разработана для решения многих задач в металлургии и материаловедении. В программе анализа изображений происходит по различным методикам и стандартам. Данная программа прошла метрологическое освидетельствование как средство измерения.

Оценка среднего размера зерна

Оценка среднего размера зерна происходит по следующим стандартам: ГОСТ 5639–82, ГОСТ 21073–75, ASTM E1382, ASTM E112, DIN 50 601.

В этих модулях производится автоматическое распознавание границ зёрен, а средний размер зерна рассчитывается по найденному числу зёрен и площади, которую они занимают. С помощью специальных инструментов можно реконструировать плохо протравленные границы, исключить из анализа мелкие выделения второй фазы и др.

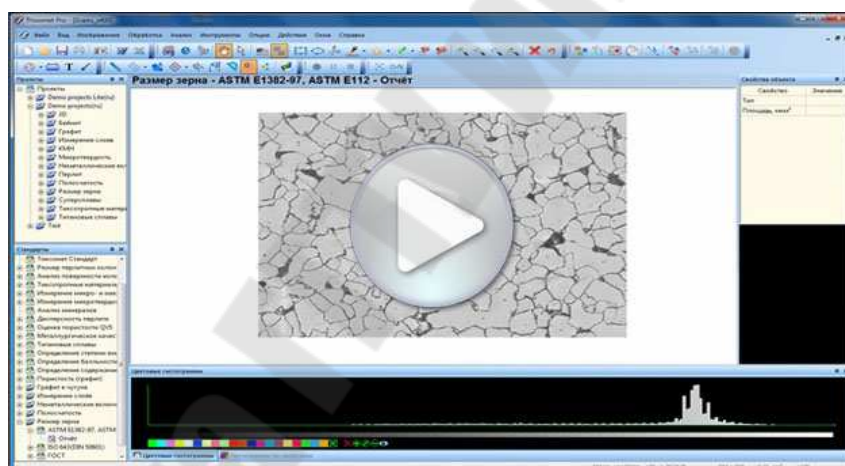


Рис. 49. Оценка среднего размера зерна.

Оценка загрязнённости стали неметаллическими включениями осуществляется по ASTM E1245, ГОСТ 1778–70, DIN 50602. На основе стереологических соотношений определяются все важнейшие параметры неметаллических включений или второй фазы: объёмная доля, размер и характер взаимного расположения. Назначение балла производят по измеренной объёмной доле для каждого типа включений на основе известной градуировочной кривой «балл-объёмная доля». Производится разделение включений на типы, предусмотренные стандартами, поиск наиболее загрязнённого поля или подсчёт количества полей определённого загрязнения для каждого типа включений.

ний в зависимости от выбранного метода. Рабочее окно методики изображено на рисунке 50.

Измерение слоёв и покрытий. Определение глубины обезуглероженого слоя происходит в режиме «от поля к полю» или «от панорамы к панораме» в автоматическом или ручном. В автоматическом режиме распознаются кромки образца и границы зон обезуглероживания. С помощью инструментов тонкой настройки можно задавать требуемое соотношение «феррит-перлит», по которому будет определена граница обезуглероживания. Также присутствует возможность рассчитывать соответствующие средние значения, вести статистику измерений и проводить измерения многослойных структур. Рабочее окно методики изображено на рисунке 51

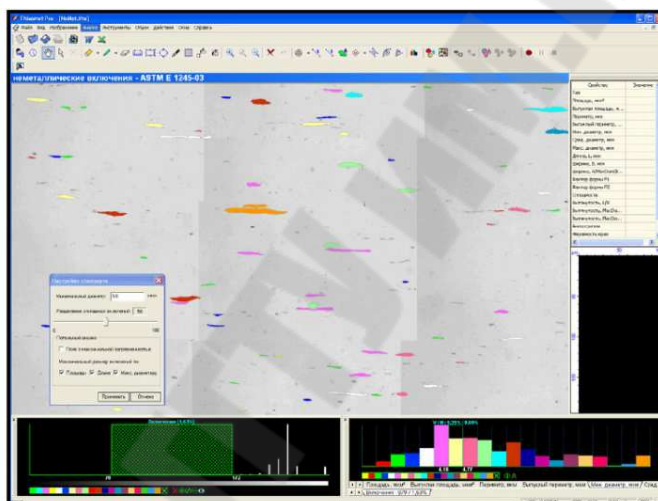


Рис. 50. Оценка загрязнённости стали неметаллическими включениями

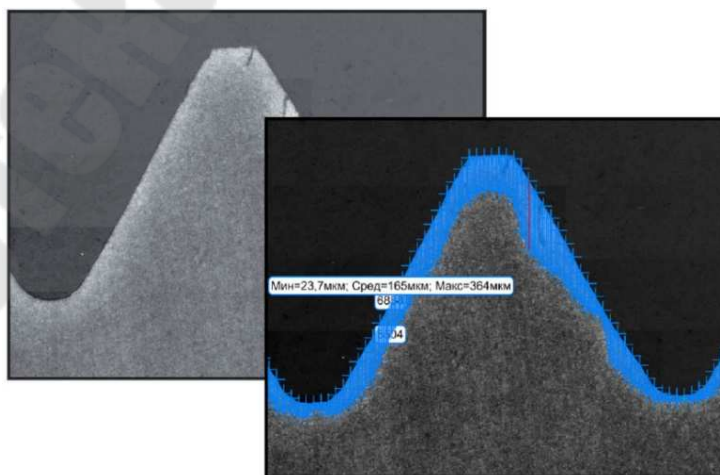


Рис. 51. Обезуглероженный слой на поверхности зуба фрезы.

Автоматизация измерений твёрдости

Данный модуль используется для автоматизации измерения микро- и макро – твёрдости по Виккерсу, Кнупу или Бринеллю.

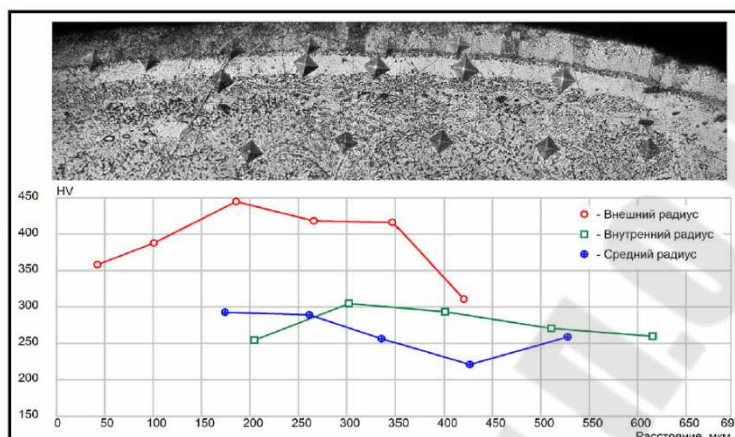


Рис. 52. Распределение микротвёрдости по глубине.

Распознавание отпечатков индентора производится автоматически с возможностью коррекции результатов распознавания, либо вручную, с помощью специального измерительного инструмента. Рабочее окно методики изображено на рисунке 52.

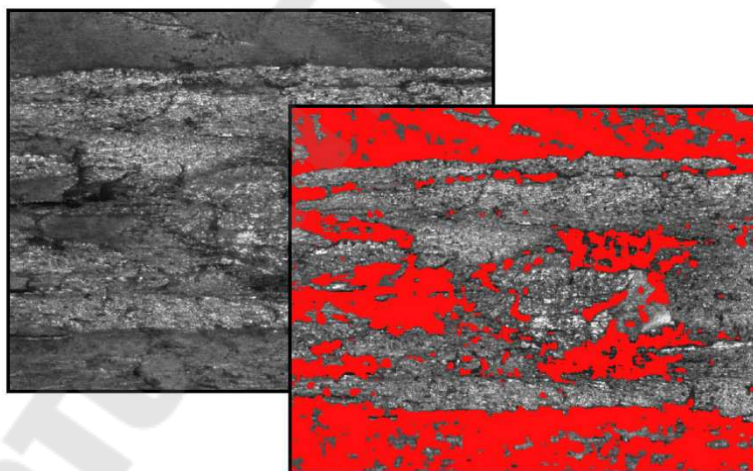


Рис. 53. Поверхность разрушения образца с участками вязкого и хрупкого разрушения

Анализ поверхности изломов.

Анализ поверхности изломов производится методами текстурного анализа, где распознаются области вязкого или хрупкого излома образцов после испытаний на ударную вязкость или падающим гру-

зом. Исследуются предварительно созданные панорамные изображения, улучшенные с помощью алгоритма расширенного фокуса.

Рабочее окно методики изображено на рисунке 53.

Методы сравнения с эталонами

В данном модуле оценка микроструктур производится методом сравнения с эталонами, где полупрозрачные изображения которых накладываются на изучаемое изображение микроструктуры. По результатам сравнения происходит расчёт статистических параметров и формируется отчёт. Имеется базовый набор стандартных шкал, которые возможно неограниченно расширять пользователю.

Определение структурной полосчатости стали

Методика «ВНИИСТ» предназначена для определения структурной полосчатости с помощью баллов соответствующей шкалы, аналогичной ГОСТ 5640–68, но для структуры «феррито-бейнитной». Шкала построена по принципу увеличения количества полос второй фазы с учётом их сплошности и степени вытянутости ферритного зерна. Для тонкой настройки методики используется алгоритм восстановления плохо протравленных границ зёрен. Полосчатость в соответствии с требованиями этого стандарта описывается словесно. Рабочее окно методики изображено на рисунке 54.

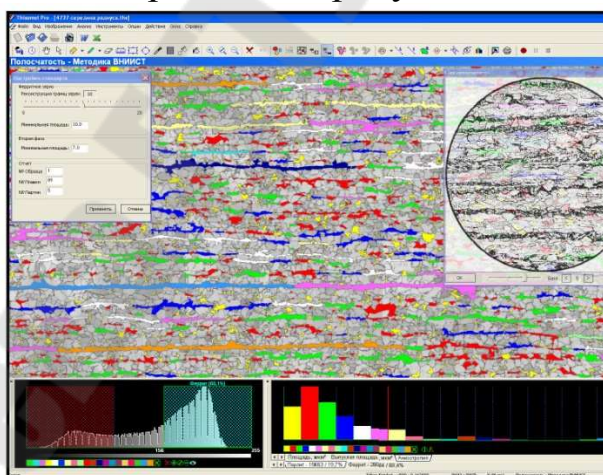


Рис. 54. Определение структурной полосчатости стали

Оценка микроструктуры перлита

Данный модуль разработан для оценки размера зёрен перлита и его колоний, а также для определения соотношения структуры «перлит-феррит» в стали. Для распознавания колоний перлита используется метод выделения границ по перепадам яркости, а также их реконструкция по морфологии. По результатам измерений формируется отчёт с процентным соотношением «перлит-феррит» и баллом пер-

литных колоний, назначенным по аналогии с оценкой размера ферритного зерна по ГОСТ 5639.

Также в этом модуле доступны настройки для отделения феррита от цементита в перлите для анализа перлита различной степени дисперсности.

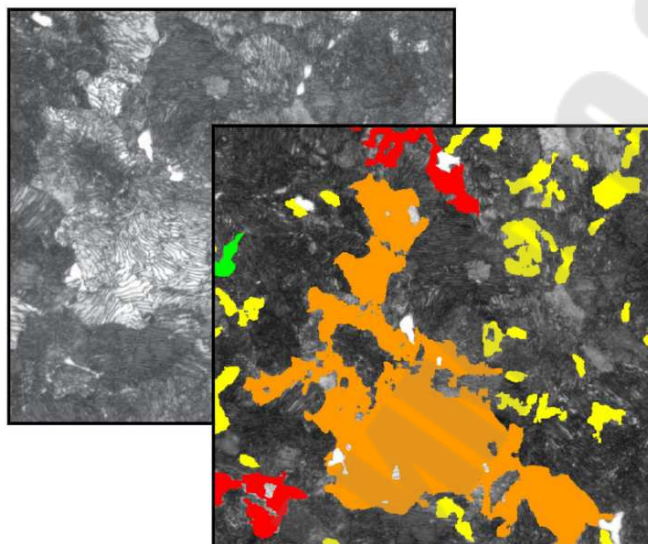


Рис. 55. Оценка микроструктуры перлита

Экспорт продуктов в MSOFFICE. Полученные результаты, изображения, их фрагменты в оригинальном или распознанном виде, калиброванные изображения с микронной линейкой или маркером, результаты измерений метрических параметров объектов изображения возможно экспортировать в приложении MSOFFICE для формирования индивидуальных отчётов.

7. НОВЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Выдвижение новых производственных технологий НПТ (как единого комплекса технологий) в качестве одного из ключевых технологических приоритетов в ряде развитых стран произошло в 2010–2012 гг. и способствовало появлению новых исследований по изучению причин, содержания и перспектив развития новых технологий. Тем не менее до настоящего времени не выработано общепринятого определения НПТ.

Наиболее широко используется понятие «передовое производство» (*advanced manufacturing*), введённое Национальной ассоциацией перспективных производственных технологий США (*National Association of Advanced Manufacturing, NACFAM*): «Передовое производство – это производство, в котором широко используются компьютерные, высокоточные и информационные компоненты, интегрированные с высокопроизводительной рабочей силой, которое создаёт систему, сочетающую преимущества массового производства, гибко настроенную на необходимый в данный момент объем выпуска и в то же время обладающую высокой степенью кастомизации с целью быстрого реагирования на потребности клиентов».

Помимо этого определения используются и другие. Можно привести следующие интерпретации понятия передового производства.

Передовое производство – это совокупность усилий, каждое из которых основывается на глубоком внедрении информационных технологий и передового программного обеспечения, автоматизации производственных процессов, высокоточных датчиков и сетей и/или использует новые материалы и те возможности, которые открываются благодаря научным достижениям в области физики, биологии, химии.

Передовое производство – это производство, основанное на улучшенных существующих и/или специально создаваемых новых материалах, изделиях и процессах, полученных посредством внедрения достижений науки, техники, высокоточных и информационных технологий, интегрированных с рабочей силой высокой производительности, инновационным бизнесом или организационными моделями.

Таблица 7

Основные сегменты и примеры технологий, входящих в НПТ

Сегменты НПТ		Традиционные техника и технологии (примеры)	Новые техника и технологии (примеры)
Технологии организации и управления		Системно-инженерные подходы, LEAN	Интеллектуальное производство, альянсы, облачное производство
ИТ-системы, обеспечивающие поддержку ЖЦ продукции	Многомерное моделирование сложных изделий	CAD/CAE/CAM, PDM	CAx для аддитивных технологий, облачные технологии, M2M
	Интеллектуальные системы управления производством		
Оборудование и технологии для формообразования изделий		Станкостроение, оборудование для обработки пластмасс и проч.	Аддитивное производство, лазерная обработка
Оборудование и технологии для автоматизации производственных процессов		Реле, переключатели, сенсоры, силовая электроника	Промышленная робототехника, сенсорные системы
Передовые материалы, используемые для новых производственных процессов		Металлы, пластик	Композиционные материалы, металлы, керамика и др.

Мировые рынки, связанные с развитием НПТ, существенно различаются как по масштабам, так и по темпам роста. Так, рынок аддитивных технологий характеризуется относительно малыми объемами (15 млрд долл.), но быстрыми темпами прироста (более 20%), в то время как рынок программных продуктов для разработки предметов производства по объемам составляет около 30 млрд долл., но в последние годы демонстрирует средние темпы прироста на уровне 7%.

2020-й год стал серьёзной встряской для всей мировой промышленности, да и для каждого из нас. Но есть и хорошие новости: глобальный кризис помог высветить преимущества 3D-технологий. Пришло чёткое понимание того, что аддитивное производство способно оперативно справляться с трудностями, которые связаны с простоями предприятий и логистическим коллапсом, и может стать для бизнеса катализатором роста. Посмотрим, как растёт рынок 3D-печати, что прогнозируют аналитики и какие тенденции определяли состояние 3D-индустрии в 2020 году.

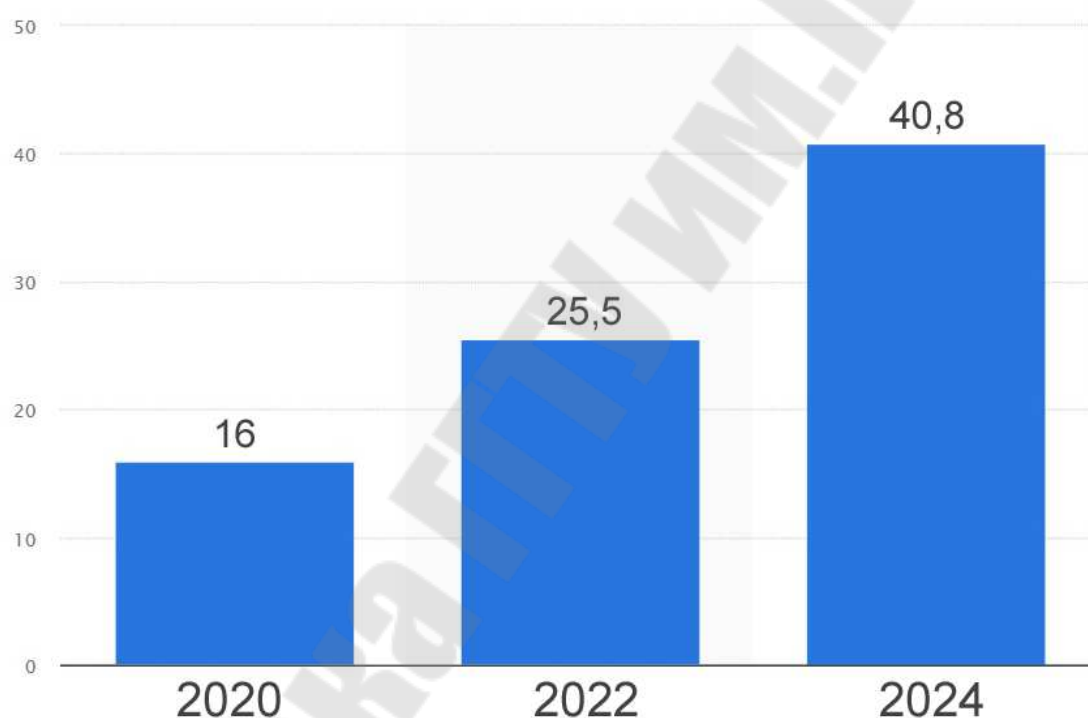


Рис. 56. Рост рынка продуктов и услуг 3D-печати в 2020–2024 гг. в млрд долларов США

Робототехника. В 2013 г. объем мирового рынка промышленной робототехники оценивался в 9,5 млрд долл., а уже к 2020 – в 34 млрд долл. А если учитывать смежные рынки (рынки ПО для робототехники, периферийное оборудование и др.), то объем мирового рынка робототехнических систем в 2013 г. составлял порядка 29 млрд долл.

Динамика производства промышленных роботов в мире на протяжении последнего десятилетия была неустойчивой – во второй половине 2000-х гг. рост практически отсутствовал, в первые посткризисные годы на рынке наблюдался быстрый рост (с небольшой корректировкой в 2012 г.).

С точки зрения отраслевой структуры потребления промышленных роботов на первом месте с большим отрывом идёт автомобилестроительная отрасль, за ней – отрасль по производству электроники / электротехники.

Что касается географических регионов, Азия и Австралия являются наиболее быстрорастущими в мире рынками промышленных роботов. В 2019 году на эти регионы приходилось более 67% рынка промышленной робототехники. Основными драйверами этого роста является спрос на промышленных роботов со стороны малых и средних предприятий в Китае, Японии, Южной Корее и Индии. С 2013 года Китай является крупнейшим рынком роботов в мире и продолжает динамично расти. На пять основных рынков, включая Китай, Японию, Республику Корея, США и Германию, приходится около 75% от общего объёма продаж робототехники в 2019 году. Европа является вторым ведущим регионом по рынку промышленной робототехники, за ней следует Америка.

Композиционные материалы. Мировой рынок композитов (композитные / композиционные материалы) в последние годы динамично развивается: по оценкам международных экспертов мировой рынок композитов (рисунок 57) в 2016 году составил более 82 млрд долл. в стоимостном выражении и около 11 млн. тонн в натуральном выражении. В период до 2022 года рынок композитов будет расширяться на 8% в год и по стоимости возрастет до 115,43 млрд долл.

Высокие темпы развития рынка композитов определяются широким спектром их свойств, превосходящих свойства традиционных материалов. Композитные материалы очень устойчивы к внешним воздействиям, поэтому пригодны для использования там, где необходима устойчивость к высоким температурам, коррозии или большим нагрузкам. Композитные материалы являются прекрасными электроизоляционными материалами при использовании как переменного, так и постоянного тока. Использование определенных наполнителей позволяет получать композиционные материалы, стойкие к различным агрессивным средам, в том числе и к воздействию концентриро-

ванных кислот и щелочей. Композиты обладают высокими механическими свойствами и т.д.

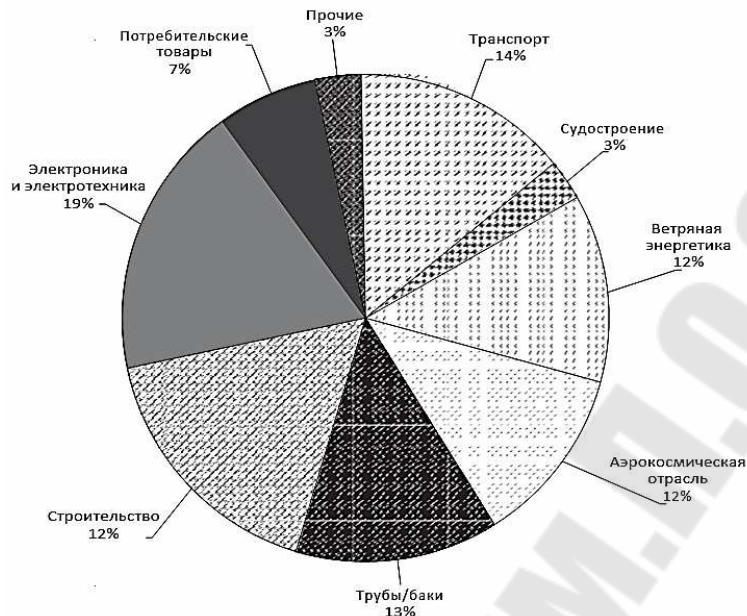


Рис. 57. Отраслевая структура мирового рынка композиционных материалов.

Мировой рынок программных продуктов для разработки предметов производства (в структуре, представленной компанией CIMdata) оценивался в 2020 г. приблизительно в 42 млрд долл. Основная часть рынка приходилась на различные инженерные ПО (CAD/CAM/CAE). Наиболее быстро росли CAM, CAE и PDM сегменты рынка PLM (рисунок 58).

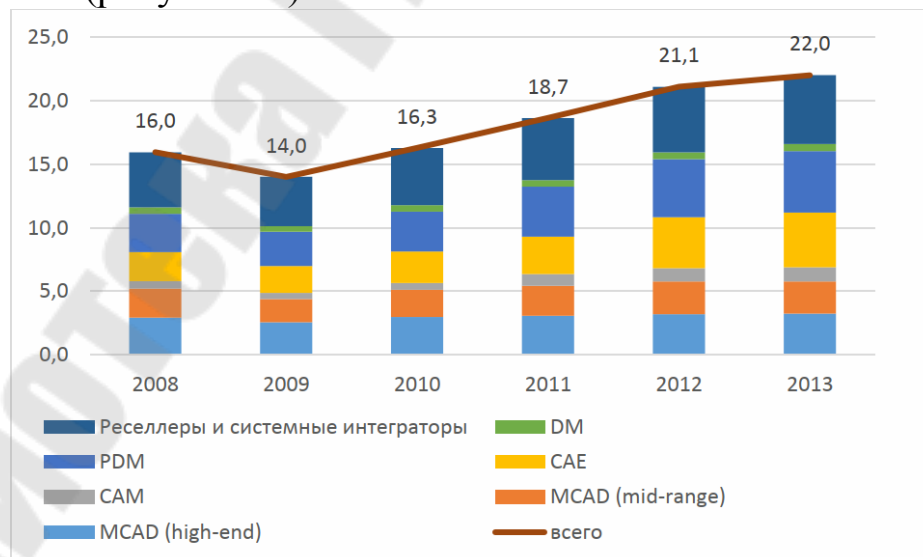


Рис. 58. Динамика и структура мирового рынка программных продуктов для разработки предметов производства, млрд долл.

Несмотря на то что рынок PLM в 2012 – 2019 гг. демонстрировал средние темпы прироста – 7%, темпы прироста в сегментах САМ и САЕ были существенно выше – 18–21%.

Изменения в обрабатывающей промышленности

Изменение облика обрабатывающей промышленности происходит на трех основных взаимосвязанных уровнях:

- на макроуровне (глобализация, регионализация, локализация производственных цепочек);
- на микроуровне (изменение бизнес-моделей: опора на эффект масштаба, «бережливое» производство, модель жизненного цикла изделия, кастомизация продукции и проч.);
- на уровне технологий (автоматизация и роботизация производства, использование новых материалов и проч.).

