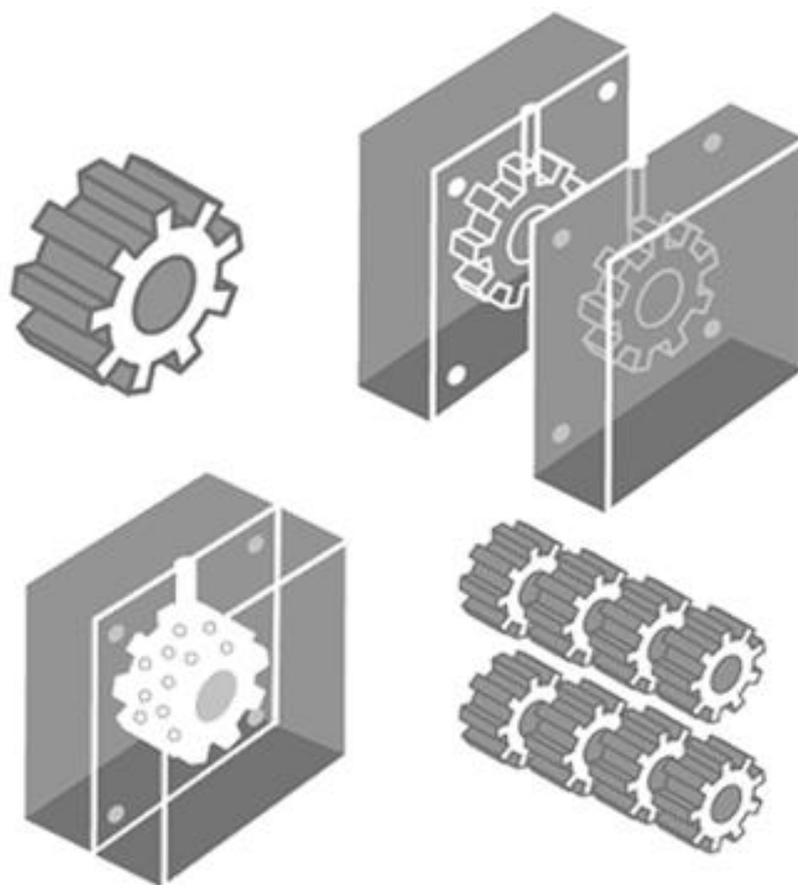


# Технологии быстрого производства в приборостроении

---

А. А. ГРИБОВСКИЙ  
А.А. ГРИБОВСКАЯ



Санкт-Петербург • 2015

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**А. А. Грибовский, А. А. Грибовская**

**ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОГО ПРОИЗВОДСТВА  
В ПРИБОРОСТРОЕНИИ**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург  
2015**

**А. А. Грибовский, А. А. Грибовская.** Технологии быстрого производства в приборостроении. Учебное пособие – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 66 с.

В учебном пособии рассмотрены современные методы быстрого производства приборов и контроля их качества, вопросы использования аддитивных технологий для создания оснастки и трехмерных сканеров для формирования моделей изделий, а также проблемы мелкосерийного производства изделий различной конфигурации.

Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 200100 «Приборостроение».

Рекомендовано к печати Учёным советом факультета компьютерных технологий и управления, протокол № 10 от 08.12.15.



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

© Университет ИТМО, 2015

© А. А. Грибовский, А. А. Грибовская, 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ .....</b>	<b>1</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>ГЛАВА 1 БЫСТРОЕ ПРОИЗВОДСТВО ИЗДЕЛИЙ.....</b>	<b>6</b>
1.1    БЫСТРОЕ ПРОИЗВОДСТВО МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ .....	6
1.2    БЫСТРОЕ ПРОИЗВОДСТВО ОСНАСТКИ.....	12
<b>ГЛАВА 2 БЫСТРОЕ ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОНИКИ.....</b>	<b>16</b>
2.1    ARDUINO.....	17
2.2    ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ.....	19
<b>ГЛАВА 3 СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ .....</b>	<b>24</b>
3.1    КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА И КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ.....	24
3.2    ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ ДЛЯ ДВУМЕРНОГО АНАЛИЗА ИЗДЕЛИЙ ..	29
3.3    ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТОВОЛОКОННЫХ ИНСТРУМЕНТОВ В КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ .....	33
<b>ГЛАВА 4 ТРЕХМЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ В БЫСТРОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ.....</b>	<b>36</b>
4.1    ЛИНЕЙНОЕ ТРЕХМЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ .....	36
4.2    ТРЕХМЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ФОТОГРАММЕТРИИ .....	40
4.2.1    AgiSoft PhotoScan.....	41
4.2.2    Трехмерные сканеры Artec.....	44
4.2.3    Трехмерный сенсор Microsoft Kinect .....	48
4.2.4    Интерференционное проецирование в трехмерном сканировании.....	50
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1 ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКОГО СЕНСОРА ДЛЯ ДВУМЕРНОГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ.....</b>	<b>58</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2 ATOS TRIPLE SCAN.....</b>	<b>60</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>63</b>