Внедрение новых методов и подходов к управлению производством, развитие информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) параллельно с процессами глобализации производственных цепочек в 1970–2000-х гг. существенно изменили облик обрабатывающей промышленности. Широкое применение на практике концепций жизненного цикла, «расширенных предприятий», системно-инженерных методов фактически изменило парадигму разделения труда. Началось формирование распределённых производственных цепочек сложной конфигурации, ориентированных на «бережливое» производство, использование дешёвых ресурсов по всему миру и выполнение жёстких стандартов качества. Вследствие процесса глобализации происходил перенос из развитых стран в развивающиеся производственных мощностей, технологий, компетенций и определенного слоя технологических компаний, занимавшихся обслуживанием непосредственно производства.

Мировой экономический кризис 2008–2009 гг. резко обострил сформировавшиеся в предыдущие десятилетия противоречия, связанные с происшедшим реформатированием обрабатывающей промышленности, в рамках которого основные производственные мощности оказались сконцентрированы в развивающихся странах (прежде всего в странах Юго-Восточной Азии, в частности в Китае), а технологии, ключевые компетенции и соответственно основная часть прибыли – в развитых странах. Постепенно компании новых индустриальных стран стали вытеснять с рынков традиционных лидеров, и как следствие в начале 2010-х гг. в США и ЕС на первый план вышла идея о необходимости реиндустриализации национальных экономик

на основе новых производственных технологий с целью повышения их конкурентоспособности.

Мотивации стран к развитию новых производственных технологий тем не менее разные. Для США это необходимость укреплять лидерские позиции, понимание того, что политика вывоза производств за пределы страны не оправдала себя и могут быть потеряны важные компетенции. Поэтому для США одно из ключевых направлений действий – это рещоризация, или возврат, производственных мощностей в страну, размещение их вблизи центров НИОКР.

Для стран Западной Европы основной целью является сохранение лидерских позиций по ряду сегментов на высокотехнологичных рынках в условиях активного развития производственных технологий в США и Китае. Китай, в свою очередь, ставит задачу развития новой индустрии для того, чтобы в большей мере опираться на собственные силы.

Важным фактором, способствующим процессу реиндустриализации развитых экономик, становится развитие НПП, позволяющих перейти на новые бизнес-модели, основанные на кастомизации продукции.

Кастомизация обеспечивается за счёт ускорения и удешевления разработки новых моделей и типов продукции на базе новых технологий (например, технологий 3D-печати), а также организации гибких производственных систем, оперативно реагирующих на изменение рыночных потребностей. Она повышает роль аутсорсинга и потому малых и средних инновационных компаний в производственных цепочках. Средние компании становятся важными узлами кастомизированного производства.

С инфраструктурной точки зрения подобные изменения в производственных цепочках находят отражение в том, что растёт число компаний, оснащённых высокотехнологичным оборудованием и ориентированных на выполнение мелкосерийных заказов (так называемые фаблабы, джобшопы, воркшопы), в том числе для инновационных фирм, которым требуется быстро и недорого изготавливать пробные партии продукции (рисунок 59). Так, в США на долю подобных компаний в настоящее время приходится около 35% всего рынка металлорежущего оборудования. Такие компании формируют своеобразную технологическую инфраструктуру для малого и среднего инновационного бизнеса. Создание сети оказывающих услуги компаний позволяет снизить инвестиции со стороны инновационных малых

и средних предприятий и повысить загрузку технологического оборудования за счёт заказов со стороны внешнего рынка.

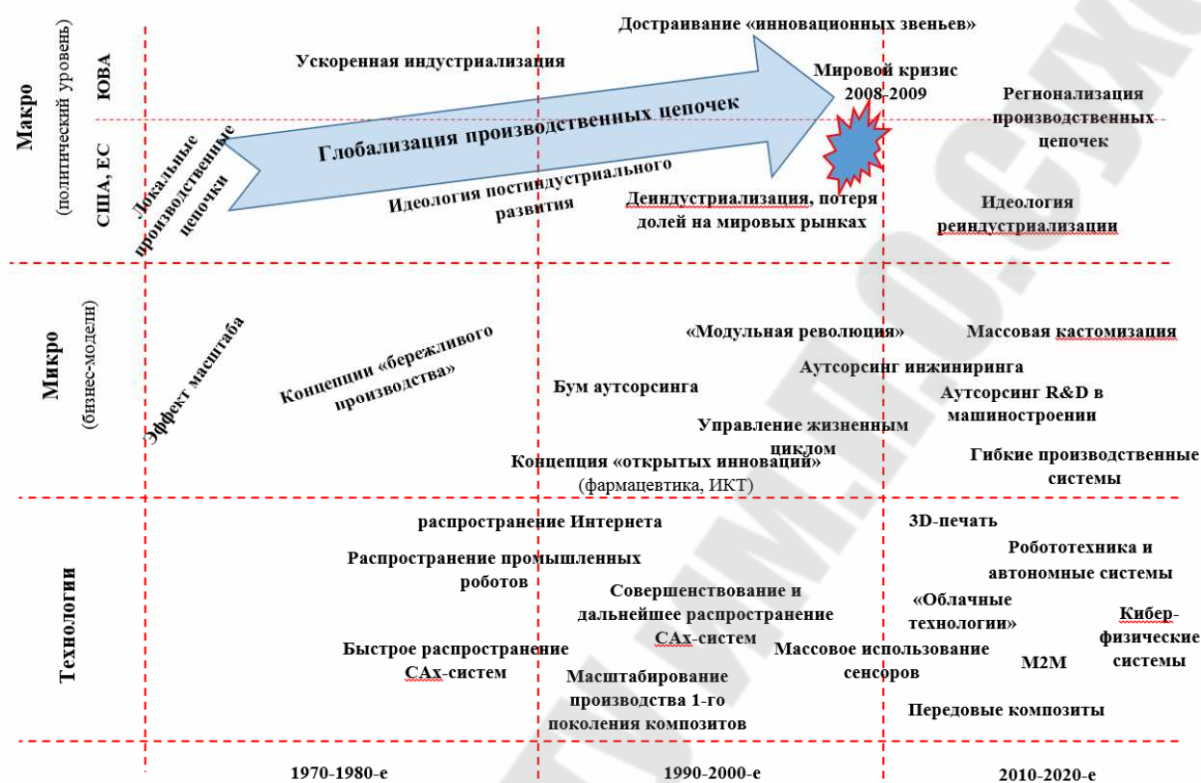


Рис. 59. Эволюция облика обрабатывающей промышленности

Современные направления и результаты развития технологий организации производства и управления им. Международная практика показывает, что для успешного решения проблем в управлении производством в последние десятилетия реализуется концепция расширенного предприятия, применяются системно-инженерные подходы и специальные методологии (например, Defense Acquisition System, – управление заказом и приобретением).

Все эти концепции и подходы рассматривают изделия / объекты как единую сложную систему, а предприятия-кооперации – как единый производственный комплекс, обеспечивающий весь жизненный цикл изделия / объекта / системы (разработку, производство, поддержку эксплуатации и утилизацию) в тесном взаимодействии с организациями заказчика.

Во-первых, такая логика создаёт производственно-технологическую основу интеграции предприятий в кооперацию и управления ими на новых принципах. Именно использование этих принципов обеспечивает эффективность разработки и производства.

Это аналогично тому, как финансовая и акционерная основы используются для объединения предприятий в холдинговые структуры (или другие типы юридического оформления) и для корпоративного управления.

Во-вторых, системно-инженерные подходы предполагают применение ряда правил или регламентов, повышающих эффективность производственных процессов. Эти приёмы многократно проверены на практике и описаны в соответствующих стандартах. Они касаются прежде всего систематизации всех требований к характеристикам изделий / объектов со стороны заказчика, постоянного доведения этих требований до всех участников кооперации, регулярного контроля реализации требований в проектных решениях, процедур внесения изменений в проектные решения по изделию / объекту / системе, контроля структуры, основных и альтернативных проектных решений, рисков и себестоимости изделия / объекта / системы, широкого использования междисциплинарного моделирования.

В-третьих, специальные методологии управления заказом обеспечивают эффективный контроль над реализацией сложных технологических программ в условиях высокой технологической неопределённости. Проектные программы создания новых образцов изделий / объектов не могут быть «куплены готовыми» – в них всегда присутствует большая доля НИР, следовательно, большие технологические риски и ни один подрядчик не сможет реализовывать такую программу как многократно повторенную с известными проблемами и рисками. Это затрудняет управление стоимостью таких программ: на практике невозможно использовать контракты с фиксированной ценой. Несмотря на различные юридические форматы взаимоотношений между заказчиком и кооперацией исполнителей, практически всегда реализуется принцип «затраты+» (часто путём обоснованного пересмотра контрактных обязательств), что отражает объективную экономико-технологическую основу таких программ. Однако при таких условиях исполнители не заинтересованы в повышении эффективности своей работы, что приводит к необоснованным расходам. Поэтому контроль «результат против затрат» со стороны заказчика приобретает ключевое значение. Фактически заказчик в такой программе вынужден нести наиболее существенные технологические и проектные риски. Специальные методологии управления заказом как раз и разработаны для решения этих задач.

В-четвертых, все большее значение приобретает сочетание инженерных и экономических подходов прежде всего в части анализа затрат и оценивания эффектов на всем жизненном цикле сложного изделия или объекта. Современные зарубежные практики интегрируют отдельные предприятия – юридические лица в расширенные предприятия «вдоль жизненного цикла изделия / объекта», а также сосредотачивают в одном «центре» и технические, и экономические, и организационные способы управления. При этом особое внимание уделяется максимально возможной унификации и стандартизации производственных процессов как основы обеспечения высокого стабильного качества, контролируемых сроков и себестоимости. Регламентируются не только рутинные процессы массового производства, но и процедуры создания новых изделий, материалов, технологий (стандарты и подходы Product Development Process широко обсуждаются в специальной литературе и внедряются в ведущих компаниях).

В-пятых, информационно-технологические системы заняли особое место в производственном управлении: они стали совершенно необходимым инструментом, который обеспечивает и быстрый и удобный информационный обмен, и объединение участников кооперации, находящихся на существенном географическом удалении, и возможность хранения больших массивов информации об изделиях (объектах) с вариантами и возможностью удобного доступа, и многое другое. Развитие ИТ обеспечило существенный прогресс в следующих трех направлениях:

1. Замена кульмана и рейсшины. CAD-, CAM-, CAPP-системы кардинально облегчили и ускорили проектные и конструкторские работы прежде всего за счёт массовой автоматизации рутинных, относительно простых, но трудоёмких операций.

2. Замена логарифмической линейки. Появилась возможность получения «тотальных дешёвых инженерных расчётов и моделирования»: стало возможным моделировать суперсложные объекты, например свойства веществ и материалов (direct numeric simulation и аналогичные подходы), «дёшево» моделировать массовые предметы, «сначала все проверить на модели, а потом отлить в металле», или «сам нарисовал – сам быстро сделал». Развитие технологий быстрого прототипирования (аддитивных и аналогичных им) ускорило этот тренд.

3. Слом организационных границ внутри кооперации. В результате глубокой интеграции рабочих мест и производственных единиц

путём внедрения сквозных производственных процессов и единых стандартов представления данных возникли географически распределённые «расширенные предприятия» и виртуальные рабочие группы, внутри которых практически отсутствуют границы между организационными единицами. Дальнейшим развитием таких форм кооперации и организации производства являются «облачное производство», «производство как сервис» и т. п.

Целевая интегрированная архитектура ИТ-средств, поддерживающих процессы начальных стадий жизненного цикла изделий (объектов) от концепции до запуска изделия в производство (передачи объекта в эксплуатацию), может быть представлена в следующем виде (рисунки 60, 61). Интегрированные таким образом ИТ-средства вместе с производственными процессами, данными об изделии (объекте) и эксплуатирующими их сотрудниками образуют систему управления проектированием / конструированием. Ядром такой системы является полная электронная структура и модель изделия (объекта)

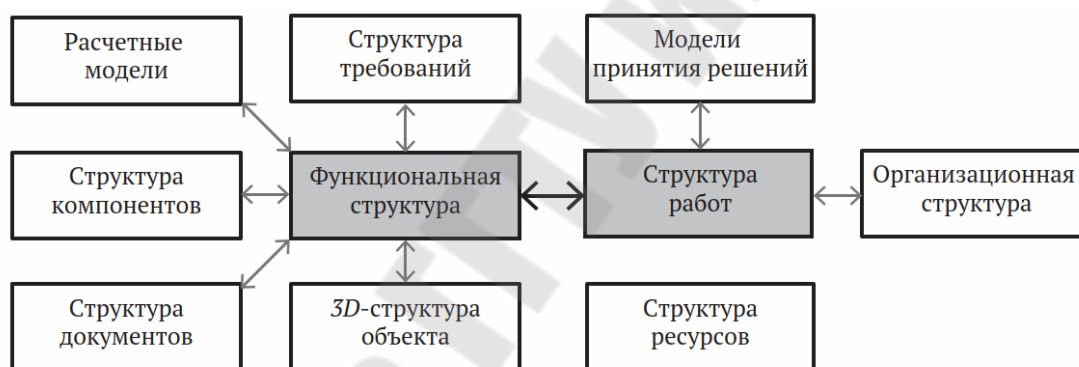


Рис. 60. Структуры основных моделей и данных об изделии (объекте).

Важно отметить, что на отечественных предприятиях современные ИТ-средства внедрены достаточно широко и замена кульмана и рейсшины, как и логарифмической линейки, во многих случаях произошла. Однако из-за массовой фрагментарности бизнес-процессов организационные барьеры сохранились не только в рамках кооперации, но и внутри отдельных предприятий, особенно если они имеют несколько производств в различных регионах, что и приводит к потерям эффективности производства в целом.

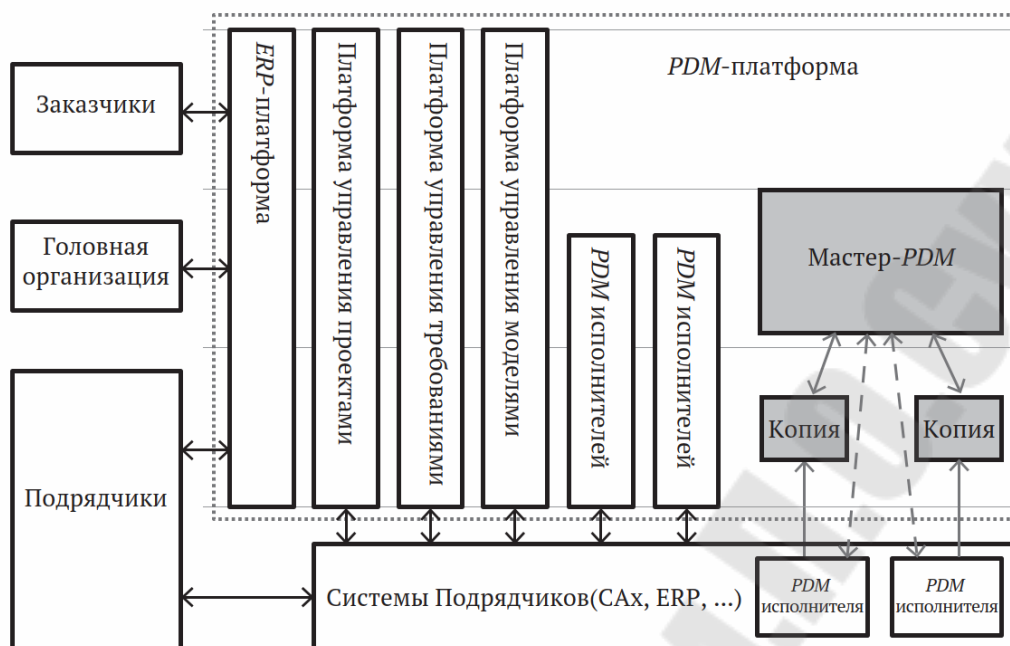


Рис. 61. Структура ИТ-платформ

В результате развития современные системы ОУП компаний – индустриальных лидеров, таких как Boeing, Lockheed – Martin, BAЕ, General Dynamics, Raytheon, BMW, Toshiba, реализуют и используют:

1) системно-инженерные подходы:

- концепции жизненного цикла (ЖЦ) и управления жизненным циклом продукта / объекта / системы (Product Lifecycle Management, PLM), в том числе «ворота принятия решений» (Decision Gates); планирования и контроля ресурсов, затрат, финансовых результатов, рисков на всех стадиях ЖЦ изделия / объекта / системы, например Total Ownership Cost, Total Cost Management; управления сроками эксплуатации изделий / объектов / систем;

- управление требованиями, конфигурацией, изменениями, параллельное проектирование, виртуальные рабочие группы и их совместную работу, накопленный опыт и наработки;

2) модульность, платформы, крупноблочную сборку и монтаж;

3) модели- и датацентричность;

4) управление проектными программами и проектами в целом, а также различные расширения;

5) концепции расширенного предприятия, интеграцию данных и процессов;

6) универсальные формализмы представления данных, такие как язык представления сетевых онтологий OWL, стандарт представ-

ления CAD-данных STEP NC, средства описания объектов стандарта ISO 15926;

7) концепции «непрерывных улучшений» – TQM, LEAN и др.;

8) принципы безбумажного документооборота (текстовый оборот исключён);

9) управление online: отчётность, перепланирование, формирование производственного задания, закрытие периода и другие операции выполняются нажатием одной кнопки, почти автоматически, без привлечения сотрудников; выполнение операций регистрируется в системе online.

Специалисты практически всех развитых стран считают, что экономика находится на пороге четвертой промышленной революции в основном под влиянием развивающихся информационных технологий, сближающих и интегрирующих реальный, вещественный, и виртуальный, информационный, мир. Промышленность будущего будет характеризоваться:

- существенной индивидуализацией продукции при условии высокой гибкости крупносерийного производства;
- глубокой интеграцией потребителей и производителей в рамках сквозных процессов всего жизненного цикла и всей цепочки создания стоимости / потребительской ценности (value adding chain);
- связью процессов выпуска и сервиса продукции и формированием таким образом гибридных продуктов.

Проект Smart Manufacturing, инициированный рядом американских правительственных агентств и ведущих промышленных компаний, направлен на интегрирование в реальном времени и в рамках производственных сетей информации и данных, отражающих все аспекты требований, концепций, конструирования, проектирования, производства, логистики, эксплуатации, сервиса продукции, т. е. на создание «производственного интеллекта». Это достигается путём внедрения большого количества измерительных датчиков, объединения их сетями, сбора и обработки информации от них совместно с моделированием производственных и других процессов для выработки решений в режиме реального времени.

Если в течение последних нескольких десятилетий наблюдалась глобализация цепочек производителей с целью объединения функций производства, то сейчас возникает тенденция глобализации команд разработчиков продуктов. Сложность продуктов требует разнообразных компетенций разработчиков, что приводит к необходимости объ-

единения интернациональных, географически распределённых групп в рамках одной команды. Кроме того, включение региональных разработчиков позволяет оперативно и более точно реагировать на потребности локальных рынков. Следующие области выделяются как ключевые для обеспечения глобальной интеграции процесса разработки продуктов.

1. Управление САD-данными о продукте, сформированными в различных исходных САD-системах.
2. Управление данными о составе продукта (Bill of Material data).
3. Управление множеством конфигураций одновременно.
4. Управление глобальным распределённым процессом внесения изменений.
5. Управление совместной работой распределённых групп (collaboration capabilities).
6. Управление классификаторами состава изделия.
7. Управление поставщиками / субподрядчиками.

Первые четыре области связаны с формированием данных о продукте и управлением ими. Пятая область является критичной для обеспечения эффективной совместной работы заинтересованных лиц внутри компании, членов аутсорсинговых команд разработчиков и большого числа географически удалённых зарубежных поставщиков / субподрядчиков. Сбор и накопление исторических и актуальных данных об изделии, включая данные механических, электрических и других САD – систем, совершенно необходимы для выполнения разработок в срок и в рамках бюджета. Заключительные области (6-я и 7-я) являются ключевыми для управления рисками и стоимостью разработки и производства продукта.

Появляются новые формы кооперации и межорганизационного взаимодействия, такие как альянсы Virtual Enterprise.

Концепция «виртуального предприятия» (Virtual Enterprise) интенсивно развивается в последние годы. Существует много определений «виртуального предприятия» (ВП), например: ВП – это временная сеть независимых организационных образований, в том числе бизнесов и специалистов, которые работают на самопроизвольном основании для развития конкурентных преимуществ. Они вертикально интегрируются для объединения основных компетенций и функций в одну организацию.

В рамках общеевропейской программы исследований и технологических разработок выполняется целый ряд проектов, направлен-

ных на развитие концепции ВП, в рамках которых разрабатывается широкий круг тем – от законодательных основ ВП до поддерживающих программных продуктов.

Европейская промышленность характеризуется большой долей малого и среднего бизнеса. Соответственно для того чтобы развивать новые технологии и инновации, необходима сетевая «экосистема», объединяющая малый и средний бизнес для консолидации ресурсов и создания «критической массы».

Переход к «облачному производству» и «производству как сервису». Концепция «облака» предполагает, что пользователи переносят / передают в «облако» функции для последующего их использования по принципу «когда необходимо, плачу-пользуюсь» (pay-to-play architecture). Первоначально эта архитектура была отработана в ИТ-области, сейчас делаются попытки реализовать «облачное производство» и «производство как сервис» (MaaS).

Идея MaaS не сводится к аутсорсингу производственной функции, она рассматривается как путь реализации кастомизированного производства по заказу и тесно связана с организацией взаимодействия между производственными единицами и виртуальными предприятиями.

Проект The ManuCloud выполняется консорциумом европейских промышленных компаний и университетов также в рамках общеевропейской программы исследований с целью тестирования концепции сервис-ориентированных ИТ-средств в качестве платформы для сетей производственных предприятий, реализуя, таким образом, видение «облачного производства».

Результаты проекта позволят потребителю использовать возможности реконфигурируемых виртуальных производственных сетей на основе объединённых площадок, поддерживаемых специализированным программным обеспечением.

Один из образцов разрабатываемого в рамках проекта программного обеспечения предназначен для создания библиотеки «инкапсулированных» производственных сервисов с возможностями удалённого доступа. Основой станет высокоскоростная сеть передачи данных, соединяющая «микрофабрики» под управлением ИТ-средств моделирования, проектирования, планирования, технологической подготовки производства и т. д.

Интеграция цифровых производственных технологий с очень гибким операционным менеджментом обеспечит оперативный кон-

троль над процессами проектирования, изготовления, контроля качества во всей глобальной производственной сети.

Переход к кастомизированному гибкому производству, как уже отмечалось, составляет главное направление развития производства, основным предпосылками для этого считаются готовность гибких ИТ-систем, поддерживающих «облачное» производство, с одной стороны, производственные процессы и физические производственные единицы – с другой. Проект ManuCloud был запущен именно для исследования ИТ-производственных аспектов такого перехода и для разработки и проверки тестовых образцов ИТ-инфраструктуры. Пилотирование проекта осуществлялось в трёх индустриях – фотовольтаика, органические светодиоды и поставщики автоиндустрии.

Важно отметить, что современные станки / обрабатывающие центры «готовы для включения в производственное облако»: практически стандартом стало использование роботов-манипуляторов (для смены инструмента, головок, держателей, обрабатываемых деталей), контроллеров и средств коммуникации для включения в сеть. Также оборудование порождает большое количество производственных данных, интенсивно развиваются протоколы обмена, общие многоплатформенные информационные среды и т. д. Информационная часть производства также готова к «облаку».

Создание инфраструктуры «облачного производства». Несколько современных направлений развития ИТ не относятся к технологиям ОУП, но создают инфраструктуру развития ОУП, в частности «облачного производства». К этим направлениям относятся Интернет вещей (internet of things), межмашинное взаимодействие (M2M), промышленный Интернет (industrial internet), большие данные (Big Data). Эти области пересекаются, их границы не являются точно определенными, но для целей данного отчёта важно их влияние на «облачное производство». Это влияние и будет рассмотрено.

Интернет вещей (internet of things, IoT) – область, охватывающая уникально идентифицируемые объекты, их виртуальное представление в интернет-подобной среде и информационный обмен (взаимодействие) через эту среду. IoT формирует сеть приборов (датчиков, исполнительных механизмов, «микрофабрик») путём их горизонтальной интеграции. Применительно к ОУП IoT обеспечивает сбор данных / знаний о функционировании «производственного облака», контроль производственной и внешней среды, сравнивает приборы в

рамках всей сети, позволяет предугадывать проблемы в такой сети и выявлять шаблоны поведения.

Межмашинное взаимодействие (M2M) – широкая область, охватывающая любые технологии, обеспечивающие проводное или беспроводное автоматическое взаимодействие между механическими или электрическими приборами. Эта область очень близка предыдущей, различия в том, что M2M рассматривает в большей степени именно взаимодействие, а не сеть. Как правило, взаимодействующие приборы имеют уникальные идентификаторы, состоят из датчиков, исполнительных механизмов, коммуникационных средств, автономного управляющего программного обеспечения. M2M обеспечивает именно информационный обмен – мониторинг состояния приборов, выявляет ошибки и сбои приборов, позволяет удалённо администрировать и реконфигурировать приборы и т. д.

Промышленный Интернет (industrial internet) обычно подразумевает интеграцию сложных физических машинных комплексов с сетевыми датчиками и программным обеспечением, обычно реализуется на параллельной Интернету инфраструктуре, на общих или частных каналах, является более защищённым за счёт дополнительных средств.

Большие данные (Big Data, BD) часто понимают, как область методов и инструментов обработки больших и сложных (за счёт разнородности, неизвестности взаимосвязей и скорости появления) массивов данных. Методы BD обеспечивают анализ и исследование возникающего неизвестного поведения сложных систем, облегчение, удешевление, ускорение принятия решений, более точное исследование предпочтений пользователей, за счёт этого экономию ресурсов при разработке, производстве, сервисе и т. д.

Большинство из вышерассмотренных областей имеют не только промышленное применение, поэтому они и рассматриваются как инфраструктура ОУП, все вместе они также обеспечивают следующие возможности:

- многоаспектный анализ производственной и окружающей среды;
- самообучение на основе собираемой информации;
- проактивное принятие бизнес-решений;
- интегрированный человеко-машинный анализ данных;
- использование предсказывающих алгоритмов и подходов;
- интеграцию с бизнес-системами.

В качестве примера информационных инструментов, реализующих перечисленные технологии, можно упомянуть создание интегрирующих программных продуктов (для всех платформ – Win, iOS, Andr) для «лёгкого» объединения через «облако» автоматических обрабатывающих центров и рабочих мест конструкторов, технологов и т. д.

8. КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ

Определения и сокращения

В этом разделе будут использованы распространенные в профессиональной среде англоязычные сокращения:

CAD – Computer-Aided Design: в широком смысле использование компьютерных технологий для создания, анализа и модификаций дизайна продуктов; в более узком смысле прежде всего для создания продуктов.

CAE – Computer-Aided Engineering: использование компьютерных технологий для инженерного анализа (механического, термодинамического и т. п.).

CAM – Computer-Aided Manufacturing: управление производственным оборудованием с помощью программных средств.

CAx – сокращение CAD/CAE/CAM/CAPP.

PLM – Product Lifecycle Management: бизнес-подход по поддержке совместного создания, распространения и использования данных об изделии / объекте в течение всего жизненного цикла – от концепции до вывода из эксплуатации и утилизации. Подход объединяет людей, процессы, информационные системы и данные.

PDM – Product Data Management: использование компьютерных технологий для управления данными о конкретном продукте / объекте: проектная документация, производственные спецификации, необходимые материалы и т. д.

MCAD – Mechanical Computer-Aided Design: CAD для разработки механических компонентов продуктов.

AEC CAD – Architecture, Engineering, And Construction: CAD для архитектуры и строительства.

BIM – Building Information Modeling: информационное моделирование зданий.

EDA – Electronic Design Automation: средства проектирования электроники.

Системы CAD (Computer-Aided Design) и CAE (Computer-Aided Engineering) в настоящее время являются одним из основных способов проектирования продуктов (начальных стадий жизненного цикла), в особенности сложных и высокотехнологичных, для которых компьютерный дизайн практически единственный способ разработки. Например, современные микросхемы с миллиардами транзисторов были бы невозможны без развития в 1970–1980-х гг. компьютерных

средств проектирования, моделирования, оптимизации и тестирования, которые, в свою очередь, основаны на прогрессе фундаментальных алгоритмических исследований в нескольких областях.

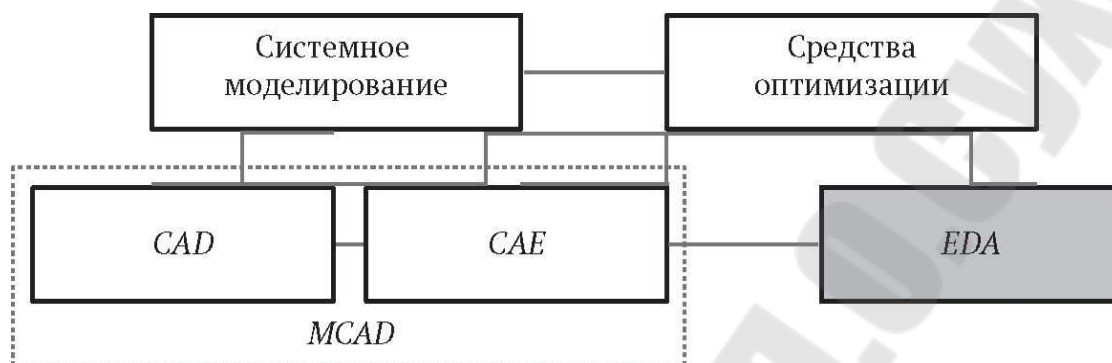


Рис. 62. Основные группы технологий проектирования продуктов

Дальнейшее развитие и необходимость принципиально новых подходов к САХ в современных условиях обуславливают несколько факторов:

- индивидуализация и повышение скорости разработки новых продуктов и новых версий продуктов требуют ускорения цикла «дизайн – тестирование», что возможно *только за счёт значительного расширения роли компьютерного моделирования*. Ускорение цикла создаёт возможности для изготовления и тестирования прототипов продуктов и горизонтальной и вертикальной интеграции различных средств CAD/CAE/CAM;

- распределённое производство и повышение гибкости производственных цепочек требуют существенного увеличения количества работников с компетенциями в области компьютерного дизайна, что возможно только при «демократизации» существующих систем с точки зрения необходимого специализированного уровня подготовки пользователей;

- поддержка на всех этапах разработки продуктов удалённого совместного дизайна;

- необходимость адаптации к новым технологиям (в частности, к аддитивным технологиям и технологиям с использованием современных материалов).

8.1. Основные технологии CAD и CAE

Многие ранние системы CAD (например, компании Autodesk) прежде всего переводили на компьютерную основу традиционные процессы проектирования, основанные на двухмерных чертежах, но

довольно быстро практически все ведущие системы перешли к работе с трех мерными моделями изделий, из которых можно было сгенерировать двухмерные проекции для производственной документации.

Главная задача систем 3D CAD – предоставить пользователю возможность определения и последующей модификации геометрической формы частей изделия, но не их физических свойств или процесса изготовления. В основе всех систем геометрического моделирования лежит относительно небольшое количество стандартных подходов к компьютерному представлению трёхмерных объектов.

Твердотельная геометрия (solid geometry) – представление объектов как результата операций (пересечение, объединение, разность) над элементарными объектами (цилиндры, сферы, параллелепипеды и т. п.). Граничные представления (Boundary representations) включают топологическую информацию (как простые части поверхности связаны друг с другом, например, соседние грани куба имеют общее ребро) и геометрическую (форма каждой части поверхности, например, каждая грань куба – квадрат). Основным средством описания геометрии в промышленных приложениях служат сплайны, более конкретно – trimmed NURBS (trimmed Non-uniform Rational B-Splines), практически являющиеся промышленным стандартом. В определенных нишах (концептуальный дизайн, создание моделей для приложений в индустрии развлечений и тренажерах) популярны так называемые поверхности подразделения (subdivision surfaces) и прямое использование сеток (polygonal meshes).

Параметрическое моделирование. Важно разделять параметрическое представление геометрических объектов и подход к их построению. В параметрическом представлении формы образованы из конструктивных элементов (features) с параметрами (например, размерами). Конструктивные элементы могут быть как формами (например, поверхности вращения), так и их модификациями (например, добавление скруглений определённого радиуса). Параметры разных элементов связаны друг с другом: например, радиус отверстия в цилиндре может быть задан как четверть его радиуса. Этот подход позволяет изменять твердотельные модели не нарушая их целостности. Наиболее распространён вариант структуры параметрических моделей на базе предыстории, при котором параметры элементов, добавленных позже, зависят только от параметров ранее созданных элементов. Более продвинутый тип моделей – вариационные модели (variational model) – позволяет определять произвольный набор соот-

ношений параметров, не заботясь о порядке создания, но требует более сложных вычислений при изменениях параметров – с использованием геометрических решателей (geometric solver).

Прямое моделирование (direct modeling) – подход к геометрическому моделированию, при котором пользователь может непосредственно менять элементы граничного представления (скажем, передвигать или изменять размер грани параллелепипеда) вместо изменения параметров конструктивных элементов, как при традиционном параметрическом моделировании. При этом прямое моделирование может сочетаться с параметрическим представлением геометрических данных.

Системы инженерного анализа (computer-aided engineering). После разработки геометрических моделей можно либо напрямую переходить к созданию и испытанию физических прототипов, либо пройти стадии компьютерного анализа и оптимизации для уменьшения количества итераций, требующих изготовления прототипов в процессе разработки окончательного дизайна. Компьютерный анализ – наиболее наукоемкая часть CAD/CAE/CAM, так как он требует точного моделирования физических процессов и функционирования изделий.

Современные системы анализа позволяют моделировать широкий диапазон физических процессов. Наиболее распространены следующие типы моделирования:

Анализ механических свойств (structural analysis): расчёт эластических и пластических деформаций, как статических, так и динамических, прочности, анализ колебаний, механической устойчивости. Этот тип моделирования наиболее распространён и широко применяется для всех типов материалов: металла, пластиков, композиционных материалов и т. д.

Моделирование динамики систем твёрдых тел (rigid body dynamics). Симулирование сложных механических систем (рисунок 63) с большим количеством движущихся элементов (например, манипуляторов промышленных роботов и поточных линий) методами, учитывающими деформации отдельных частей, требует дорогостоящих и долгих вычислений и часто не является необходимым. Системы моделирования динамики абсолютно твёрдых тел основаны на специализированных высокоэффективных методах моделирования, предполагающих отсутствие деформаций. Такие системы позволяют моделировать сложные системы с большим количеством малодеформируемых движущихся частей.

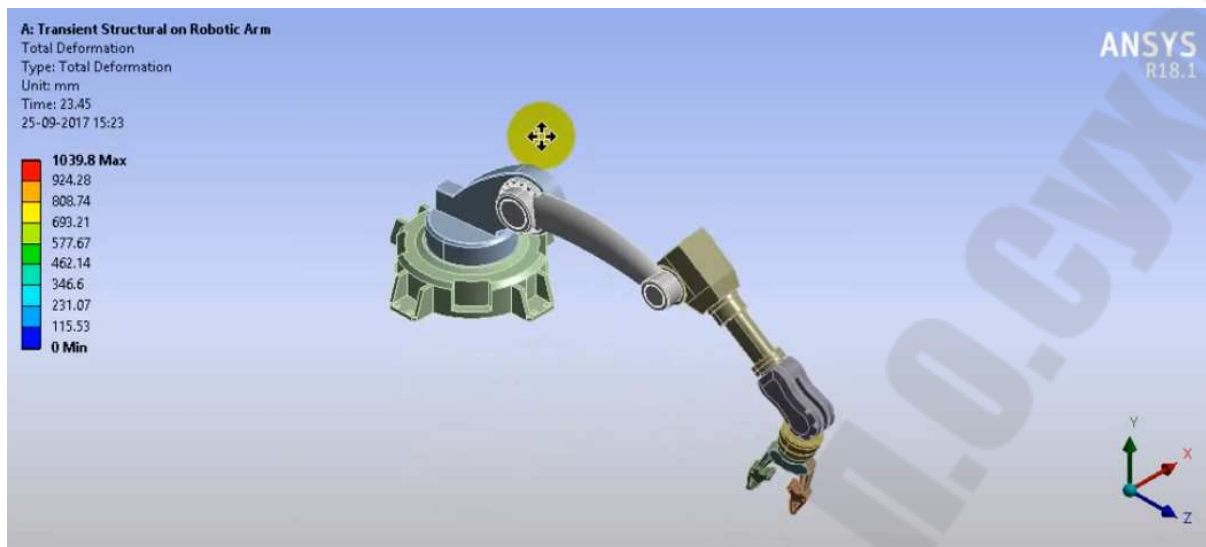


Рис. 63. Симулирование движения промышленного робота

Вычислительная гидродинамика (computational fluid dynamics, CFD) – расчёт потоков жидкости и газа (например, в двигателе или вокруг самолёта). Наиболее существенную роль играет при проектировании авиационной техники, в автомобильной промышленности и кораблестроении, но также используется по мере повышения доступности во многих других областях.

Тепловой анализ (thermal analysis) – анализ распределений температуры в различных условиях теплообмена с процессами диффузии, конвекции и излучения. Так как теплообмен часто тесно связан с механическими нагрузками, современные системы теплового анализа, как правило, интегрированы с системами анализа механических свойств. Вместе с тем при наличии потоков жидкости или газа процессы теплообмена моделируются одновременно с потоками. Наиболее важную роль этот вид анализа играет при проектировании двигателей, самолётов и кораблей, ракетной техники, энергетических генераторов, охладителей.

Электромагнитное моделирование (electromagnetic simulation) – численное моделирование статических и динамических электромагнитных полей. Этот класс технологий моделирования необходим для разработки СБИС, печатных плат, электромеханических систем и телекоммуникационных устройств. В целом рынок средств EDA (Electronic Design Automation) обычно рассматривается отдельно от более общего рынка CAD, но в ряде важных приложений (в частности, про-

ектирование электромеханических систем, анализ распределений температуры, связанных с электрическими цепями) существует потребность в интегрированных системах.

Моделирование процессов (process simulation) – физическое и кинематическое моделирование конкретных процессов, таких как литье и штамповка.

Оптимизация (optimization). Конечной целью дизайна считается нахождение компромисса между различными требованиями к продукту при минимизации затрат на изготовление, эксплуатацию и обслуживание. Средства автоматической оптимизации, в том числе многокритериальной и междисциплинарной, интегрированные со средствами моделирования, ускоряют и упрощают этот процесс по сравнению с ручной оптимизацией путём изменения отдельных параметров системы.

Системное проектирование на основе моделей (model-based systems engineering). INCOSE определяет MBSE как формализованное применение моделирования для поддержки систем – но-инженерных процессов – управления требованиями, дизайна, анализа, верификации и валидации систем от концептуального дизайна до поздних стадий жизненного цикла системы. С точки зрения средств CAD/CAE поддержка MBSE обычно связана с интеграцией геометрии и физического моделирования со средствами архитектурного описания и моделирования структуры систем.

Значительная доля средств CAE, за исключением моделирования работы механизмов, потоков жидкости и электрических полей, основана на методе конечных элементов – математическом подходе к моделированию физических процессов и решению больших линейных и нелинейных систем алгебраических уравнений.

8.2. Крупные компании в области CAD: линейки продуктов и тенденции в развитии

Хотя каждая из перечисленных ведущих компаний имеет продукты во всех основных категориях CAD и CAE, их стратегии развития существенно различаются. Анализ недавних приобретений и новых продуктов этих компаний хорошо отражает современное состояние области и текущие тенденции её развития в целом.

8.2.1 Dassault Systemes

Dassault Systemes крупнейшая компания на рынке. Линейка продуктов (рисунок 64) Dassault включает несколько групп: основные

группы-CATIA (CAD продвинутого уровня), ENOVIA (PDM) и две группы, которые можно отнести к CAE, – SIMULIA (набор пакетов для механического, теплового анализа и гидродинамики) и DELMIA (планирование и моделирование производственных процессов в масштабах предприятия). В дополнение относительно недавно были созданы группы продуктов 3DVIA (визуализация и удалённое сотрудничество), GEOVIA (CAD для проектирования добычи полезных ископаемых) и BIOVIA (PDM и моделирование молекулярного уровня для биомедицинских и химических компаний). В дополнение к основной линии CATIA/ENOVIA/DELMIA/SIMULIA компания Dassault Systemes поддерживает линию продуктов SolidWorks, ориентированную на средние и малые предприятия.

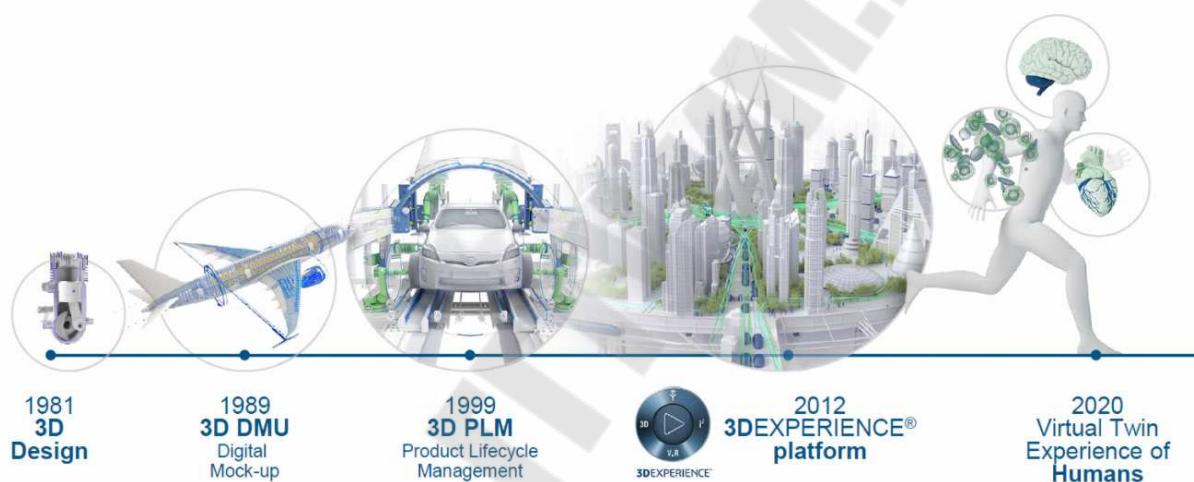


Рис. 64. Этапы развития продуктов Dassault Systèmes

Ключевой продукт фирмы – система трёхмерного проектирования CATIA, полностью, за исключением геометрического ядра, разработанная самой компанией. Поддержание и разработку геометрического ядра ведёт дочерняя компания Spatial, приобретённая в 2000 г. Хотя компания никогда не прекращала совершенствование основного продукта, в настоящее время он достиг относительно стабильного состояния; последние изменения в этой области, как и у многих других производителей, связаны с повышением популярности прямого моделирования.

Приоритеты и тенденции развития. В настоящее время основа маркетинга продуктов Dassault Systemes идея 3DEXPERIENCE, кото-

рая сама компания не определяет в технических терминах. Наиболее заметные компоненты 3DEXPERIENCE-расширение идеи product lifecycle management, интеграция средств поддержки маркетинга и взаимодействия с потребителями на всех этапах разработки продуктов. Другое описание 3DEXPERIENCE-изучение всех процессов клиента и разработка решений, нацеленных на полную поддержку этих процессов.

К развитию в этой области относится приобретение компании Netvibes в 2012 г., разрабатывающей средства мониторинга и анализа социальных сетей, и компании RTT в 2014 г., производителя программного обеспечения для генерации изображений и видео высокого качества, ориентированных на маркетинг (продукт 3DEXCITE). Однако значительная доля развития Dassault продолжает оставаться в рамках CAD/CAE, которым посвящён этот раздел. По скорости роста доходов продукты CAE (SIMULIA и DELMIA) лидировали с ростом 25 % в 2012 г., хотя по абсолютным цифрам лидировал CAD высокого уровня (CATIA).

Развитие средств CAD/CAE может быть разделено на два основных направления:

1. Создание новых направлений, расширяющих клиентскую базу Dassault Systemes и требующих принципиально новых подходов: продукты GEOVIA (2012), основанные на продуктах приобретённой в 2012 г. компании Gemcom, специализирующейся на проектировании для добычи полезных ископаемых, и BIOVIA (на основе Accelrys), системы PLM и моделирования для высокотехнологичных компаний, ведущих разработки в областях химических и биологических технологий.

Расширение диапазона средств CAE в контексте групп продуктов CATIA и SIMULIA. Два основных вектора развития – специализированные системы для конкретных производственных процессов и средства оптимизации. В 2011 г. была приобретена компания Simulaut (проектирование и анализ изделий из композиционных материалов), в 2013 г. – Simproe (литье изделий из пластика) и Safe Technology (моделирование усталости материалов). В области оптимизации предложения Dassault основаны на разработках немецкой компании FE Design (Tosca) (рисунок 65).

Первая тенденция также присутствует в продуктах Solidworks, ориентированных на средний и малый бизнес: в последние годы расширены средства для проектирования литья из пластмассы, штампов-

ки металла и электрической разводки. Также следует отметить, что развитие средств для удалённой совместной работы над продуктами уже долгое время является одним из приоритетов Dassault Systemes, как и поддержка моделиориентированных системно-инженерных процессов, прежде всего Dymola. Можно ожидать дальнейшего развития программных средств для системной инженерии.

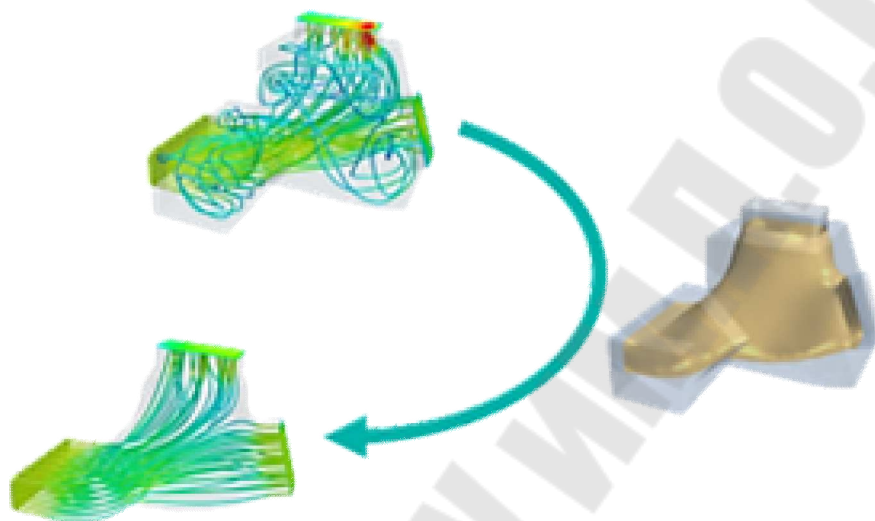


Рис. 65. Оптимизация канала двигателя в программе Tosca Fluid

8.2.2. Autodesk

По структуре линейки продуктов Autodesk продолжает существенно отличаться от других компаний в ведущей группе, хотя в результате недавних приобретений и наблюдается определенная конвергенция.

Пользовательская база Autodesk значительно шире, чем у других компаний «большой четвёрки», благодаря более разнообразному набору продуктов, доступным ценам на многие из них и ориентации не только на профессионалов, но и на широкого пользователя. Значительная доля продуктов Autodesk ориентирована на пользователей в индустрии СМИ и развлечений (компьютерная мультипликация, специальные эффекты для кинематографа, 3D визуализация для маркетинга и информации, компьютерные игры и т. д.). С приобретением компании Alias компания Autodesk владеет двумя наиболее распространёнными продуктами высокого уровня в этой области—Maya и 3D Studio Max. Хотя основные подходы к геометрическому физическому моделированию в этих системах и системах CAD сходны, приоритеты

в развитии этих систем существенно различаются. По мере изменения потребностей в области промышленного CAD можно ожидать, что многие технологии, созданные для нужд индустрии СМИ и развлечений, будут находить все большее применение в новых промышленных приложениях (это мы обсудим ниже).

Из «большой четвёрки» у Autodesk традиционно была наиболее ограниченная поддержка PLM концепции (ограниченная функциональность PDM продукта Autodesk Vault).

Наиболее известный продукт – это AutoCAD, самый распространённый пакет CAD в мире, используемый для значительного количества приложений в разных областях и поддерживающий работу как в 2D, так и в 3D. Существует набор специализированных вертикальных приложений на основе AutoCAD, например Architecture, Civil 3D, Electrical, Mechanical, Plant 3D и т. п. Продукт Autodesk Inventor (рисунок 66), система параметрического моделирования в 3D, нацелен на сходный диапазон потребителей по цене.

В области CAE основными являются группы программ Autodesk Simulation (Mechanical, CFD, Composite Analysis, Composite Design, Flow Design) и Autodesk Nastran. Также внимания заслуживают продукты Alias Studio примеры продуктов для рынка CAD (например, проектирование высококачественных поверхностей для автомобилестроения), конкурентные преимущества которых связаны с их корнями, уходящими в продукты для индустрии развлечений.

Относительно недавно появился комплекс «облачных» продуктов 360, который подробнее будет рассмотрен ниже. Также стоит отметить продукт ReCap для создания 3D моделей из изображений и его «облачный» аналог 360.

Приоритеты и тенденции развития. Можно идентифицировать два основных направления развития: «облачные» системы и расширение поддержки моделирования.