# ВВЕДЕНИЕ

Основной отраслью промышленности, обеспечивающей научно-технический прогресс общества, является приборостроение. Как и всей промышленности, приборостроению свойственны единые векторы развития, приводящие производство к новому типу. Главные тенденции этих изменений связаны с понятием Индустрия 4.0, которая определяет новый вид промышленности с характерными особенностями представления всех процессов и связей. Ключевыми понятиями нового вида промышленности является снижение объектов производства, персонализация изделий и постоянное сетевое взаимодействие всех участников процесса. Таким образом, технологии быстрого производства начинают играть все более важную роль в создании новых изделий.

Современные приборы включают в себя кроме механической составляющей, также и микроэлектронные компоненты, повышение темпов производства которых существенно влияет на развитие промышленности. При этом, в условиях быстрого производства ключевую роль начинает играть возможность создания таких компонентов в кратчайшие сроки. Развитие открытой электроники позволяет обеспечить такие темпы, поэтому освоение новых подходов в этой сфере очень важно для приборостроения.

Использование новых технологий производства позволяет повысить качество выпускаемой продукции, однако, увеличение темпов производства требует большей скорости работы существующих технологий контроля изделий или применения новых эффективных подходов.

Процесс формирования трехмерных моделей будущих изделий, являющихся центральными элементами современного производства, также должен ускоряться при переходе к новым этапам развития производства. Поэтому важно осваивать современные технологии быстрого моделирования, включая ключевую технологию для решения этой задачи – трехмерное сканирование. Изучение и использование технологии трехмерного сканирования имеет большое значение для построения новых видов производства.

В результате ключевым направлением развития современных предприятий является внедрение технологий быстрого моделирования, контроля и производства приборов на основе использования передовых технологий и реализации подходов Индустрии 4.0.

Данное методическое пособие раскрывает суть технологий быстрого производства и возможности их применения на современных предприятиях,

принципы трехмерного сканирования, технологии быстрого прототипирования микроэлектронной продукции и средства быстрого технологического контроля изделий, т. е. охватывает все стадии быстрого производства приборов.

# ГЛАВА 1

## БЫСТРОЕ ПРОИЗВОДСТВО ИЗДЕЛИЙ

Массовое или серийное производство нового изделия сопряжено с большими рисками, поэтому требует тщательной предварительной подготовки. Кроме производства прототипа важной задачей является выпуск опытной партии изделий для их всестороннего анализа перед существенным увеличением серийности. Специализированные технологии, которые применяются для выпуска опытной партии, отличаются от технологий выпуска серийных изделий и характеризуются низкими издержками и сокращенными сроками производства. При этом рентабельность таких технологий ограничиваются обычно выпуском малых партий.

Условно можно разделить технологии быстрого производства на прямые и обеспечивающие. Прямые технологии предназначены для непосредственного производства партии изделий. Обеспечивающие технологии не предназначены для производства изделий, но обеспечивают выпуск партии за счет создания средств технологического обеспечения, которое позволяет ускорять традиционные технологии производства.

### 1.1 Быстрое производство металлических изделий

Среди технологий прямого быстрого производства в первую очередь нужно выделить технологию трехмерной печати. Несмотря на то, что данная технология позиционируется для производства прототипов или единичных функциональных образцов, следует учитывать ключевые преимущества данной технологии - высокую скорость производства без участия человека и простое производство изделий сложной формы. Таким образом, при определенных условиях производство партии изделий будет эффективнее выполнить с использованием технологии трехмерной печати [1]. При выборе технологии потребуются сравнить как преимущества трехмерной печати, так и традиционные недостатки в сравнении с другими технологиями быстрого производства (стоимость производства и доработки изделий после изготовления), чтобы определить наиболее эффективный инструмент в определенной ситуации. Однако некоторые изделия просто невозможно в разумные сроки произвести без использования трехмерной печати.

Часто при упоминании технологии быстрого производства пластиковых изделий имеют ввиду другую распространенную технологию - литье в силиконовые формы. Эта технология широко применяется для получения небольшой партии (от 20 до 100 штук) пластиковых изделий по имеющемуся прототипу в короткие сроки [2].

Для производства металлических изделий в области быстрого производства часто используется технология литья по выплавляемым формам, которая применяется в ювелирной промышленности. Сочетание данной технологии и технологии трехмерной печати для производства прототипов является очень наглядным примером нового взгляда на традиционные способы производства. Ювелиры настолько оценили данное сочетание технологий, что сейчас активно развиваются и набирают популярность специализированные трехмерные принтеры, применяющиеся, в основном, только для ювелирной промышленности (рисунок 1.1). Такие принтеры характеризуются компактными размерами и высокой точностью изготавливаемых изделий.