«Облачные» системы. Наиболее заметные инновации компании связаны с системой «облачных» продуктов 360, быстро развивающейся в последние два года. Развитие этой группы продуктов тесно связано с идеей «демократизации» дизайна, т. е. повышением доступности средств CAD/CAE как по цене, так и по требуемому уровню подготовки пользователей. CEO Autodesk Карл Басс в интервью engineering.com охарактеризовал общую идею «облачных» систем Autodesk следующим образом: «Речь идёт о том, чтобы повысить производительность <...> мы видим два важных преимущества «об-

льных» приложений: бесконечно масштабируемые вычислительные ресурсы, которые всегда предоставляют необходимую вычислительную мощность [для конкретной задачи]. С другой стороны, [облако] – это естественная платформа для совместной работы. Практически нет



Рис. 66. Последовательность топологической оптимизации в системе Autodesk Inventor

проектов, не включающих многих людей или фирм. Мы предоставляем инструменты, необходимые для координации и сотрудничества.

Линия продуктов 360 включает средства CAD (AutoCAD 360, Fusion 360), PLM (PLM 360), инженерных вычислений (Sim 360) и (что необычно для «большой четвёрки») CAM (CAM 360), т. е. в принципе покрывает все основные категории продуктов. Однако их возможности на данный момент существенно ограничены по сравнению с системами того же направления, скажем, от Dassault или самого AutoCAD.

Расширение поддержки моделирования. Анализ недавних приобретений компании Autodesk показывает, что развитие её возможностей в области CAE также является существенным приоритетом, хотя сама компания прежде всего обсуждает CAE в контексте «облачных» приложений. Исключая приобретения в области индустрии развлече-

ний, наиболее существенными недавними приобретениями выступают: Blue Ridge Numerics (2011, вычислительная гидродинамика), Firehole Technologies (2013, композиционные материалы) и компания NEI Software в 2014, являющаяся одной из ведущих в области CAE (например, продукт NEI Nastran, который существенно приблизил Autodesk к лидерам в области CAE по уровню продуктов). Среди других важных приобретений-Delcam (2013), один из крупных производителей систем для САМ.

После недавних приобретений линейка продуктов Autodesk стала намного ближе к предложениям других компаний «большой тройки», несмотря на общую ориентацию компании на средний и мелкий бизнес и массового потребителя.

8.2.3. Siemens PLM Software

Siemens PLM, базирующаяся в США, в отличие от остальных крупнейших САД компаний является подразделением крупнейшей немецкой компании Siemens (валовой доход – 86,3 млрд евро). Компания, как видно из названия, ставит PLM в центр своих приоритетов. Исторически она образовалась путём сложной цепи приобретений и слияний с основными группами продуктов, основанных на разработках в прошлом независимых компаний UGS/Unigraphics, SDRC и технологии, приобретённой у MSC.

Основные продукты компании в области САД/САЕ (исключая PLM): линия NX, включающая продукты по всем основным направлениям, по уровню и ориентированности на крупных клиентов сходная с группами продуктов CATIA/SIMULIA

Dassault Systemes. Продукты бренда SolideEdge со схожей, но более ограниченной функциональностью ориентированы на бизнес среднего уровня. Отдельные линии продуктов преимущественно связаны с САЕ: Femap создание и автоматическая генерация сеток, интерфейс с решателями и САД, LMS Imagine. Lab / AMESim системное проектирование и механотроника, LMS Virtual. Lab и Samtech моделирование механизмов и прочности. Продукты Fibersim предназначены для проектирования и моделирования изделий из композитов.

Siemens PLM (рисунок 67) лицензирует значительный набор программных компонент другим производителям программного обеспечения, в частности геометрическое ядро Parasolid и геометрический решатель D-Cubed.

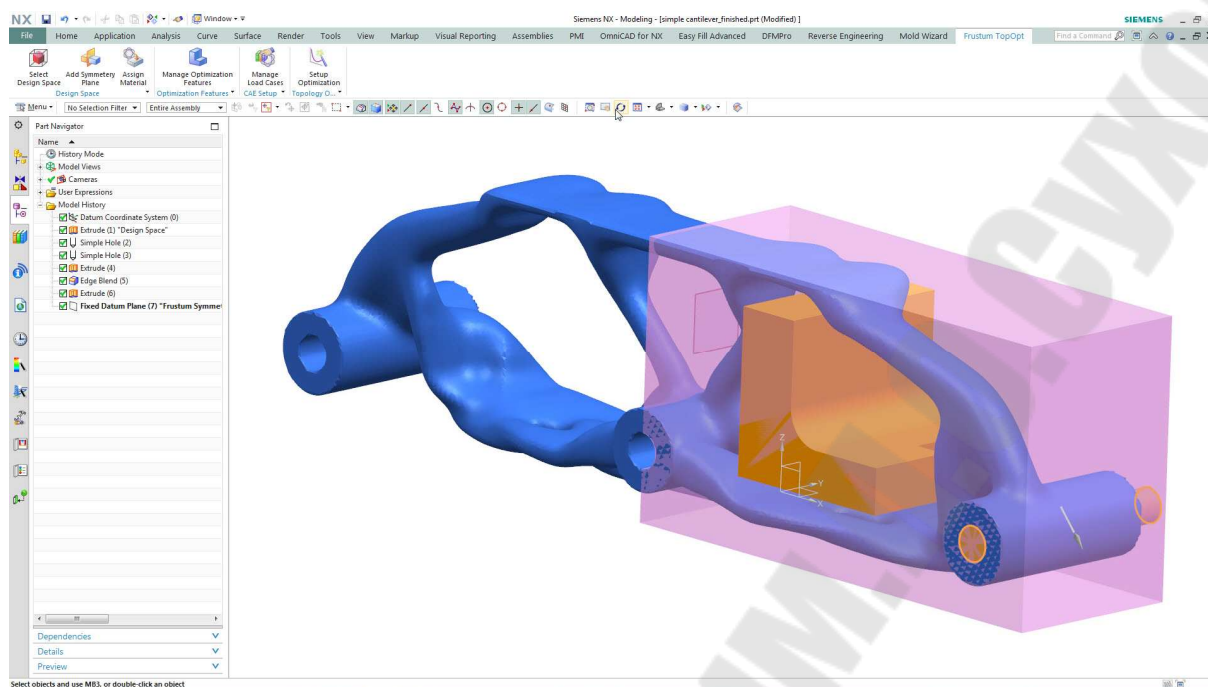


Рис. 67. Окно системы Siemens NX

Приоритеты и тенденции развития. В отличие от компаний Dassault Systemes и Autodesk компания Siemens PLM не декларировала в последние годы существенных изменений курса. Чак Гридстафф, президент компании, сказал в интервью порталу engineering.com: «Для нас вопрос не в нахождении [и включении в наши продукты] последней модной технологической новинки, а, скорее, в том, каково место этих технологий в производственных процессах наших клиентов, позволят ли они нашим клиентам получить дополнительные преимущества. Возможно, кое-что [из того, что мы делаем], выглядит как постепенные улучшения-пусть так. Мы не гоняемся за яркими, но кратковременными новациями (we are not a “flash-in-the-pan” kind of company)». Среди текущих направлений развития компании он упомянул поддержку системно инженерных процессов в контексте приобретения LMS, интеграцию дизайна и производства и в качестве более общей идеи средства поддержки «science of the product», моделирования всех аспектов продукта. Интересной особенностью продуктов Siemens PLM являются приоритет многоплатформенных и multiCAD систем, поддерживающих не только импорт из конкурирующих систем CAD, но и интеграцию с системами других компаний,

например интеграцию CATIA с PDM продуктом Teamcenter, и программа JT Open.

Приобретения Siemens PLM за последние несколько лет практически все из области PLM и CAE, в частности, одно из самых крупных приобретений-компания LMS; в сочетании с продуктами линии NX Nastran приобретение LMS вывело Siemens PLM на третье место среди компаний CAE по продажам, значительно укрепив их положение. Другое приобретение-компания Vistagy (2011, дизайн и моделирование изделий из композиционных материалов).

8.2.4. PTC

Последняя компания «большой четвёрки» существенно уступает остальным трём по объёму продаж. Исторически компания PTC разработала концепцию параметрического моделирования, которая долгое время была основной для всех ведущих компаний. Основные продукты PTC в области CAD/CAE консолидированы под брендом Creo: Creo Parametric, Creo Direct, Options Modeler (3D CAD), Creo Sketch and Layout (2D CAD), Creo Simulation (CAE, механическое и термальное моделирование) и Simulation Extensions (advanced simulation, mechanism dynamics, spark analysis, fatigue and plastic), визуализация (Creo View, Illustrate).

В области PLM основной продукт PTC-PTC Windchill, в областях текущих приоритетов-SLM (service lifecycle management) и ALM (application lifecycle management) Servilgistics и Integrity. PTC также поддерживает систему интерактивных инженерных вычислений MathCad, сходную с Matlab и Maple по функциональности, но в целом уступающую им по возможностям.

Приоритеты и тенденции развития. Основная идея компании-агрессивное развитие концепции PLM в области услуг Service Lifecycle Management и в области поддержки программного обеспечения, связанного с продуктами (Application Lifecycle Management). По словам Джима Брауна, президента Tech-Clarity (компании по изучению рынка), «[PTC] рассматривает “servitization” (размывание границы между продуктом и [связанными с ним] услугами) как критическую переменную в производстве и стремится поддерживать эти перемены своими продуктами. <...> Они видят, что разработка программного обеспечения для “умных” продуктов является задачей, которую приходится решать их клиентам, и хотят, чтобы у них было соответствующее решение».

Практически все недавние приобретения компании PTC в области PLM, SLM и ALM (Servigistics, Enigma, Atego), что согласуется с заявленными компанией приоритетами. Приобретение компании Atego, в частности производящей программное обеспечение для поддержки модели ориентированной системной инженерии, показывает, что PTC также стала придавать большое значение этой области. Отметим, что это так же единственная компания, относительно мало уделяющая внимания развитию CAE: по оценкам С. Павлова, основанных на данных компании CIMData, PTC не входит даже в 10 лидирующих компаний в этой области.

8.3. Ведущие специализированные компании CAE

Хотя в целом область CAD/CAE достигла крайне высокой степени консолидации и компании, предлагающие решения для многих сегментов рынка и большинства аспектов PLM, доминируют, в области CAE есть несколько специализированных компаний, играющих крайне важную роль, в особенности компания ANSYS.

ANSYS. Продукты компании ANSYS включают большой набор средств для моделирования электронных схем, печатных плат и электромагнитного моделирования, которые мы не рассматриваем в деталях, CFX и Fluent для моделирования потоков жидкости, переноса тепла и моделирования реакций в большом диапазоне задач, например аэродинамика в авиастроении, моделирование нефтяных платформ и моделирование потока крови. ANSYS Mechanical – система для анализа деформаций, включая нелинейные и динамические, поддерживающая связанное решение задач деформации и теплового обмена, акустических и других задач. Интеграционная платформа ANSYS Workbench поддерживает интеграцию с многочисленными системами CAD, модификации и создания (ручного и автоматического) геометрических моделей и сеток, параметрического анализа и оптимизации, системного моделирования. Отдельная группа продуктов предназначена для использования в масштабных вычислениях на суперкомпьютерах (High-Performance Computing).

Приоритеты и тенденции развития. Общая стратегия развития ANSYS в течение долгого времени характеризуется лозунгом «Simulation-Driven Product Development», т. е. разработка продуктов на основе моделирования. Общая тенденция в последних разработках компании – повышение интеграции разных типов моделирования. Мультидисциплинарное моделирование уже долгое время одна из сильных сторон продуктов ANSYS, а приобретение компании Estrel и

недавнее соглашение с Modeleon в перспективе добавляют средства поддержки системной инженерии к продуктам компании ANSYS, что расширяет диапазон потенциальных клиентов компании. Другие приобретения включают EVEN (Evolutionary Engineering AG), небольшую компанию, разрабатывающую систему анализа и оптимизации композиционных материалов, SpaceClaim, производителя доступной системы CAD, основанной на принципе прямого моделирования, и Reaction Design (моделирование химических реакций).

Altair. Компания Altair Engineering производит линию CAE продуктов HyperWorks, которые включают RADIOSS (анализ нелинейных и динамических деформаций), MotionSolve (твердотельное моделирование), набор средств для подготовки данных, генерации сеток и визуализации, в частности, HyperMesh с поддержкой дизайна изделий из композитов, AcuSolve (CFD), FEKO (электромагнитное моделирование), OptiStruct и HyperStudy (оптимизация) и системы для моделирования процессов HyperXtrude и HyperForm. Дочерняя компания SolidThinking выпускает продукты CAD Evolve и Inspire. Особый интерес представляет Inspire – продукт для дизайна на основании моделирования, который интегрирует средства оптимизации, в частности топологической оптимизации, в рабочий процесс концептуального дизайна. Другое недавнее приобретение Altair – компания PBSWorks, разработчик системных программ для HPC.

Приоритеты и тенденции развития. Как и Ansys, Altair развивает средства CAD в дополнение своих продуктов в области CAE и средства HPC, сохраняя фокус на физическом моделировании. Одна из основных черт компании Altair, делающая её продукты уникальными, – долговременный приоритет автоматической оптимизации формы (продукт OptiStruct существует более 20 лет), в то время как другие крупные компании в области CAE включились в разработку средств оптимизации относительно недавно. Наличие этой технологии позволило Altair разработать решения для композиционных материалов, не имеющие аналогов у других производителей. Также это создаёт основу для будущих разработок в области CAD/CAE для аддитивных технологий.

MSC. Компания MSC – одна из старейших на рынке CAE, работавшая первоначальные версии кода Nastran (позднее компания была вынуждена лицензировать Nastran другим компаниям для прекращения дела о нарушении антимонопольного законодательства; так

появились NX Nastran и Nei Nastran). После периода спада и внутренней реорганизации компания снова уверенно развивается.

Компания выпускает продукты по всем основным направлениям моделирования: MSC Nastran и Marc (деформации и мультидисциплинарное моделирование), Adams (моделирование систем твердых тел), Easy5 Dytran (взаимодействие жидкости и твердых тел), Actran (акустика), Sinda (теплообмен), MSC Fatigue (усталость материалов), Digimat (моделирование изделий из композитов), Patran (моделирование и генерация сеток) и Easy5 (поддержка системного моделирования).

Приоритеты и тенденции развития. Компания MSC наиболее конкретно определяет свои приоритеты, концентрируясь на разработке нового продукта Apex, интегрирующего средства прямого геометрического моделирования и интеграции сеток, мультифизического моделирования и оптимизации.

По словам CEO компании Доминика Галлелло, «моделирование сейчас – средство проверки качества [законченного дизайна]. Было бы предпочтительно использовать моделирование на более ранних стадиях дизайна. Знание [физического] поведения продукта на ранних этапах фантастически повышает производительность». Конкретные цели, заявленные для Apex: ускорение процесса создания сеток в 10–50 раз, сокращение времени обучения работе с программой от дней и месяцев до часов, интерактивный рабочий цикл, увеличение максимального количества конечных элементов в 250 раз – до 0,25 млрд, интеграция оптимизации и открытие интерфейсов для программных средств других компаний.

Другие компании. Несмотря на высокий уровень консолидации, другие компании играют существенную роль. Например, Sketchup (бывший владелец – Google, теперь Trimble) является продуктом CAD с самой большой пользовательской базой (38 млн благодаря распространению бесплатной версии через Google). Хотя Sktechup предназначен прежде всего для АЕС, но используется во всевозможных целях.

Другое важное событие – приобретение компанией 3D Systems крупнейшей на рынке аддитивных технологий компании Geomagic. Незадолго до этого Geomagic купила компанию Alibre, производящую систему MCAD, которая уступает по числу пользователей только Solidworks, принадлежащей Dassault Systemes.

Также интересен пример компании ZWCAD (Китай, с R&D в США). Хотя линейка продуктов компании существенно уступает продуктам «большой четвёрки» благодаря тому, что в 2013 г. Министерство промышленности и информационных технологий Китая рекомендовало ZWCAD в качестве продукта, соответствующего стандартам безопасности министерства, у компании могут появиться существенные дополнительные возможности для развития. Схожая ситуация складывается в России для компании АСКОН.

В развитии CAD/CAE систем можно выделить следующие основные тенденции. Опережающий рост CAE и моделирования в широком смысле. Хотя компании, за исключением специализированных, редко включают развитие средств физического моделирования в список основных приоритетов, из анализа приобретений и финансовых тенденций рынка видно, что системы CAE играют все более возрастающую роль. Примечателен факт, что почти каждая крупная компания обзавелась средствами для моделирования композиционных материалов путём поглощения компаний, работающих в этой области (Symault, Firehole Technologies, Fibersim, e-Xtreme).

Интеграция CAE/CAD, «демократизация» приложений CAE. В течение последних лет происходит постепенное переосмысление традиционного взгляда на место CAE в процессе проектирования – от средства проверки дизайна к средству разработки. В связи с этим возникает необходимость снижения требований к квалификации пользователя систем моделирования, так как уже не приходится ожидать, что интерпретировать результаты будет специалист по физическому моделированию. В наиболее явном виде эти тенденции проявились в приоритетах компаний Altair и MSC, но сходные идеи присутствуют в продуктах компании Autodesk и других.

Оптимизация. Хотя автоматическая оптимизация использовалась компанией Altair в течение долгого времени, продвинутые средства оптимизации, интегрированные с CAE, стали появляться в продуктах других компаний сравнительно недавно и можно ожидать усиления этой тенденции.

CAD в «облаке». Практически все крупные компании CAD/CAE в той или иной форме выработали стратегию по «облачным» продуктам. Если Autodesk делает «облачные» приложения ключевым приоритетом, остальные крупные компании занимают более осторожную позицию, хотя и они достаточно быстро перешли от точки зрения, что CAD плохо совместим с «облаком», к развитию «об-

льных» продуктов начиная с PDM, но быстро продвигаясь к CAD/CAE и включению модели «программное обеспечение как услуга» в качестве одного из вариантов продаж. Следует отметить, что пока неясно, для какой части рынка этот подход окажется подходящим: возможно, он поможет снизить планку доступа к средствам проектирования высокого уровня для среднего и малого бизнеса.

Повышение популярности решений multiCAD, тенденция к разделению платформ и приложений и большей открытости. В этой области Siemens PLM во многом занимает лидирующие позиции, вкладывая существенные ресурсы в поддержку multiCAD решений, от PDM до CAE, и открытых форматов (JT, STEP). Традиционно специализированные компании также уделяют этому большое внимание. Можно надеяться, что тенденции в этой области понизят барьер для выхода на рынок небольших компаний – производителей специализированных компонент.

Поддержка системно-инженерных подходов. Хотя шаги в этом направлении сделаны относительно небольшие, заметно, что большинство компаний уделяют внимание интеграции средств поддержки MBSE в той или иной форме.

Поддержка аддитивных технологий. Хотя в той или иной форме примитивная поддержка аддитивных технологий появилась во многих продуктах (экспорт в STL, «очистка» сеток и т. п.), более серьёзные средства, необходимые для 3D печати, пока присутствуют только в отдельных, как правило, неосновных продуктах. С недавним присоединением компании 3D Systems к рынку CAD можно ожидать начала более активных разработок в этой области.

9. ГЕНЕРАТИВНЫЙ ДИЗАЙН В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Технологическое развитие в наступившую цифровую эпоху совершает, можно сказать, парадоксальный вираж, отклоняясь с пути создания все более техногенных изделий и обращаясь за помощью к живой природе. Непрерывный поиск инновационных, идей для генерации во всех сферах экономики и жизни людей продукции с новыми необычными свойствами ведёт к тому, что традиционные методы производства уже не в состоянии их реализовать. Появившийся во второй половине прошлого века и становящийся всё более актуальным бионический дизайн – подход к разработке принципиально новых конструкций на основе природных структурных форм – способен создавать в кратчайшие сроки сложнейшие инженерные решения, фактически столь же совершенные, как и те, что были созданы природой за тысячелетия эволюции. Каковы, однако, реальные перспективы этого подхода потеснить традиционные технологии моделирования? Что он может предложить для улучшения традиционных деталей и конструкций? Какова специфика внедрения бионического метода проектирования изделий в современное производство? Какое программное обеспечение способно обеспечить создание подобных конструкций? Приверженцы направления бионического дизайна (рисунки 68,69) в промышленном конструировании провозглашают в качестве принципиально нового подхода к созданию best-in-class оптимизированных конструкций.

Основные отрасли промышленности, такие как энергетика, современная архитектура, а также машиностроение для гражданского и особенно военного направления все ещё требуют конструкций с определённым заделом по технологичности, надёжности и локальной ремонтпригодности. Использование бионических принципов в процессе проектирования и создания продуктов нового поколения является на сегодняшний день одним из ключевых трендов технологического развития, затрагивающим самые разные отрасли высокотехнологичной промышленности (авиастроение, автомобилестроение, машиностроение), медицину, архитектуру, промышленный дизайн и другие области.



Рис. 68. Использование деталей полученных с применением генеративного дизайна в автопроме.



Рис. 69 Пример мультивариативности генеративного дизайна

На данный момент можно выделить два основных подхода к применению бионических принципов – традиционный и современный. И если первый предполагает заимствование принципов организации, свойств, функций, структур и материалов из живой природы с целью улучшения существующих и создания новых, не менее совершенных технических систем, то второй неразрывно связан с развитием передовых производственных технологий, и в его основе лежат технологии компьютерной оптимизации (Computer-Aided Optimization, CAO) – многопараметрической, топологической, многокритериальной, мультидисциплинарной и др. – то есть математический подход, основанный на описании пространственной (3D) задачи оптимизации с помощью уравнений в частных производных. Сегодня технологии компьютерной оптимизации и компьютерного моделирования тесно вплетены в процесс проектирования конструкций, более того, они стали основой, а затем и драйвером проектирования в промышленности, выражением чего служит парадигма Simulation & Optimization Driven Design.

Суть этой концепции заключается в том, что проектирование изделия осуществляется на базе первичных инженерных расчётов, что существенно облегчает дальнейшую работу – получаемый в результате дизайн близок к оптимальному и может служить отправной точкой для более эффективного использования методов математического программирования. Такой подход значительно сокращает сроки разработки продукта и существенно удешевляет этот процесс, позволяя при этом повысить технико-эксплуатационные характеристики изделия.

Конвергенция и синергия технологий компьютерного проектирования и моделирования, включая технологии оптимизации (то есть концепции Simulation & Optimization Driven Design) и аддитивные технологии дают возможность говорить о принципиально новом подходе к проектированию и созданию best-in-class оптимизированных конструкций – бионическом дизайне (Simulation & Optimization Driven Bionic Design), который не только не исключает технологии оптимизации, но способствует их развитию и совершенствованию.

Понятие бионического дизайна можно разделить на три составляющих:

- собственно бионический дизайн как результат работы дизайнера;

- конструкция как результат топологической оптимизации, в результате которой форма оптимизируется в зависимости от напряжений внутри детали;
- конструкция с матричной и решетчатой структурой.

В первом случае вообще не предусматривается оптимизация, во втором используются разработанные стандартные методы оптимизации, которые и в будущем будут востребованы, в третьем требуется развитие новых методов, которые появятся в ближайшем будущем.

Первый и второй типы дизайна вряд ли повлекут за собой изменения в технологии, поскольку современные станки с ЧПУ решат практически все проблемы, а вот третий вариант, скорее всего, требует перехода к аддитивным технологиям.

В ближайшем будущем изделий, оптимизированных в формате бионического дизайна, будет становиться все больше. Однако, говорить о массовом переходе деталей на изменённую геометрию явно несвоевременно, поскольку в большинстве случаев изготовление таких изделий возможно только вкупе со сменой способа производства (рисунок 70).

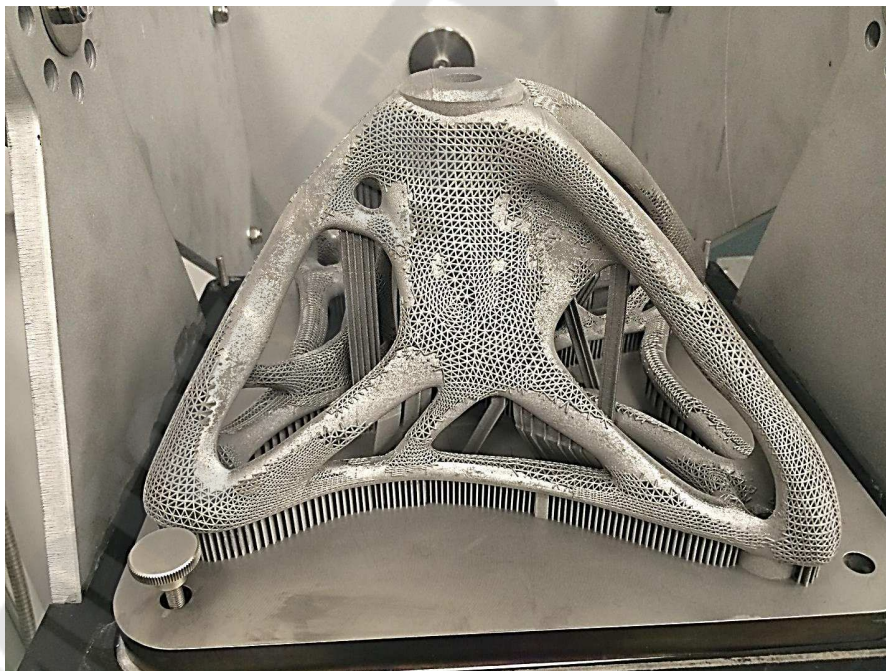


Рис. 70. Пример печать металлического изделия, конструкция которого создана с применением комплекса технологий бионического дизайна и топологической оптимизации.