Рисунок 1.1. Прототип, напечатанный на специализированном трехмерном принтере, и результат литья ювелирного изделия по этому прототипу

Процесс подготовки трехмерной модели для последующего выращивания аналогичен подготовке моделей для любых других изделий, но характеризуется использованием сложных геометрических фигур, придающих ювелирному украшению уникальный вид [3].

Часто используются специализированные объемные манипуляторы, позволяющие творить изделия так, как это делают скульпторы, но с гораздо меньшей трудоемкостью за счет применения специализированных инструментов (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2. Специализированный манипулятор для скульптурного моделирования Geomagic Touch X

После подготовки модели производится ее печать, для чего используются различные виды трехмерных принтеров, основные требования к которым - очень высокая детализация формируемого изделия. Наиболее подходящей группой принтеров являются те, которые используют фотополимер для изготовления изделий, например, принтеры серии Objet Connex или 3D Systems ProJet HD. Однако применение трехмерной печати настолько сильно упрощает производство ювелирной продукции, что появились специализированные принтеры именно для этой области [4]. Кроме того что они обладают отличной детализацией, они также достаточно простые в использовании и, за счет требований конкретной специализации, имеют компактные размеры. Внешний вид принтера и основные области его применения представлены на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3.Трехмерный принтер Envisiontech в производстве ювелирной продукции

После трехмерной печати изделия выглядят так, как показано на рисунке 1.4.

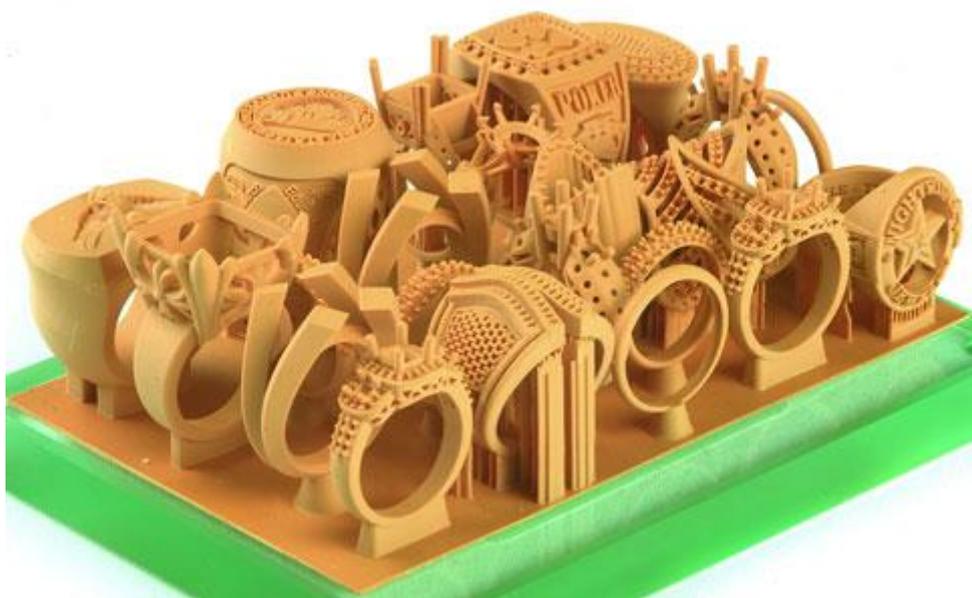


Рисунок 1.4. Изделия, напечатанные на трехмерном принтере Envisiontech серии Perfactory

После трехмерной печати изделия отделяются от металлической основы, покрываются специальным составом (рисунок 1.5) и дополнительно

обрабатывают ультрафиолетом, которое завершает полимеризацию материала и придает ему необходимое сочетание твердости и эластичности.



Рисунок 1.5. Обработка прототипа, полученного на трехмерном принтере Envisiontech

Далее полученный набор изделий разделяется на отдельные элементы, к которым с помощью паяльника припаиваются пластиковые "ножки" (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6. Разделение набора деталей и добавление к ним вспомогательных ножек

На следующем этапе все изделия с ножками присоединяются к центральному стержню, выполняющему роль основного литника (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7. Заготовка для литья соединенная с центральным литником

Далее на основе подготовленной заготовки создается форма, из которой выжигаются исходные прототипы, имеющие нулевую зольность, что позволяет получить полости с высокой точностью, соответствующие требуемым изделиям. После этого расплавленный ювелирный материал (обычно золото или серебро) заливается в форму. Далее сильно нагретая форма помещается в воду, отчего быстро разрушается, освобождая созданное ювелирное изделие, которое после очистки от остатков формы предстает в конечном виде (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8. Набор изделий, полученных из разрушенной формы (А), очищенных (Б) и разделенных на элементы с последующей доработкой (В)

Подобный подход позволяет получать очень сложные изделия различной геометрии в кратчайшие сроки.

## 1.2 Быстрое производство оснастки

Как выше описано, обеспечивающее быстрое производство в первую очередь предназначено для производства оснастки. Самым наглядным примером, демонстрирующим важность аддитивных технологий для быстрого производства, является оснастка для термопластавтоматов (ТПА).

Оснастка для ТПА - это пресс-формы, в которые впрыскивается расплавленный пластик, поэтому такая оснастка должна выдерживать высокие температуры и давление. При этом важное значение имеет время приложения такой нагрузки, так как зачастую в качестве оснастки может применяться материал, который по своим характеристикам не выдерживает приложенную нагрузку, но за счет кратковременного взаимодействия вполне может стать основой оснастки. Структура пресс-формы является достаточно сложной и открывает большой простор для применения технологий трехмерной печати в ускорении процесса ее создания.

Классификация областей применения аддитивных технологий при подготовке производства изделий из термопластичных материалов показана на рисунке 1.9 [5].



Рисунок 1.9. Классификация аддитивных технологий при подготовке производства изделий из термопластичных материалов

Процесс подготовки оснастки для литья, который условно отражен на рисунке 1.10, характеризуется участием различных специалистов и принятием множества решений на каждом из этапов, что, в свою очередь, может провоцировать множество итераций.

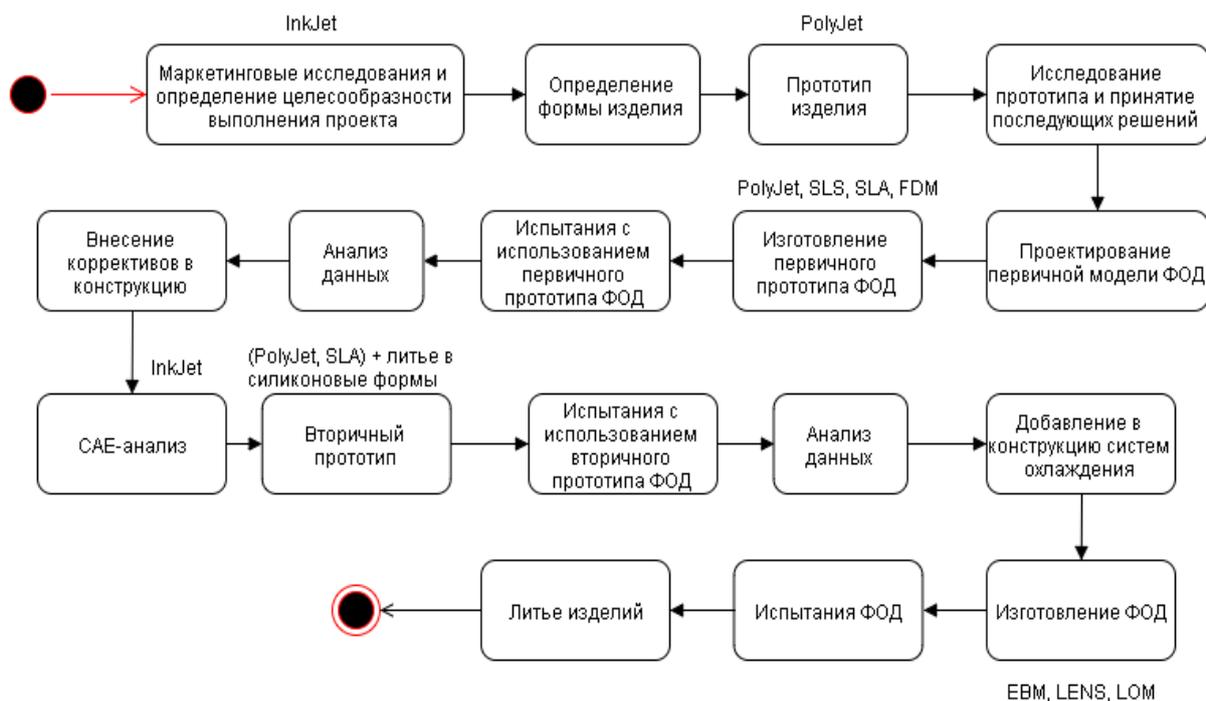


Рисунок 1.10. Типовой процесс проектирования оснастки и литья термопластичных изделий с учетом технологий быстрого производства

С точки зрения моделирования можно выделить 3 основных типа:

- Моделирование изделия и проведение инженерного расчета.
- Моделирование конструкции литьевой формы и проведение инженерного расчета.
- Моделирование процессов изготовления.

Рассмотрим некоторые аспекты совместного применения систем виртуального моделирования и аддитивных технологий более детально [6].

**Моделирование изделия и проведение инженерного расчета.** Для моделирования процессов используются САЕ-системы, получившие широкое распространение во множестве областей, связанных с производством и эксплуатацией изделий.

Результаты расчетов в САЕ-системах обладают большой информативностью, которая выражается в виде графиков, таблиц и диаграмм. Но для начальных этапов производства (маркетинговые исследования, подготовка производства и определение целесообразности производства) необходим такой вид представления, который будет максимально нагляден для руководителей проекта, маркетологов и других заинтересованных специалистов.