Оптимизация геометрии – не единственный способ повышения эксплуатационных характеристик, опыт говорит о том, что простая замена материала может дать очень интересные результаты. Поэтому обычно необходим комплексный подход к оптимизации.

Бионические модели создаются с использованием технологий топологической оптимизации. Топологическая и параметрическая оптимизация являются принципиально разными подходами к созданию конструкций.

Параметрическая оптимизация является универсальным подходом к решению задач минимизации массы, повышения жёсткости, улучшения других эксплуатационных характеристик. При этом одной из основных проблем является создание корректной параметрической модели конструкции, позволяющей эффективно решить задачу оптимизации при минимальном количестве параметров, так как увеличение их числа приводит к лавинообразному росту времени решения задачи (эффект "проклятия размерности"). Для эффективного использования технологий оптимизации проектировщик должен обладать замкнутой расчётной цепочкой программных САД/САЕ-комплексов и непосредственно самим оптимизационным кодом.

Топологическая оптимизация служит для определения принципиальной силовой схемы (концепции) конструкции и даёт ответ на вопрос, как расположить силовые элементы в конструкции и связать их между собой для обеспечения минимальной массы в сочетании с максимальной жёсткостью. При этом для воплощения данной концепции в серийном производстве с приемлемой стоимостью (рисунок 71) необходимо проведение последующей конструкторской и технологической проработки детали, что является трудоёмким процессом. Также, это требует итерационного подхода и замкнутой расчётной цепочки. Применение аддитивных технологий нивелирует данные проблемы лишь частично.

Таким образом, несмотря на принципиальную разницу в подходах, два данных направления совершенствования конструкций имеют схожие САД/САЕ – требования для своего применения. При этом топологическая оптимизация позволяет найти концептуальную форму, а параметрическая оптимизация – осуществить поиск оптимального сочетания параметров бионической конструкции и доводку прочностных характеристик с учётом технологии изготовления. Именно сочетание двух данных подходов имеет максимальный потенциал. На

сегодняшний день уже существуют примеры успешного применения подобного подхода в отечественных и зарубежных компаниях в разных отраслях промышленности. Ведущие разработчики коммерческого программного обеспечения интегрируют технологии как параметрической, так и топологической оптимизации в свои расчётные цепочки.

Выбор подхода зависит от цели и критериев оптимизации. Существующие технологии оптимизации на данном этапе используются ограниченно, в том числе и для стандартных деталей. У бионического дизайна есть как преимущества, так и недостатки.

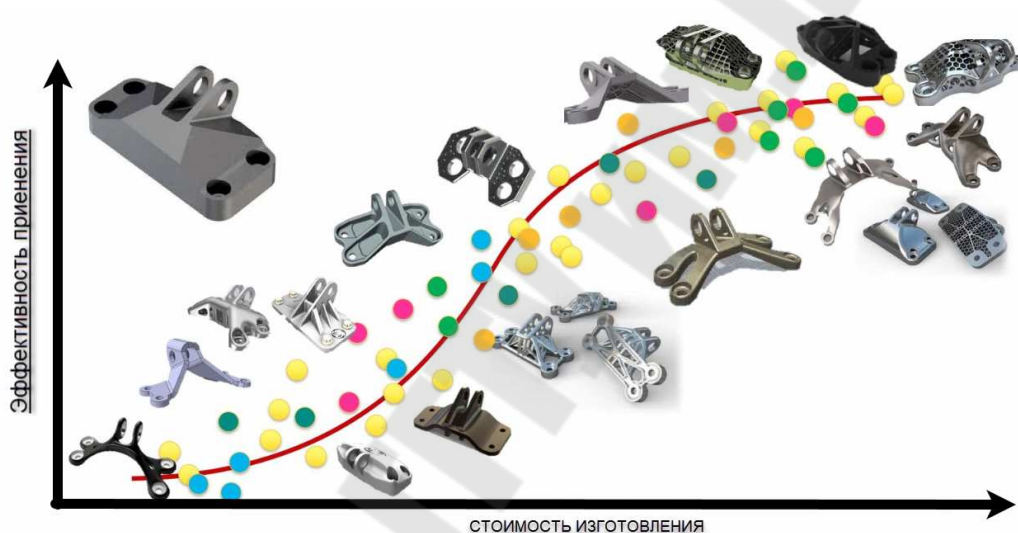


Рис. 71. Зависимость эффекта использования топологически оптимизированных деталей, от стоимости их изготовления.

Основными преимуществами являются:

- возможность существенно снизить массу, удалить "неработающий" материал, сделав деталь равнопрочной и более равномерно нагруженной;
- возможность заменить одной деталью сборочный узел и таким образом снизить массу (в том числе за счёт удаления из конструкции крепёжных элементов и фланцев) и упростить сборку;
- расширение функциональности детали, то есть добавление новых функций либо усовершенствование уже существующих.

Необходимо иметь в виду, что изготовление оптимизированной детали только с использованием аддитивных технологий может вызвать определённые сложности (например, связанные с последующим ремонтом данной детали или прочие, ещё не изученные). Поэтому целесообразность применения аддитивных технологий в таких случаях остаётся под вопросом.

Освоение технологий оптимизации и аддитивного производства, на данный момент ещё не полностью раскрывших весь свой потенциал, является отправной точкой для перехода к бионическому дизайну и ускорению развития этого направления.

На рынке присутствуют как специализированные проблемно-ориентированные решения для топологической оптимизации, так и программные комплексы, в которых имеется модуль для топологической оптимизации конструкций. Специализированные решения, как правило, обладают более широкими возможностями для проектирования бионических конструкций – большей номенклатурой настроек модели, граничных условий, доступных видов нагрузок или возможностями учёта технологических ограничений. Однако такое программное обеспечение может иметь недостатки, связанные с трудностями интеграции в общую CAD/CAE/CAM/PLM-концепцию предприятия, которая, как правило, строится на мультидисциплинарных программных платформах от ведущих мировых или отечественных производителей. Также сегодня мы видим очень много примеров, когда появившееся специализированное решение впоследствии входит в состав одной из CAD/CAE / CAM – платформ и становится одним из её модулей.

Существующие системы проектирования легко решают вопросы дизайна любой сложности, включая и бионические формы (рисунок 72). Для оптимизационного дизайна есть пакеты топологической оптимизации практически от всех ведущих игроков – Siemens PLM Software, Dassault Systemes, ANSYS, MSC Software и др. Сложнее обстоит дело с матричными структурами, пока их на рынке не так много.

Для создания концептуальной модели изделия, без отображения его внутренней структуры, с целью оценки его дизайна и формы возможно использование стандартных пакетов (рисунок 72). Если говорить о разработке объектов с оптимизированным для облегчения веса дизайном или о создании решетчатых структур, расчёте их прочности, то для таких целей необходимо использовать специализированное ПО, например Autodesk Netfabb. Стандартные пакеты с такой за-

дачей могут не справиться в связи с большой нагрузкой на программную и аппаратную часть.

Специальные пакеты или программное обеспечение, которое заточено под расчёты геометрии с бионическим дизайном, способны дать существенный выигрыш в качестве и скорости построения оптимизированных деталей, но в принципе построение таких изделий доступно всем, кто работает в CAD – программах. Что касается анализа и моделирования напряжения, то тут совершенно нет разницы, как выглядит исследуемая деталь, ПО будет одинаковым.

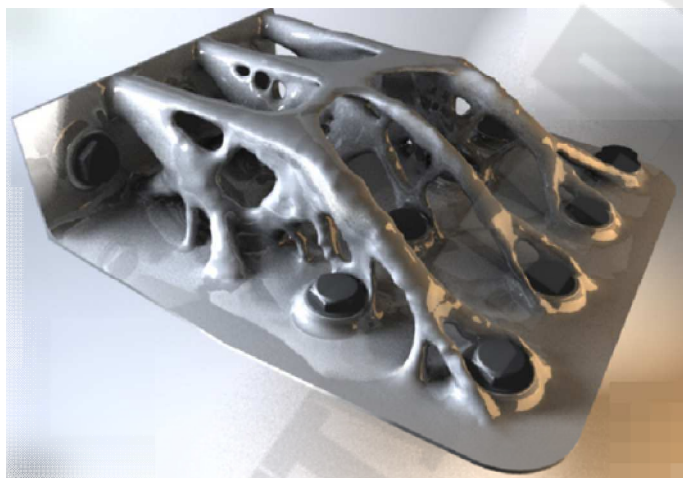


Рис. 72. Пример применения бионического дизайна в промышленности.

Для получения полного цикла – от моделирования до подготовки изделия к изготовлению аддитивными методами – можно использовать ПО Materialise. Для создания изделий в соответствии с принципами бионического проектирования необходимо высокотехнологичное инженерное программное обеспечение. В первую очередь это программные системы, позволяющие использовать топологическую оптимизацию. Признанным лидером на рынке таких систем является программная система OptiStruct, разработанная компанией Altair (США). К данному классу ПО относятся также модуль для расчёта механической прочности моделей solidThinking Inspire, тоже разработанный компанией Altair, решения для структурной оптимизации и оптимизации потоков Tosca Structure и Tosca Fluid компании Dassault Systemes (Франция), система для оптимизационных расчётов Optimus компании Noesis Solutions (Бельгия), программная среда оптимизации конструкций modeFrontier компании ESTECO

(Италия) (рисунок 74) и др. Если речь идёт о создании высокотехнологичных инженерных систем, вопросом ключевой важности является уровень подготовленности и компетенций специалистов, которые не может заменить даже самое высокотехнологичное программное обеспечение. Подготовка таких специалистов – "инженерного спецназа" – то есть тех, кто работает на передовой линии перспективных производственных технологий и новых способов организации производства, – процесс долгий и крайне трудоёмкий, именно поэтому их доля составляет всего 5–10 % от общего числа инженеров.

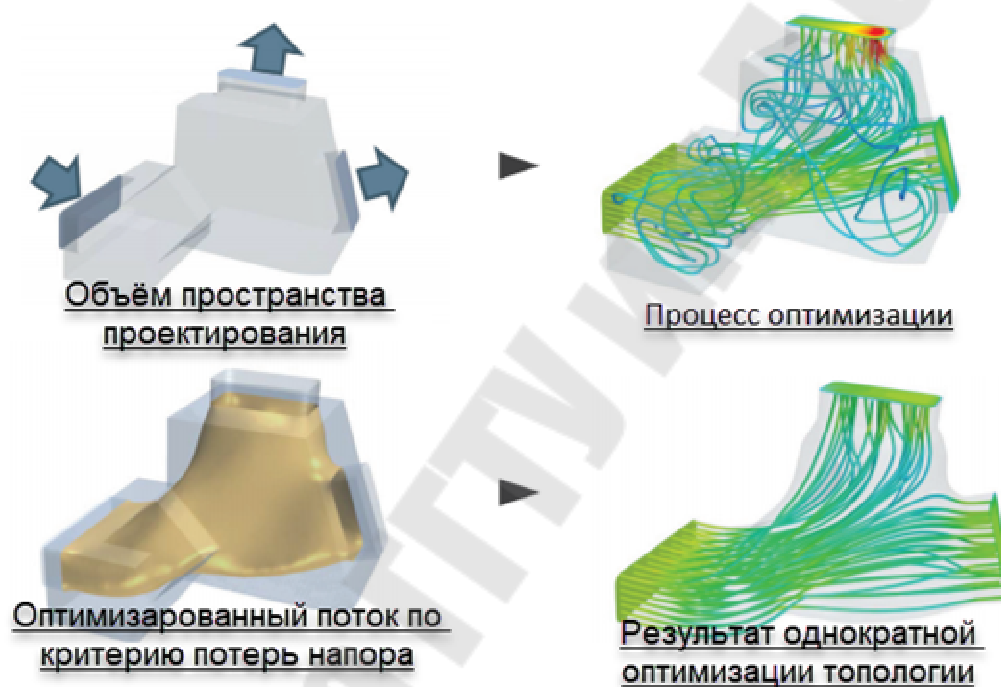


Рис. 73. Пример оптимизации топологии канала воздуховода

На данный момент наблюдается тенденция к сведению всех этапов разработки и производства в единую цифровую среду. Подобный подход позволяет обеспечить сквозной контроль над всем процессом создания изделия, над качеством и процедурами – от разработки до проверки результатов расчётов с дальнейшим переходом к подтверждению выполнения всех требований к детали и к процессу её производства. Тем не менее, использование широко распространённых программных пакетов позволяет обеспечить определённую гибкость, учитывая накопленный технологический опыт предприятий (в том числе в области цифровых технологий) по работе с деталями со специфическими особенностями.

Бионический дизайн – это не просто копирование встречающихся в природе решений, скорее, под этим термином подразумевается многокритериальная оптимизация, когда, например, необходимо создать лёгкую, экономически обоснованную конструкцию, удовлетворяющую заданным критериям по прочности, размерам и динамическим характеристикам. Подобная оптимизация подразумевает использование сложного математического аппарата.

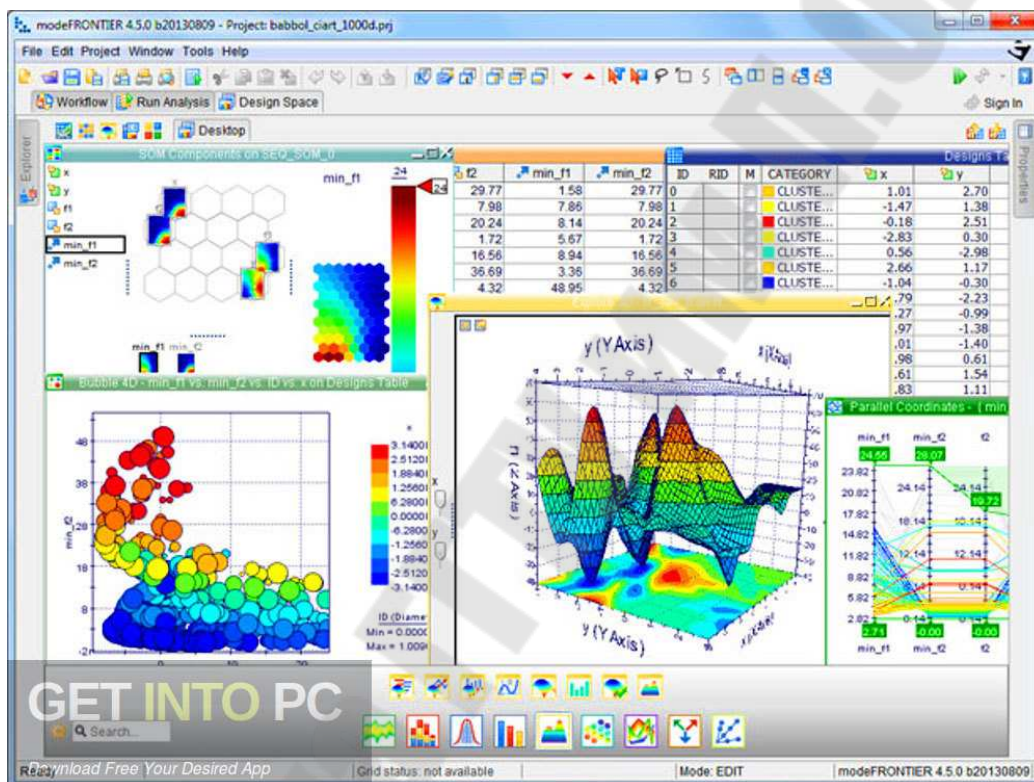


Рис. 74. Визуализация работы программы оптимизации.

Разумеется, для этих целей удобнее использовать специально разработанный для топологической оптимизации инструмент. В данный момент выбор программ очень широк – от достаточно простых, с интуитивным интерфейсом и относительно небольшим функционалом, до сложных программных пакетов, способных работать с нелинейными системами. Разработчики программного обеспечения предоставляют возможность подобрать оптимизационный модуль под используемый на предприятии решатель, ориентируясь на проверенные алгоритмы расчёта. Для технического воплощения бионической

модели, очевидно, необходимо обеспечить сложную настройку инженерного процесса (рисунок 75) под данный проект и его встраивание в технологическую цепочку. Насколько в этой связи рентабельно внедрять принципы бионического дизайна в существующее производство? Является ли более эффективным путём создание с нуля нового производства? Или тот или иной способ реализации бионического проекта зависит от целевой задачи – оптимизировать типовые элементы и конструкции либо же организовать производство нового изделия со сложной и нестандартной структурой? Здесь всё зависит от конкретных задач. Если говорить о встраивании в заводские процессы небольшого производственного и программного комплекса, то это возможно. Однако, как правило, внедрять принципы бионического дизайна в существующее производство экономически невыгодно из-за технологических ограничений разрабатываемой продукции.



Рис. 75. Распечатанная деталь из металла в разрезе.

Рентабельность внедрения зависит от проекта, продукта и функциональной критичности деталей, которые необходимо изготовить.

Преимущества этого подхода наиболее очевидны при его использовании для целей быстрого прототипирования на стадии эскизного проекта. Одновременное исследование множества решений (не одного-двух) позволит существенно снизить риски при разработке продукта. Всё это обеспечивает ощутимый выигрыш во времени, а следовательно, и в стоимости разработки. Такое внедрение будет выгодно в случае производства небольших стандартизированных деталей после изучения параметров повторяемости изготовления (отклонения значений различных параметров). Однако в случае производства массивных критичных деталей, требующих прохождения сертификации, необходимо предварительно пройти новые этапы утверждения и, возможно, определить новые критерии.



Рис. 76. Распечатанная "в металле" деталь после механической обработки рабочих поверхностей.

Кроме того, появляются новые перспективы производства продуктов, которые при использовании традиционных технологий невозможно было себе представить, или они были слишком дороги. Новые формы и структуры могут быть созданы с применением таких материалов, как композиты или наноматериалы. И напротив, дорого-

стоящие композитные детали могут быть заменены металлическими структурами, лёгкими и хорошо изученными. Исследование характеристик материалов после этапа эксплуатации изделия также способствует его оптимизации.

У бионического дизайна имеется значительный недостаток – конструкция, спроектированная в инженерной системе CAD, после топологической оптимизации теряет всю параметризацию, что представляет собой определённую проблему. Именно поэтому объектами оптимизации являются в основном разные кронштейны, а не базовые несущие элементы. Возможно, чтобы преодолеть эти недостатки, топологическая оптимизация будет в будущем встроена в CAD-системы

Большинство производителей идёт от малых целей к более сложным и, вероятно, это правильно. Сначала исследуются небольшие детали, изготовленные малыми партиями, оценивается эффект от внедрения таких изделий, прикидывается стоимость изменения больших деталей и далее задачи усложняются. Кто-то ограничивается заказом небольших партий, а кто-то покупает соответствующее оборудование через 2–3 месяца. Здесь необходим поэтапный подход. Следует начинать с оптимизации простых деталей и автоматизации более простых процессов, которые затем будут использоваться для работы с более сложными деталями и сборочными узлами (рисунок 77).

Следующим этапом будет интегрирование методов оптимизации, при которых концепция нового продукта будет разрабатываться исходя из требуемых функций. Заключительным этапом будет квалификация и сертификация каждой фазы разработки и каждого элемента производства (металлические порошки, лазеры и так далее).

Проектирование изделий с применением принципов бионического дизайна требует компетенций высокого уровня и соответствующего набора высокотехнологичных инструментов (в том числе программного обеспечения и суперкомпьютеров). Более того, полностью использовать потенциал технологий оптимизации позволяют только аддитивные технологии, так как в силу сложной геометрии изготовление конструкций, полученных в результате оптимизации, посредством традиционной механообработки даже на современных многофункциональных станках с ЧПУ является либо невозможным, либо крайне затратным. Однако важно понимать, что, применяя бионический подход, мы не ставим себе целью удешевление конечного продукта. Сочетание технологий топологической оптимизации с ад-

ддитивными технологиями даёт возможность получить продукт с принципиально новым дизайном – "за гранью интуиции главного конструктора", что в свою очередь позволяет снизить эксплуатационные издержки за счёт снижения массы изделия и повышения его технико-эксплуатационных характеристик. Также стоит отметить, что внедрение отдельных технологий при старых производственных мощностях и традиционном подходе к производству зачастую удорожает конечную продукцию.

Долгосрочной перспективе для обеспечения глобальной конкурентоспособности производимой продукции необходим повсеместный переход на новый технологический уклад. Но перевооружение производства – это весьма длительный, постепенный и ресурсоёмкий процесс. Для этого во всем мире создаются программы по технологическому развитию, призванные способствовать повышению конкурентоспособности производств и конечной продукции в отдельной стране или регионе. Такие программы уже запущены в США, ЕС, Китае.

Очевидно, что изготавливать изделия с особо сложным бионическим дизайном (рисунок 77) можно только с помощью аддитивных технологий ввиду того, что традиционные технологии производства накладывают достаточно жёсткие ограничения на конструкцию изделия.

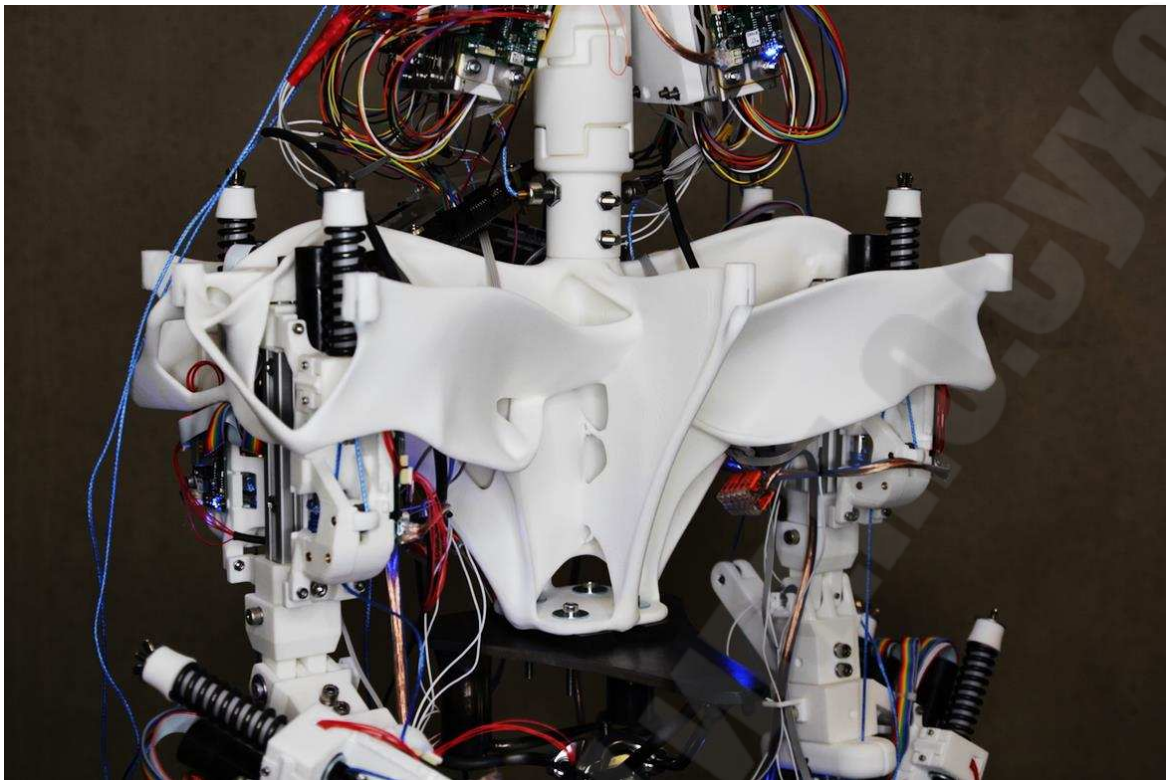


Рис. 77. Продукт генеративного дизайна в готовом изделии.

Где пролегает та грань, которая разделяет возможность реализации бионического проекта посредством традиционных производственных процессов либо только методами АМ? Вообще, какими технологиями и оборудованием должна обладать компания-производитель, чтобы работать с бионическими моделями? Практически все аддитивные технологии имеют весьма существенный недостаток – низкая производительность, которая свойственна процессу послойного синтеза, причём, чем более высокая точность требуется, тем менее производительным является процесс. В настоящий момент эти технологии наиболее эффективны в единичном и опытном производстве изделий аэрокосмической индустрии и в некоторых специфичных отраслях, при производстве, например, лопаток турбин, в медицине и проч.

Если мы говорим об изготовлении металлических деталей, то во многих случаях 5-осевой станок с ЧПУ сделает бионическую деталь быстрее и с более высоким качеством. Что касается производства пластмассовых изделий, выжигаемых моделей, литьевых форм и

стержней, то здесь аддитивные технологии, несомненно, весьма перспективны и уже активно занимают свои ниши.

Эта грань достаточно трудно определяется. При выборе способа производства необходимо искать баланс между экономической целесообразностью и технологической возможностью. Но в данном вопросе кроется и ответ на него. На практике некоторые изделия просто невозможно получить иначе как с помощью аддитивных технологий либо это является очень затратным мероприятием, например, когда необходимо изготовить деталь внутри детали или сложные сетчатые конструкции. Специфику технологий и оборудования диктуют используемые материалы, требуемые характеристики, количество а также способы производства изделия.

Грань устанавливают возможности традиционных методов изготовления и соображения целесообразности. На самом деле, изготовить некоторые изделия с бионическим дизайном можно и традиционным литьём по выжигаемым моделям, но сама модель все равно будет сделана аддитивным методом. Что касается работы с бионическими моделями, то выбор способа изготовления также зависит и от потребностей компании. Самый простой инструмент работы – Интернет. С его помощью любая компания может заказать изготовление своей детали хоть из пластика, хоть из металла. Если же речь идёт о самостоятельном изготовлении, то тут нет однозначного ответа, какой выбор будет наиболее правильным. Это зависит от того, какие задачи ставит перед собой компания, так как именно эти задачи определяют целесообразность применения тех или иных технологий или оборудования. Безусловно, аддитивные технологии позволяют максимально полно реализовать потенциал бионического дизайна и технологий топологической оптимизации конструкций. Однако помимо целей достижения минимальной массы и максимальной жёсткости необходимо учитывать технологический и экономический аспекты.

В процессе создания бионических конструкций выполняется конструкторская и технологическая проработка детали. На данном этапе и принимается решение о выборе технологии изготовления и способов адаптации формы и конструкции детали под данную технологию. Такая адаптация и проработка требуются как при использовании традиционных технологий, так и при изготовлении методами АМ (с целью обеспечения прочностных характеристик и минимизации поддерживающих структур). Ключевым фактором в данном случае является себестоимость изготовления деталей, а также объёмы произ-

водства. АМ в первую очередь эффективно для изготовления деталей сложной формы при небольшом объёме производства и сжатых сроках поставки.

На основе одной и той же бионической концепции можно выполнить конструкторскую и технологическую проработку изделия с помощью разных технологий и изготовить полученную деталь как традиционными методами (например, электроэрозией), так и при помощи АМ. Таким образом, грань между применением АМ и традиционными технологиями производства при реализации моделей с бионическим дизайном достаточно тонка и зависит от особенностей каждого конкретного проекта. Часто эффективным решением является некоторое упрощение и утяжеление конструкции при условии существенного выигрыша в её себестоимости. Условия конструирования постоянно меняются. Появляющиеся технологии позволяют отбросить некоторые ограничения и в то же время создают новые. Помимо новых возможностей производства конструкторы должны учитывать техническую спецификацию продуктов, принимать во внимание аспекты эксплуатационной технологичности и ремонтпригодности, собираемости, также как и обычные ограничения, связанные со статической и динамической прочностью, аэродинамикой, термикой, живучестью, должны осуществлять анализ видов и последствий потенциальных отказов и т. п. Зачастую эти ограничения должны быть полностью пересмотрены с учётом новых технологий производства. Также необходимо отслеживать, не проявляются ли под действием различных ситуаций, возникающих на протяжении жизненного цикла продукта, какие-либо новые явления, вызванные новыми параметрами, связанными с использованием нового способа производства или нового материала.

Аддитивные технологии в полной мере предоставляют возможность реализовать преимущества, которые несёт в себе топологическая оптимизация. Однако во многих случаях возможно применение и традиционных производственных технологий, например литья (как в случае с опорой РКП) или ЧПУ-обработки.

Но используя ЧПУ-обработку, следует помнить, что её применение снижает стоимость изделия, при этом одновременно снижаются и технические характеристики изделия, в то время как его эксплуатация удорожается.

Благодаря применению бионического подхода, включающего компьютерный инжиниринг, топологическую оптимизацию и адди-

тивные технологии, массу детали удалось снизить в 4,39 раза по сравнению с оригинальным изделием на основе традиционных для отрасли решений (с 1,046 до 0,238 кг). Далее, для одной из геометрий кронштейна в рамках проекта была выполнена адаптация под субтрактивное производство – обработку на станке с ЧПУ. Проигрыш в массе детали, изготовленной с помощью традиционной механообработки, по сравнению с произведённой аддитивным методом, составил около 30 %. С другой стороны, выигрыш по сравнению с оригинальным изделием оказался существенным – масса детали была снижена в 3,35 раза.

Что касается инструментов, необходимых для применения принципов бионического дизайна, то если речь идёт о стадии проектирования, – это по крайней мере базовый набор высокотехнологичного инженерного ПО, в первую очередь технологий компьютерной оптимизации, так как эти технологии являются основой бионического дизайна.

Наибольшую выгоду от применения принципов бионического дизайна можно извлечь в таких высокотехнологичных отраслях, как автомобилестроение, авиастроение, ракетостроение, где крайне важно обеспечить минимальный вес изделия при сохранении (или повышении) всех его технико-эксплуатационных параметров. На сегодняшний день уже есть примеры изготовления изделий подобного рода – заделы в этой области уже имеют GE, Lockheed Martin и другие мировые лидеры высокотехнологичных отраслей промышленности.

В силу относительной новизны и в то же время востребованности технологии проблема сертификации бионических изделий, равно как и изделий, изготовленных при помощи 3Э-печати, действительно стоит достаточно остро, на данный момент ею занимаются многие мировые лидеры в различных отраслях, такие как Airbus, GE, Boeing.

Смысл цифровой сертификации, заключается в проведении тысяч виртуальных испытаний как отдельных компонентов, так и всей системы в целом, что даёт возможность радикально снизить количество натуральных испытаний.

Сегодня бионическое моделирование – это пока ещё, скорее, тенденция или модное направление в конструировании. Очевидными преимуществами оптимизированных конструкций являются уменьшение веса и экономия материала, что определяет, соответственно, и области применения, учитывая ограничения со стороны технологии.

Если говорить о преимуществах изделий, выполненных в бионическом стиле, в денежном выражении, то самой "выгодной" является сфера дизайна эксклюзивных вещей, так как здесь может быть самая большая добавочная стоимость и нет никакой сертификации. Если же говорить о более практических применениях, то, конечно, на первом месте космическая и авиационная отрасли, где достигается самый большой выигрыш за счёт уменьшения массы изделия, как-вые цели и преследуют технологии оптимизации и другие новые технологии производства.

Сегодня на некоторых предприятиях большая номенклатура деталей традиционной конструкции изготавливается методами АМ с целью сокращения сроков производства. Для авиационной техники это в основном неотчетственные детали (кронштейны, элементы механизации, детали, которые не входят в силовую схему двигателя и не несут значительных нагрузок). Одно из преимуществ, которое предоставляет бионический дизайн, – это снижение себестоимости производства за счёт оптимизации конструкции детали под технологический процесс при сохранении её эксплуатационных характеристик. Например, с помощью топологической оптимизации можно добиться снижения количества металлопорошковой композиции, необходимой для изготовления детали. Другим актуальным направлением топологической оптимизации является создание концепции массивных конструкций на ранней стадии проектирования. При наличии такой концепции конструктору понадобится меньше времени на доводку узла. Технологии изготовления при этом используются традиционные.

Процесс сертификации в авиационной отрасли является очень длительным и трудоёмким. Однако произведённая один раз сертификация новых технологий производства и методов оптимизации в будущем обеспечит индустриальный успех. Основное преимущество применения таких изделий очевидно – это снижение веса готовых продуктов и как следствие – экономия топлива. Например, компания Airbus использовала ПО Autodesk для создания сверхлёгкой перегородки в своих самолётах. Получившаяся конструкция на 45 % легче, чем традиционная перегородка. Это в свою очередь позволило снизить вес самолёта и сократить объём выбросов CO₂ в атмосферу. Также перспективным направлением является медицина. Проблема с сертификацией таких изделий безусловно существует, и она очевидна, однако переход к использованию бионических изделий в конструировании, на мой взгляд, только вопрос времени.

В сфере производства применение бионических, принципов ограничивается пока достаточно прозаическими задачами – оптимизацией уже существующих деталей и элементов конструкций с целью сделать их более лёгкими, прочными и экономичными. Соответственно, наибольшее практическое значение на сегодняшний день бионическое моделирование имеет для таких отраслей, как авиакосмическая, автомобильная, а также двигателестроение, то есть там, где облегчение деталей с сохранением или увеличением прочности имеет большое значение. Отдельным развивающимся направлением, востребованным в рамках небольших объёмов производства, является изготовление в связке с аддитивными технологиями "бионически" спроектированных деталей сложной геометрии, которые невозможно получить иным способом. Тем не менее, использование бионических принципов для проектирования и создания продукции нового поколения является набирающим силу технологическим трендом, постепенно проникающим в самые разные, в том числе высокотехнологичные, отрасли промышленности.

10. РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА

Процесс принятия решений всегда являлся, и будет являться неотъемлемой частью жизнедеятельности человека. Каждое наше решение связано с взвешиванием затратных и прибыльных статей при наличии ограничивающих и возмущающих (вероятностных) факторов. Далеко не всегда наш выбор падает на наиболее «дешёвый» вариант решения проблемы. Как мы при этом оцениваем наши решения? В наиболее простом варианте мы используем бинарный критерий оценки – правильное или неправильное решение. Соответственно алгоритм принятия решения в этом случае состоит из одного элементарного условия с результатом да или нет.

К более сложному случаю относится вариант с несколькими возможностями. Это требует от нас сопоставления (взвешивания) всех возможностей с последующим выбором одного наилучшего варианта. Так мы производим рациональный выбор. Алгоритм определения рационального выбора представляет собой цепочку простых условий.

Но, что делать, когда анализируемых вариантов бесконечное множество? В этом случае искомая величина рассматривается в виде функции зависимости от одной или нескольких переменных. Анализ этой функции на определение экстремума и называется процессом оптимизации. Координаты искомого экстремума будут соответствовать наилучшему решению поставленной задачи.

Таким образом, можно выделить три метода принятия решения:

Бинарный выбор – сравнение двух значений с последующим выбором одного, соответствующего поставленным условиям.

Рациональный выбор – сопоставление нескольких вариантов с последующим выбором одного, удовлетворяющего поставленным условиям.

Оптимизация – целенаправленная деятельность по отысканию функциональной зависимости между интересующими параметрами и её исследованию на определение экстремума, удовлетворяющего условию оптимизации.

Человек всегда старался организовать свою деятельность так, чтобы результаты её были наилучшими. При этом в большинстве случаев при решении вопроса о том, какой вариант или какой режим является оптимальным, огромную и часто решающую роль играли опыт и интуиция исследователя, проектировщика, эксплуатационни-

ка. Объяснялось это очень большой сложностью технологических процессов, огромным количеством и разнообразием взаимосвязей внутри каждого процесса. Для эффективного решения задачи оптимизации необходимо оценить влияние всех этих взаимосвязей и сравнить колоссальное количество возможных вариантов организации технологии.

Дать правильную оценку и сравнить огромное число вариантов на основе прежних, традиционных методов, было практически невозможно. Поэтому огромная роль отводилась интуиции человека, а это во многих случаях приводило к тому, что оптимизация процессов осуществлялась неэффективно. Преобладал метод «проб и ошибок». Очень часто на стадии разработки выбирался далеко не лучший вариант, а после пуска производства начинались бесчисленные переделки: ощупью искали пути улучшения процесса.

Попытки решения этой проблемы привели к созданию специальных математических методов и уже в 18 веке были заложены математические основы оптимизации (вариационное исчисление, численные методы и др.). Однако до второй половины 20 века методы оптимизации во многих областях науки и техники применялись очень редко, поскольку практическое использование математических методов оптимизации требовало огромной вычислительной работы, которую без ЭВМ реализовать было крайне трудно, а в ряде случаев – невозможно. Развитие кибернетики – науки об управлении сложными системами, широкое распространение ЭВМ привели к формированию оптимизации как нового направления, которое применяется к самым разнообразным областям техники, в том числе и в металлургии и в литейном производстве.

10.1. Роль методов оптимизации в литейном производстве

Основной целью любого производства является получение максимальной прибыли. Достичь этого возможно только при оптимальных соотношениях всех параметров, принимающих участие в процессе изготовления продукции. Выполнение этой задачи для реального производственного процесса является технологической утопией по ряду объективных причин:

- на любой технологический процесс производства продукции действует большое количество различных факторов, полноценное описание которых на сегодняшний день представляется практически невыполнимой задачей;

- математическое описание большинства физических характеристик производственных материалов до сих пор не имеет полной картины;
- многие теории взаимодействия производственных объектов и явлений не имеют однозначных теоретических и математических описаний и содержат большое количество допущений;
- высокая динамичность современных технологий и рыночных отношений требуют постоянной корректировки воздействующих параметров и критериев.

Таким образом, процесс оптимизации можно рассматривать как перманентную составляющую часть любого современного развивающегося производства.

Подтверждением этому является хорошая тенденция, которая сегодня уже переросла в практически обязательное требование – внедрение различных систем менеджмента качества. Одной из ключевых позиций таких систем является непрерывное улучшение производственных процессов.

Достижение основной цели в условиях литейного производства представляет собой разумное и эффективное использование всех ресурсов (человеческий ресурс, здания, оборудование, материалы) при одновременном сохранении (и даже повышении) качества выпускаемой продукции. Реализация этих условий обеспечивает не только снижение себестоимости выпускаемой продукции, но и повышение спроса и её конкурентоспособности. В условиях жёсткой конкуренции каждый процент брака, каждый килограмм нерационально израсходованного материала ведут к падению прибыли предприятия, заработной платы работников, потере квалифицированных кадров, остановке производства. В связи с этим абсолютно очевидна необходимость повышения качества продукции при одновременном снижении расхода всех используемых ресурсов.

Роль методов оптимизации в литейном производстве – уменьшение затрат на производство отливок при условии сохранения или улучшения их качества.

10.2. Постановка и классификация задач оптимизации.

Объекты оптимизации и критерии оптимальности

Постановку задачи оптимизации можно разбить на ряд этапов:

1. Определение объекта и цели процесса оптимизации.

В качестве объекта оптимизации могут выступать: процессы, агрегаты и оборудование, материалы, технология и человеческая деятельность по отношению к перечисленным выше объектам. В качестве цели процесса оптимизации ставится достижение экстремума некоторого параметра, наилучшим образом отражающего эффективность работы системы.

Объекты оптимизации могут быть с сосредоточенными и распределёнными параметрами.

Если объект таков, что можно пренебречь различием параметров процесса в разных точках и считать, что все они (концентрации, температура и др.) полностью выровнены по объёму, то это объект с сосредоточенными параметрами. В описании такого объекта отсутствуют производные по координатам, так как все они равны нулю, что сильно упрощает модель. В некотором смысле объект с сосредоточенными параметрами можно рассматривать как точку, в которой происходит процесс, поскольку никаких изменений от точки к точке здесь нет. Описание в этом случае получается наиболее простым.

Если объект характеризуется некоторым параметром, различным по своему значению в разных точках объекта, то можно сказать, что значения такого параметра распределены (по объекту). Если таких параметров несколько, то объект рассматривается как система с распределёнными параметрами.

Часто объект оптимизации удобно представлять в виде «черного ящика» (рисунок 78).

2. Определение критерия оптимальности.

Критерий оптимальности – это выходная величина, значение которой кладётся в основу оценки процесса при выборе его оптимальных показателей.

На основании выбранного критерия оптимальности составляется целевая функция, представляющая собой зависимость критерия оптимальности от параметров, влияющих на её значение. Вид критерия оптимальности или целевой функции определяется конкретной задачей оптимизации.

Таким образом, задача оптимизации сводится к нахождению экстремума целевой функции.

Наиболее общей постановкой оптимальной задачи является выражение критерия оптимальности в виде экономической оценки (производительность, себестоимость продукции, прибыль, рентабельность). Однако в частных задачах оптимизации, когда объект является

частью технологического процесса, не всегда удаётся или не всегда целесообразно выделять прямой экономический показатель, который бы полностью характеризовал эффективность работы рассматриваемого объекта. В таких случаях критерием оптимальности может служить технологическая характеристика, косвенно оценивающая экономичность работы агрегата (время контакта, выход продукта, степень превращения, температура). Но в любом случае любой критерий оптимальности имеет экономическую природу.

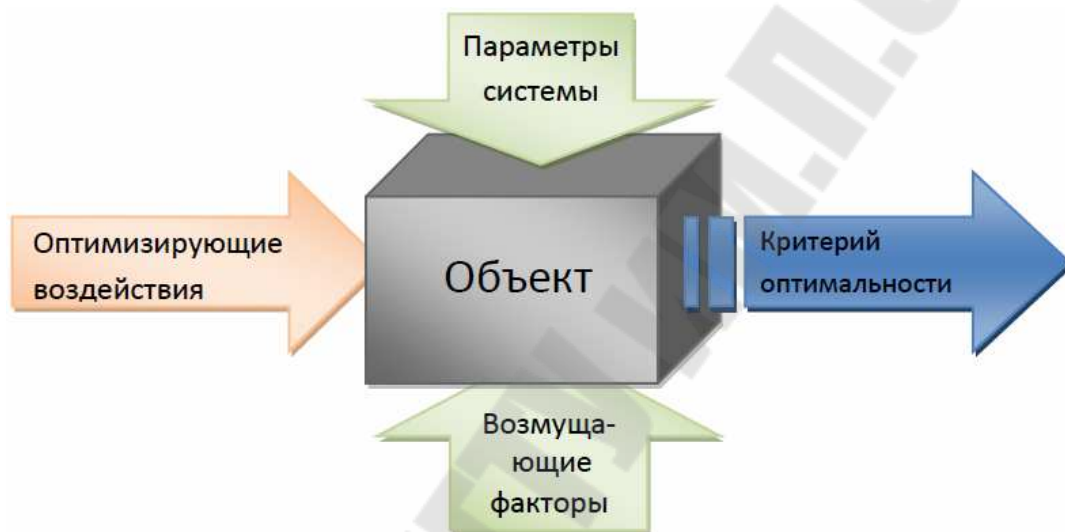


Рис. 78. Схема объекта оптимизации в виде «черного ящика»

Требования к критерию оптимальности:

I. Критерий оптимальности должен иметь ясный физический смысл и отражать наиболее существенные стороны процесса.

II. Критерий оптимальности должен иметь количественную оценку (выражаться числом). Когда это невозможно сделать (например, если речь идёт о внешнем виде изделия), то тогда в качестве численной характеристики применяют оценку в баллах.

III. Оценка качества процесса должна изменяться монотонно с изменением критерия оптимальности. (Т. е. мы должны оценивать процесс по критерию «чем больше, тем лучше», либо «чем меньше, тем лучше». Так, чем выше производительность, тем лучше. Чем ниже содержание примесей, тем лучше и т. д.). Признаком оптимального решения является достижение экстремума критерия оптимальности или целевой функции. Характер же экстремума (максимум или мини-

мум) определяется тем, какой критерий используется в задаче. При этом формулировка каждой задачи оптимизации должна требовать экстремального значения лишь одной величины, т. е. одновременно системе не должно приписываться два и более критерия оптимизации, т. к. практически всегда экстремум одного критерия не соответствует экстремуму другого. Типичный пример неправильной постановки задачи оптимизации: "Получить максимальную производительность при минимальной себестоимости". Ошибка заключается в том, что ставится задача поиска оптимума 2-х величин, противоречащих друг другу по своей сути. Правильная постановка задачи могла быть следующей: а) получить максимальную производительность при заданной себестоимости; б) получить минимальную себестоимость при заданной производительности. В первом случае критерий оптимизации – производительность, а во втором – себестоимость.

IV. Определение оптимизирующего воздействия. Оптимизирующее воздействие – это входные параметры системы, с помощью которых мы воздействуем на неё в процессе оптимизации. Оптимизирующее воздействие называют также управляющими параметрами или оптимизирующими факторами. Поскольку все контролируемые входы системы воздействуют на неё, в принципе любой из них можно считать оптимизирующим. Но, обычно выбирают те входы, которые наиболее существенно влияют на процесс и изменить которые наиболее просто. Параметры системы, которые не были выбраны в качестве оптимизирующего воздействия, должны быть ограничены.

V. Определение ограничений. Для сужения области поиска оптимума устанавливается ряд условий, и определяются интервалы варьирования значений параметров системы, не являющихся оптимизирующими воздействиями. С одной стороны это упрощает решение задачи оптимизации, но с другой, ограничивает область существования данного решения. Ограничения могут накладываться как по технологическим, так и по экономическим соображениям.

VI. Выбор метода оптимизации, который позволит найти экстремальные значения искомым величин. Выбор метода оптимизации основывается на достижении наилучших результатов с позиции точности, адекватности, высокой скорости определения экстремума, простоты и дешевизны решения поставленной задачи. Задачи оптимизации можно классифицировать по наличию или отсутствию условий:

Безусловная оптимизация. Если требуется определить экстремум целевой функции без задания условий на какие-либо другие величины, то такая оптимизация называется безусловной. Такие критерии обычно используются при решении частных задач оптимизации (например, определение максимальной концентрации целевого продукта, оптимального времени пребывания реакционной смеси в аппарате и т. п.).

Условная оптимизация. Если необходимо установить экстремум целевой функции при некоторых условиях, которые накладываются на ряд других величин (например, определение максимальной производительности при заданной себестоимости, определение оптимальной температуры при ограничениях по термостойкости катализатора и др.), то такая оптимизация называется условной.

Принято различать задачи статической оптимизации для процессов, протекающих в установившихся режимах, и задачи динамической оптимизации.

В первом случае решаются вопросы создания и реализации оптимальной модели процесса, во втором – задачи создания и реализации системы оптимального управления процессом при неустановившихся режимах эксплуатации.

В зависимости от критерия оптимизации различают:

- с одним критерием оптимизации – критерий оптимальности единственный;
- с множеством критериев. Для решения задач со многими критериями используются специальные методы оптимизации.

В зависимости от управляющих параметров:

- оптимизация при одной управляющей переменной – одномерная оптимизация;
- оптимизация при нескольких управляющих переменных – многомерная оптимизация;
- оптимизация при неопределённости данных;
- оптимизация с непрерывным, дискретным и смешанным типом значений управляющих воздействий.

10.3. Методы решения задач оптимизации

Поскольку сутью метода решения задачи на оптимизацию является определение экстремума некоторой функции, методы решения сводятся к поиску этого экстремума. В зависимости от количества экстремумов функции выделяют:

Локальные методы: сходятся к какому-нибудь локальному экстремуму целевой функции. В случае унимодальной целевой функции этот экстремум единственен и будет глобальным максимумом/минимумом.

Глобальные методы: имеют дело с многоэкстремальными целевыми функциями. При глобальном поиске основной задачей является выявление тенденций глобального поведения целевой функции.

В зависимости от подхода к решению задачи методы делятся на следующие группы:

- аналитические методы (например, метод множителей Лагранжа и условия Каруша-Куна-Таккера);
- численные методы;
- графические методы.

Аналитический метод оптимизации предусматривает аналитическое задание функций зависимости критерия оптимальности от воздействующих факторов и решение в виде определённого уравнения. Хорошо известным в математике методом аналитического решения задач оптимизации является метод множителей Лагранжа. Для использования аналитических методов оптимизации необходимо, чтобы расчётная формула критерия, ограничения и связи между координатами, управлениями и независимой переменной, а также начальные и конечные условия были представлены в форме функций, которые могут быть по крайней мере один раз дифференцируемыми и могут иметь конечное число точек разрывов. Однако решение некоторых уравнений представляется сложной, а иногда неразрешимой аналитической задачей. Поэтому для решения таких уравнений активно применяются численные методы.

Численный метод оптимизации предусматривает поиск решения методом подбора корней уравнения при заданных условиях решения уравнения. Суть метода заключается в том, что на каждом этапе итерации процесса в уравнение подставляется новое уточнённое значение аргумента функции. Подбор значений можно осуществлять различными методами, что будет определять количество итераций и собственно трудоёмкость процесса поиска решения. Так, при поиске решения одним из самых простых методов «метод половинного деления», количество итераций при определении корней простого уравнения может составить 10-14, а при использовании метода Ньютона количество итераций сокращается до 4-6.

Решение уравнений методом Ньютона относится к итерационным методам программирования. Решать уравнения методом Ньютона можно даже «вручную», используя калькулятор. Метод Ньютона обладает высокой скоростью сходимости. Обычно точность решения 10^{-5} - 10^{-6} достигается через 5-6 итераций. Недостатком метода является необходимость вычисления на каждой итерации не только левой части уравнения, но и значения производной. Для решения уравнения методом Ньютона можно составить программу для ЭВМ. Подходит практически любой алгоритмический язык программирования.