Применение технологии InkJet (или 3DP) позволяет изготавливать наглядный трехмерный образец изделия (или формообразующих деталей литьевых форм) с полноцветным (16bit) представлением различных отклонений, напряжений или распределения давлений, полученных из CAE-системы.

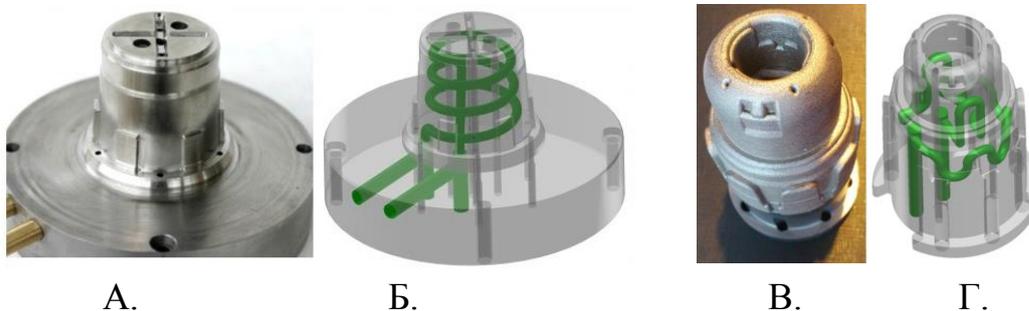
**Моделирование конструкции литьевой формы и проведение инженерного расчета.** Виртуальное моделирование с использованием CAE-систем не ограничивается анализом поведения изделия при его эксплуатации, но и позволяет изучить процесс его производства путем заполнения расплавленным термопластическим материалом (ТПМ) литьевой формы. На этапе проектирования формообразующих деталей литьевой формы (ФОД) целесообразно оценивать потенциальные нагрузки и анализировать их влияние на литьевую форму. По диаграмме распределения давлений при заполнении и выдержке, можно определить не только, справится ли форма с нагрузкой, но и ту предельную продолжительность цикла литья, при которой произойдет необратимое нарушение геометрии формы или ее разрушение. Аналогично результаты анализа позволяют определить максимальную температуру расплава и оценить стабильность геометрии формы при таком нагреве.

Использование аддитивных технологий на стадии технологической подготовки производства литьевых форм, позволяет не только визуально оценить ФОД, но и изготовить на них в литьевой форме реальные детали из штатного ТПМ. При этом виртуальное моделирование позволяет предварительно оценить нагрузки на форму и подобрать такой материал (и соответствующую ему аддитивную технологию), который с одной стороны будет достаточно стоек к нагрузкам, а с другой - обеспечит приемлемое качество для проведения полноценных испытаний с такой формой [7]. Также изделия для выполнения нагрузочных испытаний могут быть изготовлены за счет использования литья в силиконовые формы (на базе технологии SLA или PolyJet). В настоящее время для получения экспериментальной ФОД может использоваться сравнительно небольшая номенклатура материалов. В качестве примера можно привести материал Digital ABS компании Stratasys.

Возможности получения ФОД из полимерных материалов в настоящее время широко исследуются разработчиками и производителями деталей из ТПМ. В большей степени освоенными при изготовлении ФОД являются аддитивные технологии, использующие спекание или сплавление металлических порошков. В настоящее время они являются наиболее

экономически выгодным вариантом при изготовлении литевых форм с конформными системами охлаждения.

**Моделирование процессов изготовления.** Применение конформных систем охлаждения ФОД литевых форм позволяет максимально повысить эффективность системы охлаждения, то есть сократить время цикла литья и улучшить качество деталей с большим разбросом толщин и сложной геометрией. Данные системы охлаждения проектируются таким образом, чтобы их контур по возможности эквидистантно повторял геометрию отливаемой детали. За счет такого расположения обеспечивается более равномерное охлаждение при литье. Конфигурация конформного канала охлаждения является намного более сложным геометрическим объектом, чем канал обычного охлаждения, соответственно его проектирование и изготовление является задачей повышенной сложности (рисунок 1.11.). Использование подобного канала охлаждения позволяет создать эффективное равномерное тепловое поле (распределение температур в объеме или на поверхности тела) ФОД литевой формы. В результате такие дефекты детали как коробление и остаточные напряжения могут быть устранены или существенно сокращены.



А.

Б.

В.

Г.

Рисунок 1.11. Примеры конформных систем охлаждения, полученных металлообработкой (А, Б) и с использованием аддитивных технологий (В, Г)

Проектирование подобных систем охлаждения ФОД литевых форм невозможно без применения специализированных САЕ-систем анализа литевых процессов [8]. Для создания стойкой к температуре и высокому давлению оснастки рекомендуется использовать аддитивные технологии EBM (Electron Beam Melting - создание изделий за счет расплавления порошкового материала под действием пучка электронов) и SLS на базе металлических порошков (Selective Laser Sintering - селективное лазерное спекание).