Графический метод широко распространён при решении задач линейной оптимизации с двумя переменными. Он основан на геометрическом представлении допустимых решений и целевой функции задачи. Линейное уравнение описывает множество точек, лежащих на одной прямой. Линейное неравенство описывает некоторую область на плоскости. Для того чтобы определить, какая полуплоскость удовлетворяет неравенству, необходимо выбрать любую точку на графике, не принадлежащую прямой, и подставить её координаты в неравенство. Если неравенство будет выполняться, то данная точка является допустимым решением, и полуплоскость, содержащая точку, удовлетворяет неравенству. Далее определённая область делится новой прямой, и выполняется следующая итерация метода.

10.4. Методы оптимизации, основанные на результатах производственного эксперимента

Достаточно часто для процесса оптимизации используется и сам объект оптимизации. В этом случае основой для решения задачи является эксперимент. Укрупнённо можно выделить два подхода к проведению производственного эксперимента:

Пассивный эксперимент. В пассивном эксперименте контролируем (т.е. наблюдаем), что же происходит в нашем объекте оптимизации, в процессе, в системе, не вмешиваясь в ход событий. Задача исследователя в случае пассивного эксперимента состоит в том, чтобы из многих факторов (т.е. управляющих воздействий) найти те, которые влияют на процесс наиболее сильно и определить характер их влияния.

На металлургических предприятиях пассивный эксперимент обычно осуществляется путем сбора данных из производственных паспортов (паспортов плавок), которые ведут обычно контролеры ОТК. Если какие-то параметры, важные для оптимизации процесса, не фиксируются в паспортах, их нужно фиксировать самому наблю-

дателю, и, если требуется, использовать для этого специальные приборы.

Преимущества пассивного эксперимента:

- простота реализации;
- исключение возможности каких-либо потерь и аварийных ситуаций;

- малые расходы времени и сил на его осуществление. Недостатки пассивного эксперимента:

- малый объем полезной информации, т.к. чаще всего стараются вести процесс в стабильном режиме, т.е. при малом колебании параметров.

Активный эксперимент.

Активный эксперимент применяется тогда, когда основной массив данных пассивного эксперимента находится в узких пределах изменений основных факторов, влияющих на процесс или при разработке новых материалов, агрегатов, технологий, которые только разрабатываются.

Преимущества активного эксперимента:

- возможность получения более полного объема полезной информации;

- возможность открытия новых возможностей системы. Недостатки активного эксперимента:

- возможности возникновения каких-либо потерь и аварийных ситуаций;

- высокие материальные и временные затраты.

Однако, несмотря на ряд преимуществ, методы оптимизации опытным путём имеют ряд существенных недостатков:

1. необходим реальный объект;
2. необходимо изменять технологический режим в значительных пределах, что не всегда возможно;
3. длительность испытаний и сложность обработки данных.

10.5. Применение систем математического моделирования для задач оптимизации в литейном производстве

На данный момент основное преимущество систем моделирования заключается в том, что они позволяют технологу пронаблюдать процессы, идущие в отливке и понять, по каким причинам образовывается тот или иной дефект в данной конкретной отливке при данных конкретных технологических параметрах, т. е. «увидеть» то, что в ре-

альности он увидеть не может. Именно это позволяет предложить эффективные технологические решения, которые затем можно ещё раз проверить с помощью моделирования. Когда технолог принимает то или иное технологическое решение, то при этом руководствуется некоторыми представлениями о ходе литейных процессов, которые у него сформировались в результате предыдущего опыта. Поскольку в обычном случае технолог может судить о ходе процесса только по косвенным признакам (наличие или отсутствие дефекта на конечной стадии), то эти представления далеко не всегда соответствуют действительности – просто в силу многофакторности и неоднозначности литейных процессов, сложности литейных геометрий, неустойчивости технологических параметров и т. д. Для того чтобы технолог мог сформировать у себя правильное представление о ходе реального процесса в какой-то отливке, требуется значительный опыт проверяемых по конечному результату правильных и неправильных решений. В определенном смысле для выработки адекватного решения для какой-то отливки, опытный технолог – литейщик должен иметь за плечами некоторый объем неудачных технологий. Моделирование же избавляет от необходимости нарабатывать этот дорогостоящий опыт методом проб и ошибок в течение многих лет, т. к. позволяет анализировать ход процесса непосредственно, а не по косвенным признакам. Оно позволяет понять, какие технологические факторы в данном случае действительно существенно повлияют на результат, в каком направлении и почему. Таким образом, главное назначение моделирующей системы не только в том, чтобы с помощью компьютера удешевить процесс отработки предполагаемых технологических вариантов, а в том, чтобы помочь технологу целенаправленно искать именно тот вариант, который обеспечит требуемое качество отливки. При этом немаловажно и то, что моделирование позволяет проверить не только работоспособность выбранной технологии, но также проверить устойчивость технологии к изменениям технологических параметров.

В реальном производстве технологические параметры всегда в некоторых пределах колеблются. С помощью моделирования можно проверить, обеспечит ли технология требуемое качество при подобных изменениях. Это гораздо выгоднее, чем принимать «авральные» меры, когда уже в освоённой отливке «вдруг» появляются дефекты, которые не появлялись в период отработки литейной технологии.

Эффективное использование систем компьютерного моделирования требует от пользователя осмысленных действий, творческого подхода и определенной квалификации. С другой стороны, использование технологом – литейщиком системы моделирования повышает его квалификацию, причём в достаточно короткое время. Таким образом, назначение системы моделирования и в том, что применение СКМ ЛП автоматически повышает профессиональную литейную квалификацию пользователя до требуемого уровня. Те представления о ходе реальных процессов, которые раньше технологи нарабатывали десятилетиями, с помощью моделирования можно получить за год, с минимумом затрат для производства.

Исходя из вышесказанного, можно резюмировать, что моделирование – это интеллектуальный, эффективный и безопасный способ разработки и оптимизации литейных технологий.

10.6. Методы математического моделирования как передовой инструмент оптимизации технологии литейного производства

Повышение интереса к методам математического моделирования в литейном производстве обязано одному неоспоримому преимуществу перед другими методами – возможностью проведения «удалённого» эксперимента без привлечения физических ресурсов. Это в свою очередь позволяет:

- сократить затраты на проведение экспериментов (трудозатраты, материальные и временные затраты);
- расширить возможности исследований путём снятия ограничений на варьирование входных параметров системы;
- обеспечить безопасность эксперимента посредством минимизации воздействия опасных и вредных факторов в процессе исследований.

С другой стороны, до сих пор имеет место ряд причин, препятствующих распространению и активному внедрению систем моделирования в литейном производстве:

- а) высокая стоимость специализированного программного обеспечения;
- б) ограниченное предложение подготовленных специалистов;
- в) некорректная и ограниченная оценка результатов моделирования;
- г) многофакторность процессов литейного производства, которая усиливает неопределённость при сопоставлении фактических и расчётных результатов;

д) высокая ресурсоёмкость расчётов, требующая наличия достаточно мощных компьютеров.

Важно заметить, что часть перечисленных недостатков излечима по мере развития компьютерных технологий и расширения их применения в производстве. Так, например, для моделирования литейных процессов необходимо создание 3D модели отливки и литниковой системы, и если некоторое время назад это требовало целенаправленного заказа, то сейчас при изготовлении моделей на станках с ЧПУ 3D модель отливки можно сказать уже имеется в наличии. Т. е. после относительно небольшого объёма работы в геометрическом редакторе её можно использовать для компьютерного инженерного анализа.

Программные пакеты моделирования литейных процессов относятся к большому семейству систем анализа – САЕ. Важно отметить, что современный уровень технологий не позволяет использовать системы моделирования литейных процессов для автоматической генерации готовых технологических решений! А именно это часто ожидается от программного обеспечения в рамках САПР.

Применение САЕ систем позволяет получить *прогноз* некоторых характеристик технологии *при установленных входных параметрах* системы, которые, так или иначе, *должен определить* опытный пользователь – *технолог*. В этом отношении нередко возникают сложности по внедрению САЕ систем в литейное производство. Для уточнения расположения средств компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) в производственном цикле рассмотрим три схемы организации производственного процесса: традиционную (без использования средств моделирования литейных процессов) и две «прогрессивных», подразумевающие внедрение современного метода разработки и оптимизации технологических процессов.

Традиционный подход (метод «проб и ошибок»).

На рисунке 79 представлена схема цикла подготовки литейной технологии в производство. Слабое место этой схемы заключается в том, что применяемые технологическим опытом и традиционные расчётные средства не в состоянии охватить все тонкости и факторы процесса изготовления отливки, в результате всегда присутствует вероятность получения не только неоптимальной технологической схемы, но и откровенно неудачного варианта с высоким уровнем брака. Основным недостатком данного подхода является то, что проявление дефекта происходит только после опробования технологии в производ-

стве. Это требует инициализации процесса коррекции технологии, который затрагивает весь цикл и все отделы подготовки производства. Так предприятие несёт значительные финансовые и временные затраты, которые сказываются на эффективности производства в целом. Разработка нового технологического процесса с применением СКМ ЛП.

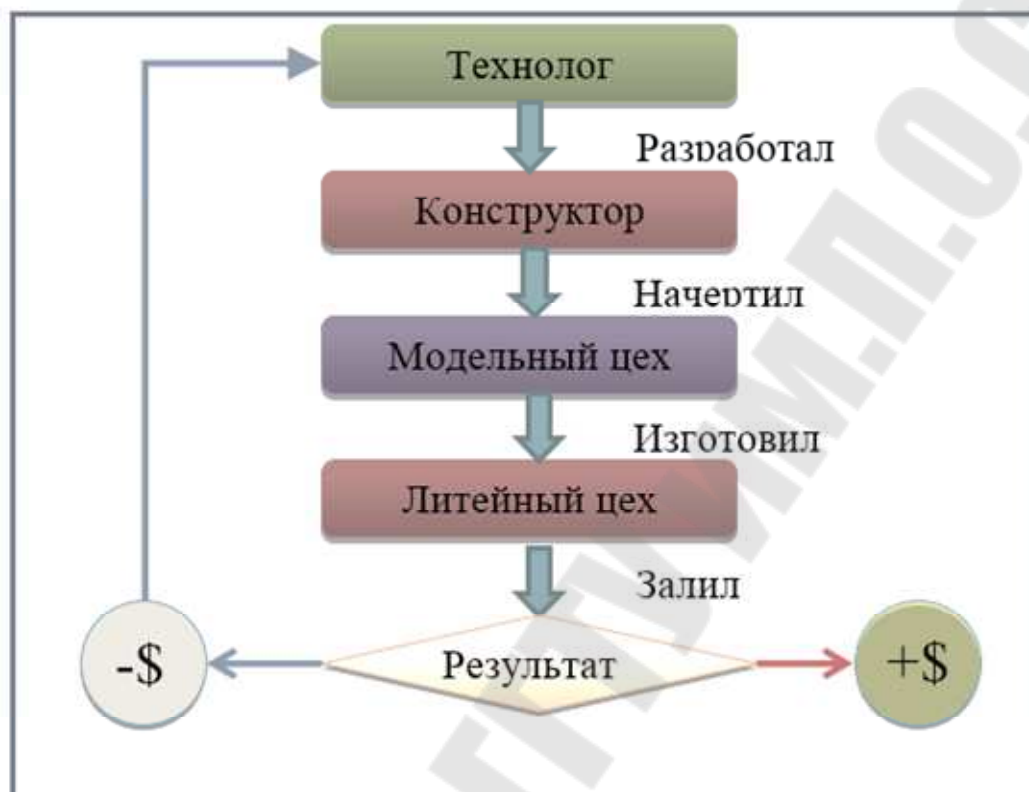


Рис. 79. Разработка технологии по методу «проб и ошибок»

Отличие схемы, представленной на рисунке 80 от традиционного подхода заключается во внедрении САЕ средств на этапе разработки технологии. Принципиально важно появление возможности виртуальной отработки технологии на основании прогнозов полученных с помощью СКМ ЛП без привлечения ресурсов отделов расположенных ниже по цепочке. Это позволяет значительно увеличить вероятность реализации оптимальной технологии с минимальным объёмом дефектов, практически с первого раза.

Новая схема предусматривает наличие двух циклов. В первом, затрагиваются ресурсы только двух отделов: технолога и САПР ЛП. На выходе из этого цикла ожидается проект оптимизированной технологии, который запускается в основной поток подготовки производства. Важно понимать, что даже наличие виртуальной проработки

технологии не позволяет полностью исключить вероятность получения отливки с дефектами, что не исключает наличие второго цикла характерного для первой схемы.

Эффективность новой схемы будет оцениваться суммарным объемом ресурсов, затраченных на этапе виртуальной проработки и опытного опробования. Конечно же, количество опытно-промышленных опробований резко сокращается, но добавляются расходы на виртуальную проработку, которые в свою очередь должны быть минимизированы. Для этих целей успешно могут быть использованы методы планирования эксперимента.

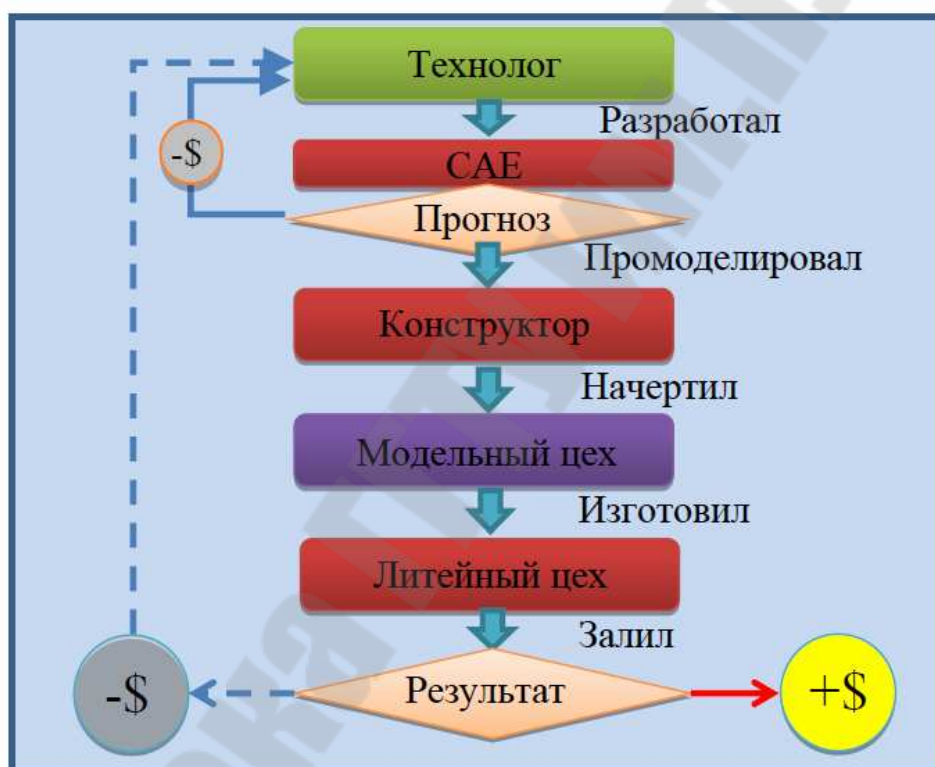


Рис. 80. Разработка технологии с использованием СКМ ЛП

10.7. Оптимизация действующей технологии с применением СКМ ЛП

Отличие способа оптимизации функционирующей технологии от разработки новой состоит в том, что уже существует определенная базовая, отправная точка, которая представляет собой информацию о параметрах технологии и итогах анализа брака в производстве. В этом случае представляется отличная возможность нахождения связи меж-

ду итогами прогнозирования виртуальной технологии и практически-ми показателями хода производства отливок. Наличие подобной связи усиливает объективность оценки технологических вариантов проработки литниковых систем и позволяет лучше учитывать ту или иную специфику производства. На рисунке 81 представлена подробная схема алгоритма процесса оптимизации действующей технологии с применением СКМ ЛП.

#	Действие	Ресурсы	Результат
1	Выбор детали.	План производства. Текущие показатели выхода годного и брака	Технология изготовления отливки для оптимизации.
2	Разработка 3D модели технологии производства отливки.	CAD – комплексы. База данных чертежной документации.	3D модель технологии производства отливки.
3	Математическое моделирование исходной технологии.	CAE-комплексы.	Отчет по результатам моделирования с исходными показателями действующей технологии.
4	Сравнительный анализ результатов моделирования и фактических показателей	Результаты моделирования. Данные по браку.	Зависимость между результатами расчета и фактическими данными.
5	Разработка мероприятий по оптимизации технологии.	Отчет-хронология по результатам моделирования.	Рекомендации по изменению технологии.
6	Изменение технологии на виртуальном уровне.	CAD – комплексы.	3D модель отливки с измененной технологией.
7	Моделирование измененной технологии.	CAE-комплексы.	Отчет-хронология по результатам моделирования.
8	Анализ и оценка результатов моделирования	Отчет-хронология по результатам моделирования	Решение о целесообразности применения новой технологии
9	Выдача ТЗ на проектирование и изготовление опытной модельной оснастки.	3D модель отливки с измененной технологией	Опытный образец модельной оснастки
10	Изготовление опытной партии отливок. Анализ результатов.	Отливки, изготовленные по опытной оснастке	Отчет по оценке опытной технологии.
11	Определение необходимости доработки технологии.	Отчет по оценке опытной технологии.	Заключение о результативности новой технологии.
12	Внедрение новой технологии	Заключение о результативности новой технологии.	Отчет по показателям опытно-промышленной партии. Акт внедрения.

Рис. 81. Алгоритм оптимизации технологии производства отливок с использованием СКМ ЛП

10.8. Обзор современных средств оптимизации в литейном производстве

Наиболее характерным представителем систем анализа литейных технологий являются системы для численного моделирования физических процессов, происходящих в отливках. С помощью этих систем на компьютере воспроизводятся тепловые, гидродинамические, усадочные, фильтрационные, деформационные и т. п. процессы. Как показывает опыт, программное обеспечение, применяемое для моделирования литейных процессов, должно использовать универсальные физические уравнения, но при этом в решении использовать различные процедуры и функции специально ориентированные именно на литейные задачи. Применение универсальных CAE пакетов, использующих неспециализированные общезначимые постановки, для решения литейных задач, как правило, весьма затруднительно, поскольку моделирование литейных процессов требует учёта большого объёма специфических особенностей, без которых адекватность решения будет низкой. Наглядным примером к сказанному является специализированный продукт FLOW 3D Cast компании Flow Science, базой для которого является комплекс FLOW 3D. Как это хорошо видно из названия CAE комплекса, FLOW 3D ориентирован на глубокое изучение гидродинамических процессов различных жидкостных сред. Первые попытки применения данного комплекса для изучения литейного производства показали необходимость разработки специализированного приложения, которым и стал FLOW 3D Cast. Это позволило не только увеличить адекватность результатов и расширить их информативность, но и значительно упростить процесс постановки задачи, что немаловажно для любого коммерческого продукта.

Так на рынке сформировалась отдельная группа CAE систем специализирующихся на моделировании литейных процессов. На сегодняшний день существует множество таких программных комплексов, но есть ряд лидеров, на которых следует обратить особое внимание. В таблице 8 представлены передовые программные продукты и их краткая характеристика.

Перечисленные СКМ ЛП в основном различаются степенью полноты факторов, учитываемых при моделировании, и, соответственно, стоимостью. Второе существенное различие связано с методами получения и решения разностных уравнений: уравнения тепломассопереноса могут быть записаны в дифференциальном (МКР) или интегральном виде (МКО и МКЭ). Перечисленные СКМ ЛП в основ-

ном различаются степенью полноты факторов, учитываемых при моделировании, и, соответственно, стоимостью. Второе существенное различие связано с методами получения и решения разностных уравнений: уравнения тепломассопереноса могут быть записаны в дифференциальном (МКР) или интегральном виде (МКО и МКЭ).

Таблица 8

Характеристики передовых СКМ ЛП

Название	Страна разработчика	Возможности*	Метод решения	Цена, Евро
Magmasoft	Германия	Г Т Н С	МКР	от 65000
Procast	Франция	Г Т Н С	МКЭ	от 60000
QuikCast	Франция	Г Т С	МКР	н/д
Flow3D	США	Г Т Н	МКО	28900
SolidCast	США	Г Т О	МКР	26500
LVMFlow	Россия	Г Т Н	МКО	29500
Poligon	Россия	Г Т Н	МКЭ	н/д

Г – расчёт температурных полей при кристаллизации и усадочных дефектов; **Н** – расчёт напряжений в отливке и остаточной деформации; **С** – моделирование структуры (зеренная структура, распределение феррита и перлита, размер графитных включений и т. п.); **О** – параметрическая оптимизация литниково-питающей системы в автоматическом режиме.

Краткая характеристика СКМ ЛП ProCAST

Система ProCAST разработана в США компанией UES Inc. более 25 лет назад. В своё время эксперты NASA признали ProCAST наиболее мощной и корректной программой для расчёта литейных процессов. В начале XXI века пакет был выкуплен французской компанией ESI Group. Одновременно в состав компании вошла швейцарская фирма Calcom, которая ранее занималась продажей ProCAST на территории Европы. Именно Calcom ESI продолжает развитие программы, начиная с версии ProCAST 2004.0.

В основе системы ProCAST лежат три решателя: гидродинамический, тепловой и решатель напряжений, которые позволяют производить моделирование основных технологических процессов литья с предоставлением базовых расчётных полей: скоростей потоков, температур, макро- и микроусадочных дефектов и напряжений. В качест-

ве дополнительных опций предлагается внушительный список модулей, расширяющих базовые возможности программы (рис. 2.3) [2].

Почти все модули ProCAST используют для решения соответствующих дифференциальных уравнений метод конечных элементов (МКЭ). Исключение составляет модуль расчёта газовой и микропористости, использующий метод конечных разностей (МКР) и модуль расчёта процесса зарождения и роста зернёной структуры (SAFE), сочетающий в себе МКЭ и клеточные автоматы.

Модульная структура решателей программы ProCAST (рисунок 82) позволяет проводить гибкий подбор средств прогнозирования для специфических условий каждого предприятия. Это позволяет значительно сократить затраты на приобретение продукта и повысить срок его окупаемости. В целом же, полный перечень результирующих и расчётных полей позволяет дать ответ на практически любой вопрос технолога относительно процессов, протекающих в форме при заливке и кристаллизации металлов (рисунок 83).



Рис. 82. Модульная структура СКМ ЛП ProCAST

Применение МКЭ в СКМ ЛП открывает широкие возможности для точного и гибкого описания геометрической формы отливок. Для подготовки сеточной модели в ProCAST имеется полностью автоматический генератор 2D и 3D (тетраэдральной) конечно-элементной сетки Visual-Mesh. Он позволяет импортировать CAD модели в форматах IGES, STEP и Parasolid и сеточные 2D и 3D модели в форматах NASTRAN, PATRAN, I-DEAS и Ansys. В состав Visual-Mesh включено несколько алгоритмов для автоматического создания многослойных сеточных оболочек, что позволяет формировать модели керамической формы, теплоизоляционных материалов и т. п., не прибегая к моделированию в CAD – системе. Не обошли стороной программисты и популярный формат описания геометрии STL. Генератор сеток позволяет генерировать 2D сетку из данных STL формата, однако следует учитывать среднее качество этого преобразования, так что весьма вероятно потребуются редактирование сетки.



Рис. 83. Возможности программы ProCAST по моделированию дефектов литья

Хотя система ProCAST специализирована для литейщиков, процедура задания в ней начальных и граничных условий требует достаточно глубокого понимания процесса моделирования, поскольку терминология диалоговых окон, в которых назначаются материалы граничных и начальных условий лежат в области физики, а не технологии. С одной стороны это вызывает затруднения у неподготовленных специалистов-технологов, но с другой стороны открывает намного больше возможностей по управлению и контролем над входными параметрами моделирования, что делает ProCAST очень гибким инструментом, с помощью которого можно наиболее полно и точно описать моделируемый технологический процесс на всех его стадиях. Список граничных условий, которые можно задать на поверхностях отливки и формы, позволяет тщательно смоделировать любые литейные процессы, включая самые экзотические. Кроме того, можно задать граничные условия в объёме и на поверхностях окружающих тел.

Большое влияние на адекватность результатов моделирования оказывают данные по физическим свойствам материалов. В общем случае требуется задать температурные зависимости параметров, где температура меняется от температуры заливки до температуры солидус и ниже. Такие теплофизические данные для определенной марки сплава невозможно найти ни в литературе, ни в нормативной документации, ни в паспорте на сплав. Обычно их получают или экспериментальным, или расчётным путём. В первом случае требуются дорогостоящие экспериментальные установки, во втором – не менее дорогостоящее специальное программное обеспечение.