## ГЛАВА 2

# БЫСТРОЕ ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОНИКИ

Организация производства в рамках подхода "Индустрия 4.0" требует развития различных аспектов промышленности будущего. Ключевой особенностью новой промышленности будет повсеместное распространение межмашинного взаимодействия, обеспечивающего кооперацию на уровне оборудования без участия человека (рисунок 2.1) [9].

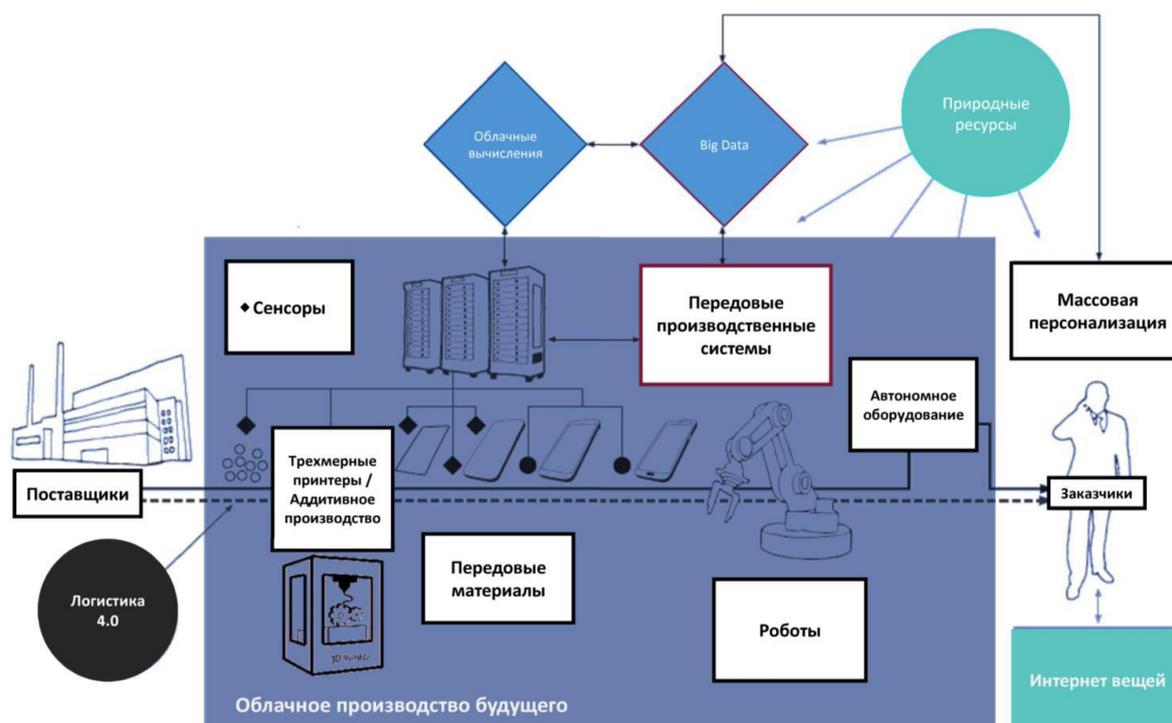


Рисунок 2.1. Производство будущего на базе единой коммуникационной среды

Основа такого взаимодействия - специализированные протоколы и сенсоры, развитие которых требует новых средств разработки и использования электроники.

## 2.1 Arduino

Как развитие всей индустрии 4.0 и нового витка промышленной революции, так и ее отдельных составляющих было бы невозможным без становления нового направления - открытая электроника, которая обеспечивает появление очень компактных и относительно простых электронных устройств, которые могут выполнять множество задач анализа и управления, что делает их идеальным решением для создания всевозможных исполняемых устройств и приборов. Такое бурное развитие потребительских трехмерных принтеров сложно представить без использования открытой электроники. Совместное применение трехмерной печати и открытой электроники позволяет создавать всевозможные автоматизированные и механизированные устройства практически каждому желающему. Таким образом, важным аспектом быстрого производства в области приборостроения является использование открытой электроники.

Появление первых микроконтроллеров ознаменовало начало новой эры развития микропроцессорной техники. Наличие в одном корпусе большинства системных устройств, сделало микроконтроллер подобным обычному компьютеру. Однако, чтобы собрать устройство на микроконтроллере, необходимо знать основы схемотехники, устройство и работу конкретного процессора, уметь программировать на ассемблере и изготавливать электронную технику. Также имеется потребность в программаторах, отладчиках и других вспомогательных устройствах. В итоге необходим огромный объем знаний и наличие дорогостоящего оборудования. Такая ситуация долго не позволяла многим любителям использовать микроконтроллеры в своих проектах.

Начало развития потребительской электроники тесно связано с появлением проекта "Arduino", ознаменовавшего вступление в эру доступной программируемой электроники [10]. При этом доступность электроники отражается и на уровне простоты программирования и на уровне стоимости, которая на порядок ниже, чем у специализированных устройств-предшественников.

Arduino включает 3 основных понятия:

- Физическое устройство.
- Среда разработки.
- Сообщество и философия.

Arduino как физическое устройство имеет ряд характерных особенностей, которые напрямую влияют на возможности программирования [11]. При этом конкретное исполнение устройства, внешний вид и производительность может существенно варьироваться от модели к модели. Так можно выделить несколько видов Arduino (рисунок 2.2), в зависимости от решаемой задачи и области применения. В том числе как упрощенные вариации, которые могут размещаться в одежде, так и расширенные модели, функционирующие практически как простой современный компьютер.

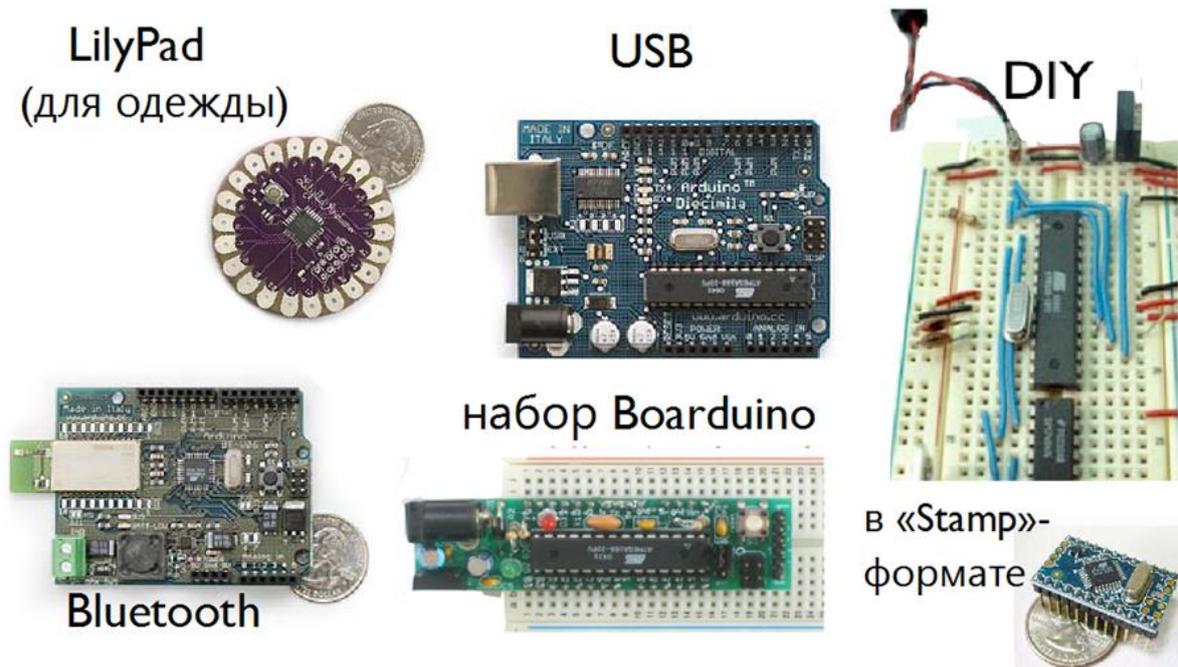


Рисунок 2.2 Различные виды устройств в проекте Arduino

При этом средства программирования и среда разработки остается единой (рисунок 2.3). Для создания программ используется упрощенная версия языка "Си". Такая программа называется "скетч" и состоит из 3 основных блоков:

- Блок объявления переменных.
- Блок инициализации.
- Блок исполнения.