Для избавления инженера от необходимости решения столь трудноразрешимой проблемы в состав ProCAST включены шесть термодинамических баз данных компании CompuTherm LLC (США), с помощью которых можно рассчитать свойства сплавов на основе Al, Fe, Ni, Ti, Mg, Cu. Введя химический состав сплава, пользователь получает все необходимые свойства для расчёта заполнения формы расплавом и тепловой задачи, а также часть свойств для расчёта напряжений (рисунок 84). При расчёте свойств учитывается эффект микросегрегации (диффузии в твёрдой фазе), который можно задать, используя три модели: «Lever» (правило рычага) – полное перемешивание, «Scheil» – полное отсутствие диффузии и «Back Diffusion» – средний вариант между «Lever» и «Scheil». Характер протекания

диффузии зависит от скорости охлаждения, что учитывается при расчёте свойств.

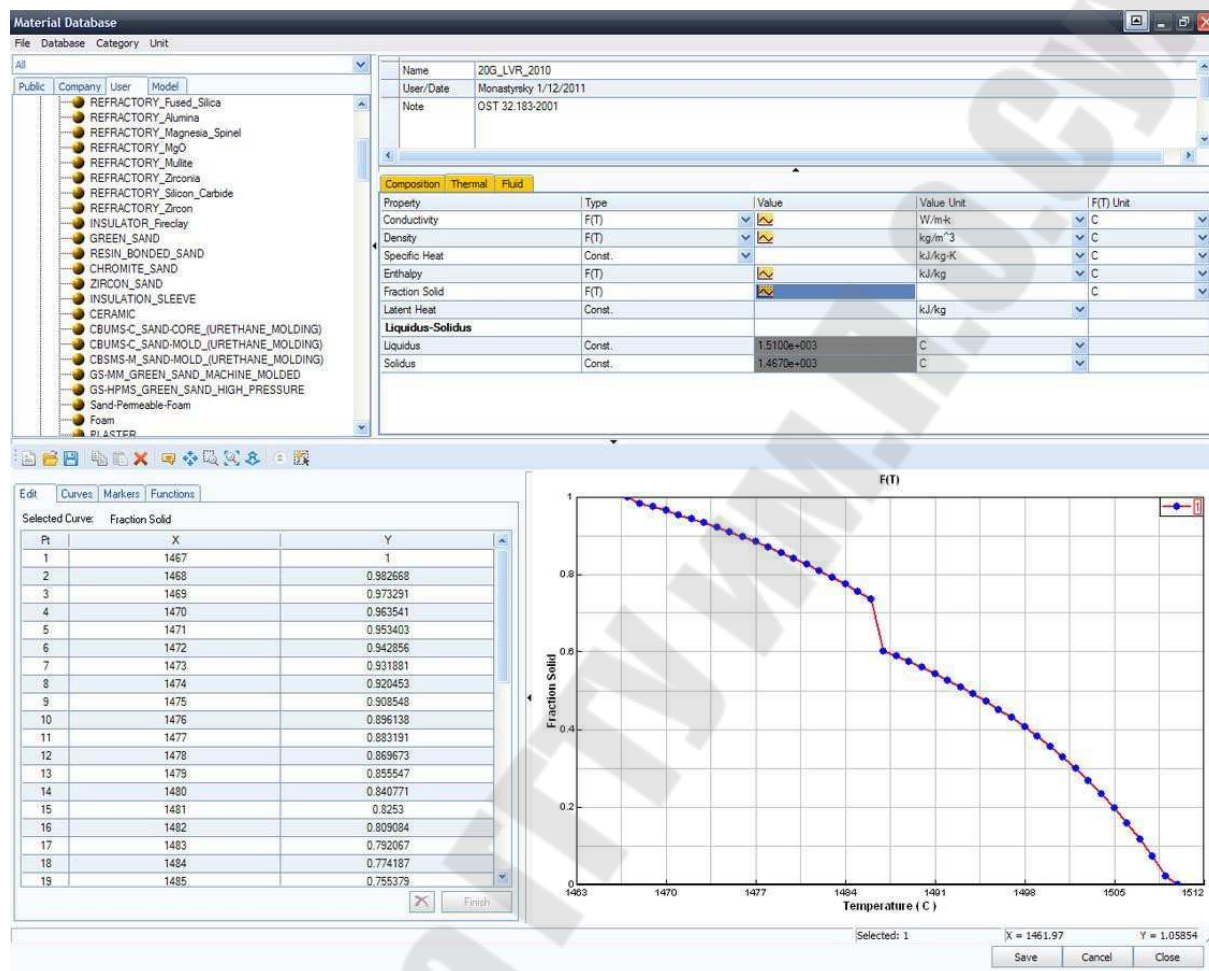


Рис. 84. Термодинамическая база данных свойств сплавов

Развитие компьютерных технологий позволяет в последнее время реализовывать сложные оптимизационные алгоритмы, и разработчики СКМ ЛП стараются предложить подобные решения для литейного производства. РАМ-ОПТ

- модуль ProCAST для оптимизации геометрии и параметров литейного процесса. Помогает исследовать устойчивость производственного процесса к изменению различных параметров. Например, модуль может выполнить минимальное количество вычислений для оценки риска появления пористости в зависимости от возможных отклонений значений этих параметров.

Представленный краткий обзор особенностей продукта ProCAST позволяет выделить его основные преимущества и недостатки.

Преимущества программы:

- самый большой выбор форматов файлов для импорта геометрии;
- высокая точность и гибкость описания геометрии объектов;
- широкие возможности по заданию начальных и граничных условий моделирования и параметров расчёта;
- наличие термодинамических баз данных открывает возможности для применения широкого спектра сплавов в расчётах;
- наличие пакетов оптимизационных алгоритмов, позволяющих автоматизировать исследования литейной технологии на устойчивость и оптимальные параметры.

Недостатки программы:

- высокая стоимость, но она оправдана возможностями программы;
- сложный интерфейс без поддержки русского языка;
- отсутствие отечественной базы данных по материалам и сплавам. (Встроенный генератор свойств даёт прогноз с большими отклонениями);
- генерация сеточной модели – основная проблема при работе с ProCast. На подготовку модели технологу может потребоваться много часов для проведения одного моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перспективные научные направления развития САД и САЕ. Как понятно из наблюдаемых тенденций развития коммерческих систем, продолжение развития систем в этих направлениях требует новых технологий прежде всего в области САЕ.

Многоуровневое моделирование и вычисления. Стандартные подходы к моделированию (например, повсеместно используемые подходы, основанные на неструктурированных сетках и конечных элементах) не позволяют даже при использовании НРС эффективно моделировать системы и материалы со сложной структурой различных масштабов: композиционных, наноматериалов, материалов, произведённых с помощью аддитивных технологий и биоматериалов. Например, локальная конфигурация волокон композиционного материала может иметь критическое влияние на максимальные напряжения; в то же время невозможно моделирование полной структуры на уровне отдельных волокон. Необходима разработка методов и систем, позволяющих производить вычисления на разных уровнях разрешения, пространственного и временного, используя различные модели, и контролировать ошибки вычислений при переносе информации между уровнями, максимизируя эффективность вычислений. Большинство существующих коммерческих продуктов не поддерживают автоматическую и контролируемую связь вычислений разного масштаба, хотя первые специализированные средства с поддержкой многоуровневого моделирования уже появились. Другой важный вариант многоуровневых вычислений – решение больших (сотни миллионов переменных) линейных и нелинейных систем уравнений, возникающих при моделировании, с помощью разных типов многоуровневых алгоритмов, одна из сильных сторон которых – хорошие возможности распараллеливания вычислений.

Методы понижения размерности. Сложные системы, состоящие из большого количества частей, материалы с гетерогенной структурой требуют больших вычислительных ресурсов для моделирования. Это делает оптимизацию (требующую многократного моделирования системы для разных значений оптимизированных параметров) либо невозможной, либо слишком медленной или затратной.

Применение существующих и разработка новых методов понижения размерности позволит автоматически создавать приближительные описания компонент, или частей системы, позволяющие на по-

рядки уменьшить вычислительные ресурсы для «внутреннего цикла» оптимизации.

Технологии интеграции дизайна, анализа и оптимизации. Эффективность современных систем CAD/CAE ограничена традиционной разделённостью компонент для разных стадий, создающей препятствия для ускорения цикла дизайна. Интеграция существующих методов и компонент, разработанных без учёта контекста оптимизации, имеет ограниченную эффективность.

Для интеграции всех этапов цикла в единое целое, для интегрированного моделирования разнородных физических процессов и систем (механических, тепловых, электрических) необходима разработка новых представлений, данных и алгоритмов, например, для оптимизации формы предпочтительны алгоритмы, не требующие генерации сеток или минимизирующие затраты на процесс генерации. Другим важным направлением являются исследования по созданию новых типов пользовательских интерфейсов для интегрированных систем с целью упрощения изучения пространства возможных решений, а также снижения требований к квалификации пользователя.

Эффективные и надёжные геометрические алгоритмы. Ведущие компании в области CAE в последнее время уделяли существенное внимание средствам геометрического моделирования, прежде всего связанным с построением сеток. В контексте оптимизации формы проблемы автоматического создания сеток, или использования CAD-геометрии напрямую (изогеометрический анализ), имеют большое значение.

Статистические методы и методы машинного обучения для инженерных приложений, работа с большими объёмами данных. Геометрическое и вычислительное моделирование сложных систем и структур создаёт значительные объёмы данных; применение статистических методов и методов машинного обучения позволяет находить критические зависимости системы от параметров, которые могут использоваться в процессе оптимизации и создания моделей пониженной размерности. Этот тип подходов уже успешно разрабатывается компанией DATADVANCE.

Другой аспект работы с большими объёмами данных – поиск геометрически подобных моделей, подобных или совпадающих с моделями, требующимися для новых разработок, сокращающих время проектирования или полностью устраняющих необходимость создания новых моделей в отдельных случаях. В отличие от текстового по-

иска поиск геометрии требует разработки новых технологий сравнения геометрических моделей. Эти технологии также необходимы для защиты интеллектуальной собственности. На мировом рынке только начинают появляться технологии такого класса от ведущих производителей (EXALEAD OnePart от Dassault Systemes, 3DPartFinder в SolidWorks).

Моделирование редких событий. Во многих задачах проектирования следует учитывать крайне редкие, но катастрофические для системы события, например эффекты потоков частиц на электронные компоненты спутников. Создание вычислительных методов, позволяющих эффективно обнаруживать возможные события такого рода и точно оценивать их последствия и вероятность, имеет фундаментальное значение для разработки критических систем, требующих высокого уровня надёжности.

CAD для биологических структур материалов. Современные методы дизайна и моделирования предназначены преимущественно для проектирования промышленных систем и механизмов различных типов и архитектурных конструкций. С развитием биоинженерии возникает необходимость проектирования биологических систем с учётом их естественного изменения (например, создание опорных структур для трансплантатов, искусственных органов). Такие задачи требуют развития новых математических и вычислительных методов, нацеленных на моделирование структур с учётом биологических процессов.

Использование сенсорных данных в процессе проектирования. Многие задачи современного проектирования, прежде всего связанные с индивидуализацией продуктов, требуют учёта контекста, т. е. уже существующих объектов, с которыми проектируемый продукт должен взаимодействовать, например, адаптации мебели к помещению либо одежды или обуви к потребителю. Это требует разработки эффективных автоматических методов построения компьютерных моделей, возможно, с учётом не только геометрии, но и физических параметров существующих предметов. В свою очередь, методы дизайна, анализа и оптимизации должны быть приспособлены к работе с автоматически построенными, часто неполными и неточными моделями реальных объектов. Другое направление исследований, связанное с использованием измерений в проектировании, – так называемая ассимиляция данных, т. е. разработка систематических подходов к адаптации вычислительной модели с включением в оптимизационный

процесс данных, полученных путём испытания прототипов или предыдущих версий продуктов.

Масштабы влияния. Хотя конкретные масштабы влияния оценить трудно, из всех технологических факторов информационные технологии, в частности технологии CAD/CAE, имеют наиболее широкое и существенное влияние на ускорение инноваций, снижение стоимости разработок новых продуктов и как следствие повышение конкурентоспособности.

Примеры такого влияния включают:

Для крупных компаний: системы CAD/CAE делают возможным полное моделирование сложной системы (например, самолёт, электростанция, спутник), включая сборку частей. Электрические, механические и химические процессы и их взаимодействие могут существенным образом сократить необходимость экспериментальной проверки отдельных систем и их переделки в результате несовместимости выявленной на поздних этапах разработки.

Например, компании Boeing благодаря использованию PLM и моделирования при создании 787 удалось уменьшить на год общее время, затраченное на разработку.

Для небольших компаний и стартапов: доступность интегрированных средств САХ, в частности ориентированных на пользователя, не обладающего компетенцией в определенной области, а также возможность использования открытых элементов дизайна существенным образом уменьшают риски и время разработки новых продуктов. Раньше небольшие компании пользовались преимущественно простейшими средствами CAD; последние инициативы Autodesk и других компаний по модели «программное обеспечение как услуга», а также CAD-стартапов, подобных sunglass.io, значительно расширяют возможности применения CAD/CAE и PDM для этой категории пользователей.

Заметим также: многие, если не все, новейшие технологии производства существенным образом зависят от программной поддержки. Например, использование систем аддитивных технологий в принципе невозможно без создания компьютерных моделей изделий, что объясняет интерес ведущих компаний 3D-печати Stratasys и 3D Systems к средствам CAD.

В качестве компонент общей системы PLM средства CAD/CAE также считаются необходимой частью перестройки производствен-

ных процессов для повышения эффективности и гибкости производства.

Оценки перспектив. Возможности для производителей. Поддержка отечественных стандартов, адаптация к специализированным требованиям потребителей. На данный момент можно сказать, что это одно из основных направлений работы большинства разработчиков систем CAD. Благодаря этому фактору на рынке присутствует значительное количество продуктов, ориентированных на специализированные приложения; особенно много таких продуктов в области приложений для АЕС, где поддержка национальных стандартов имеет первостепенное значение.

Разработка инновационных продуктов для мирового рынка (например, оптимизация, CAD для аддитивных технологий, полностью интегрированные продукты CAD/CAE, инновационные компоненты), основанных на фундаментальных разработках. Наличие большой научной традиции в области моделирования и оптимизации и сохранение относительно высокого уровня фундаментального образования создают определенные конкурентные преимущества.

Постепенное открытие платформ ведущих производителей CAD потенциально создаёт новые возможности в этой области по модели, например, разработки приложений на платформе Android (если, подобно Altair, ведущие производители начнут поддерживать распространение продуктов внешних производителей).

«Интеллектуальный аутсорсинг» – выполнение заказов крупных западных компаний на разработку модулей для крупных систем. Наибольшую ценность в области развития перспективных производственных технологий представляют первые два направления. Расширение первого направления, зависит от увеличения базы российских пользователей.

Возможности для потребителей. Потенциально средства CAD/CAE, особенно используемые совместно в контексте PLM, предоставляют существенные конкурентные преимущества для компаний-пользователей. В конечном счёте программное обеспечение лишь инструмент и определяющим фактором повышения эффективности считается организация производственного процесса, в том числе с учётом возможностей существующих инструментов CAD/CAE.

Для крупных компаний из стран бывшего СССР, ещё не выработавших стратегию в этой области, возможности в отсутствие ограничений, связанных с безопасностью, в целом эквивалентны существ-

вующим для крупных западных компаний, так как им доступны услуги и продукты компаний Dassault и Siemens PLM, а также консалтинговых компаний и интеграторов, работающих с этими системами.

Наиболее ограничены возможности средних и малых компаний по нескольким причинам:

- несоответствие функционала «коробочного» программного обеспечения нуждам потребителей;
- отсутствие понимания необходимости изменений в производственном процессе;
- недостаточный уровень подготовки персонала для использования CAD/CAE и трудность оценки экономического эффекта от внедрения дорогостоящих новых систем в производственный процесс.

Технические тенденции в развитии CAD/CAE, описанные выше, помогают решить часть этих проблем (снижение стоимости, упрощение использования), но не решают задачи преодоления несоответствия нуждам потребителей и выработки планов изменения процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев, О. А. Карбид кремния: технология, свойства, применение / О. А. Агеев [и др.] – Харьков: ИСМА, 2010.
2. Баничук, Н. В. Введение в оптимизацию конструкций / Н. В. Баничук – М. : Наука, 1986. – 303 с.
3. Бахвалов, Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – М. : Наука, 1987. – 600 с.
4. Бионический дизайн и аддитивные технологии. Инженеры компаний Toyota и Materialise представили прототип бионического автомобильного кресла, напечатанного на 3D-принтере – Режим доступа: <http://fea.ru/news/6266>.
5. Боровков, А. И. Бионический дизайн / А. И. Боровков [и др.]. / СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 92 с.
6. Боровков, А. И. Компьютерный инжиниринг: учеб. пособие / СПб.: Изд-во СПбПУ, 2012. – 93 с.
7. Валетов, В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы): учеб. пособие / В. А. Валетов. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 63 с.
8. Васильев, Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач: учеб. пособие для вузов. / Ф. П. Васильев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1988. – 552 с.
9. Волосова, М. А. Пути оптимизации процесса селективного лазерного плавления при помощи выбора стратегии обработки лазерным лучом / М. А. Волосова, А. А. Окунькова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 4(2). – С. 587–591.
10. Керамика для машиностроения / А. П. Гаршин [и др.] – М. : ООО «Научтехлитиздат», 2003. – 384 с.
11. Гибсон, Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер ; пер. с англ. под ред. И. В. Шишковского. – М. : Техносфера, 2016. – С. 656.
12. Голод, В. М., Денисов В. А., Теория, компьютерный анализ и технология стального литья / В. М. Голод, В. А. Денисов. – СПб. : ИПЦ СПбГУТД, 2007. – 610 с.
13. Довбыш В. М., Забеднов П. В., Зленко М. А. «Аддитивные технологии и изделия из металла», ФГУП «НАМИ». – Режим доступа: http://www.nami.ru/upload/AT_metall.pdf.

14. Дульнев, Г. Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричняк – Л. : Энергия, 1974. – 264 с.
15. Захаров, М. Г. Моделирование и оптимизация динамических систем: учеб. пособие/ М. Г. Захаров [и др.]; под общ. ред. В.А. Полянского. – СПб : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 202 с.
16. Зленко, М. Аддитивные технологии в машиностроении / М. Зленко, А. А. Попович, И. Н. Мутылина. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 222 с.
17. Зорин, С. Технологии быстрого прототипирования / С. Зорин. – Режим доступа: http://www.vzrt.ru/gr_tec.php, 2006.
18. Комаров, В. А. Проектирование силовых аддитивных конструкций: теоретические основы / В. А. Комаров // Онтология проектирования. – 2017. – Т. 7, № 2(24). – С. 191–206.
19. Контроль качества аддитивного производства в реальном времени с системой QMmeltpool 3D – Режим доступа: <http://3dtoday.ru/blogs/digispace/quality-control-of-additive-manufacturing-in-real-time-with-the-system/>.
20. Курц У., Фишер Д. Фундаментальные основы затвердевания. – М. – Ижевск : Институт Компьютерных исследований. – 2013. – 300 с.
21. Марченко, П. А. Топологическая оптимизация модели кронштейна под установку звёздного датчика / П. А. Марченко, А. Д. Новокшенов // XLIV Неделя науки СПбПУ : материалы научного форума с международным участием. Институт прикладной математики и механики – СПб.: Изд-во Поли – техн. ун-та, 2015. – С. 97–100.
22. Моделирование методом послойного наплавления (FDM) 3D Today – Режим доступа: http://3dtoday.ru/wiki/FDM_print.
23. Назаров, А. С. Фотограмметрия / А. С. Назаров. – Минск: ТетраСистемс, 2006. – 368 с.
24. Новости аддитивных технологий. Дочерняя компания Airbus – APWorks представила электромотоцикл с бионической рамой, «напечатанной» на 3D-принтере. – Режим доступа: <http://fea.ru/news/6412>.
25. Новости компьютерного инжиниринга. Бионический дизайн. – Режим доступа: <http://fea.ru/news/6156>.
26. Новости компьютерного инжиниринга. Лучшие компьютерные технологии топологической оптимизации и промышленного дизайна – solidThinking Inspire и Evolve – в России! – Режим доступа: <http://fea.ru/news/6026>.

27. Павлов, В. А. Зависимость температуры плавления от размеров нанокристаллов на примере простого вещества / В. А. Павлов, П. Н. Воронцов-Вельяминов // Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы: получение, свойства, применение. V Ставеровские чтения: Тр. научн.-техн. конф. – Красноярск, 2009. – С. 16–17.

28. Первозванский, А. А. Курс теории автоматического управления. Учебное пособие/ А. А. Первозванский – СПб.: Лань, 2010 – 624 с.

29. Публичный аналитический доклад по направлению «Новые производственные технологии» // Сколковский институт науки и технологий, 2015.

30. Рейтман, М. И. Методы оптимального проектирования деформируемых тел (постановки и способы решения задач оптимизации параметров элементов конструкций) / М. И. Рейтман, Г. С. Шапиро. – М. : Наука, 1976. – 258 с.

31. Руководство для учащихся по изучению программного обеспечения SolidWorks, 2010

32. Смольников, Б. А. Механика в истории науки и общества / Б. А. Смольников. – НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2014. – 608 с.

33. Таова, Т. М. и др. Температура плавления малоразмерных металлических частиц Т. М. Таова [и др.] // Фазовые переходы, упорядоченные состояния и новые материалы. – 2009. – С. 1–7.

34. Шваб, К. Четвёртая промышленная революция./ К. Шваб. – Эксмо, 2016, 475 с.

35. Шишковский, И. В. Лазерный синтез функциональных мезоструктур и объемных изделий / И. В. Шишковский. – М. : Физматлит, 2009. – 424 с.

36. Additive Manufacturing at Ceralink. – Режим доступа: <http://www.ceralink.com/AMproducts>.

37. Additive Manufacturing Study Shows Cuts in Material Consumption and Reduced CO2 Emissions // Powder Metall Rev. – 2013 – Режим доступа: <http://www.ipmd.net/articles/002490.html>.

38. Altair HyperWorks Documentaion, version 13.0[Текст]: Altair Engineering, Inc., 2014

39. Amato K.N. et al. Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting // Acta Mater. Inc. – 2012. – Vol. 60, № 5. – P. 2229–2239.

40. ANSYS Documentation Release 15.0.

41. Barnatt Ch. 3D printing: The next industrial revolution. Nottingham, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013. – 276 p.
42. Beam Machines – laser metallic deposition – Режим доступа: <http://www.beam-machines.fr/uk/en/>.
43. Bendsoe, M. P. Generating Optimal Topologies in Struct Design Using a Homogenization Method / М. Р. Bendsoe, N. Kikuchi // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – Vol. 71. – P. 197–224. – 1988.
44. Bendsoe, M. P. Topology Optimization. Theory, Methods and Applications / М. Р. Bendsoe, O. Sigmund. – Springer, 2003.
45. Casati R., Vedani M. Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles // A Review. Metals. – 2014. – 4. – P. 65–83.
46. Mechanical and in vivo performance of hydroxyapatite implants with controlled architectures. Biomaterials / T. M. G. Chu, D. G. Orton, S. J. Hollister, S. E. Feinberg, J. W. Halloran. – 2002. – 23(5). – P. 1283–1293.
47. Collins, S. Laser and Electron Beam Powder Bed Fusion, in Measurement Science Roadmap for Metal-Based Additive Manufacturing / S. Collins. – 2013. – Режим доступа: http://www.nist.gov/el/isd/upload/NISTAdd_Mfg_Report_FINAL-2.pdf.
48. EDAG Light Cocoon: The ultimate in lightweight construction. – Режим доступа: <http://www.edag.de/en/edag/news-detail/getarticle/-News/detail/edag-light-cocoon-the-ultimate-in-lightweight-construction.html>.
49. Evolutionary Light Structure Engineering. – Режим доступа: http://elise.de/documents/ELiSE_Brochure_web_EN.pdf.
50. Heynick M. 3D CAD, CAM and rapid prototyping / M. Heynick, L. Stotz. – Режим доступа: <http://enac-oc.epfl.ch>.
51. NASA – Режим доступа: http://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/selective_melting.html.
52. New «WaterBone» lightweight vehicle design could increase EV battery range. – Режим доступа: <http://cleantechnica.com/2015/04/27/new-waterbone-lightweight-vehicle-design-increase-ev-battery-range>.
53. Otoınşa Teknolojileri – Режим доступа: <http://www.turk-cadcam.net/rapor/otoinsa/tek-harc-yigma-puskurterek.html>.
54. Pelovitz, J. Modeling for industrial design / Режим доступа: <http://jordanpelovitz.com/?p=775>.
55. Phenix, PX – Режим доступа: <http://www.3dsystems.com/files/phenix-metal-3d-printers-usen.pdf>.

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ЛИТЕЙНЫХ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ**

**Учебно-методическое пособие
для студентов специальности
1-42 80 01 «Инновационные технологии в металлургии»
дневной формы обучения**

Составитель **Жаранов** Виталий Александрович

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 17.01.23.

Пер. № 3Е.

<http://www.gstu.by>