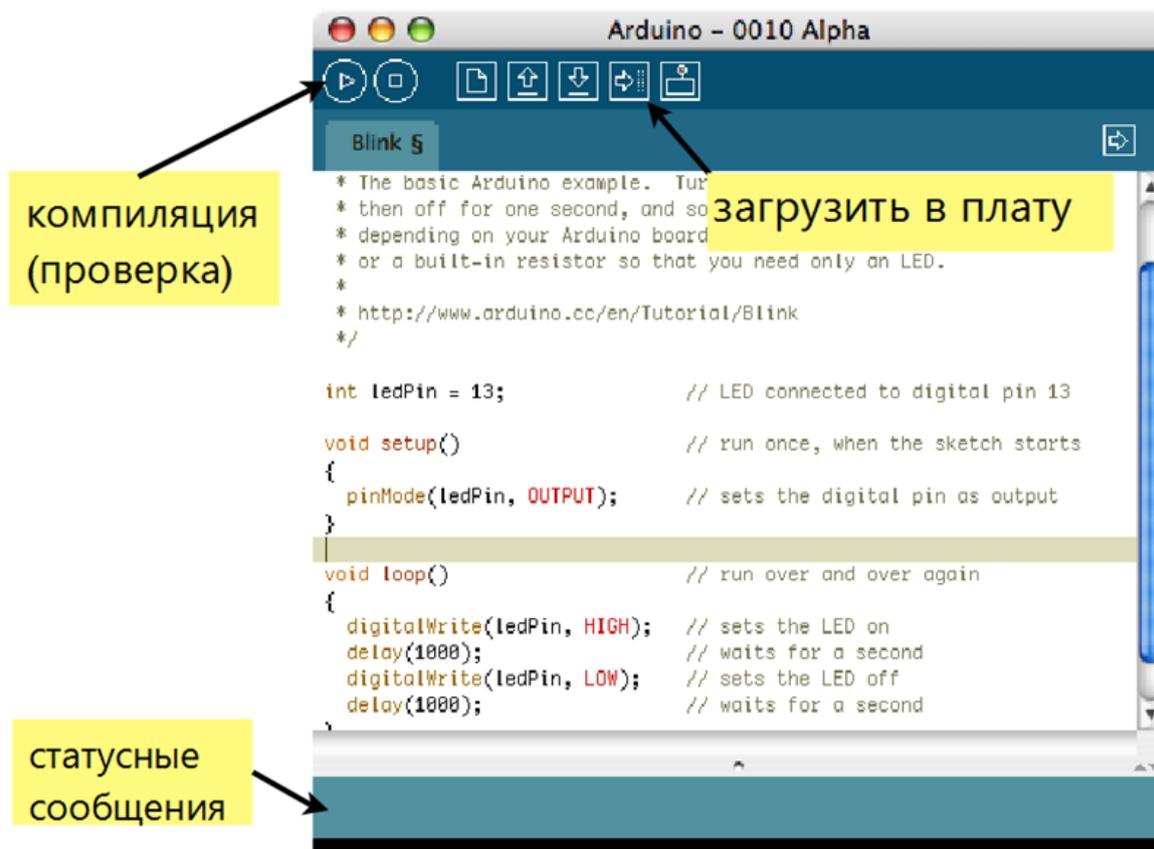


Рисунок 2.3. Структура интерфейса среды программирования Arduino

Скетч управляет набором пинов на плате, которые могут принимать или передавать сигналы 2-х типов (цифровые и аналоговые сигналы). За время существования проекта Arduino сформировалось огромное сообщество, которое не только создает множество типовых скетчей для различного применения и оказывают поддержку новичкам, но также разрабатывают модификации плат и модули для использования их в специализированных областях применения.

## 2.2 Виртуальное моделирование электронных устройств

В наше время высшей степенью доступности для рядового пользователя является наглядное представление информации, с которой можно интерактивно взаимодействовать в виртуальном пространстве. Особенно это важно при работе с электронными устройствами, так как при неосторожном

поведении, вызванном отсутствием знаний или опыта, можно принести вред себе или окружающим. На основе таких принципов создан проект 123 D Circuits от компании Autodesk. В этой облачной виртуальной среде любой пользователь может научиться как азам электроники, так и ее расширенному программированию или построению целых приборов.

Система 123D Circuits предлагает ряд полезных возможностей для работы в области схемотехники. После внесения данных учетной записи пользователю на выбор предлагается: создание новых схем, добавление компонентов или импорт цепей из программы Eagle. Размеры плат здесь можно выбирать по собственному желанию, поддерживается свободное размещение текста, метод шелкографии. Однако основной особенностью 123D Circuits является имитация платформы Arduino с поддержкой плат ввода/вывода и возможностью редактирования программного кода из браузера в визуальном режиме.

Моделирование схем в красивом графическом редакторе происходит путем наложения проводов и требуемых компонентов на макетную плату с дальнейшим подключением их к виртуальному процессору. Кроме того, имеется возможность проведения диагностики, анализа и интерактивной имитации работы схемы в режиме реального времени.

С использованием данного сервиса можно создать как простую электронную схему, так и специализированное устройство с использованием Arduino.

Процесс работы с виртуальной средой состоит из этапов добавления компонентов (рисунок 2.4), объединения их в цепь (рисунок 2.5) и последующей настройки.

При этом система автоматически генерирует схематическое отображение собранной цепи, что делает ее анализ и изучение гораздо более наглядным (рисунок 2.6). Также в приложении 123D Circuits автоматически создается перечень компонентов (Bill Of Materials) и предлагается собственный вариант размещения компонентов на печатной плате (с поддержкой редактирования). Работать над проектами можно совместно с другими пользователями, используя единую библиотеку компонентов. Начинать работу с сервисом можно как с создания собственной схемы, так и с редактирования одной из множества схем, которые созданы другими пользователями.

Настройка собранной схемы состоит из 2 этапов:

1. Настройка элементов.
2. Редактирование скетча.

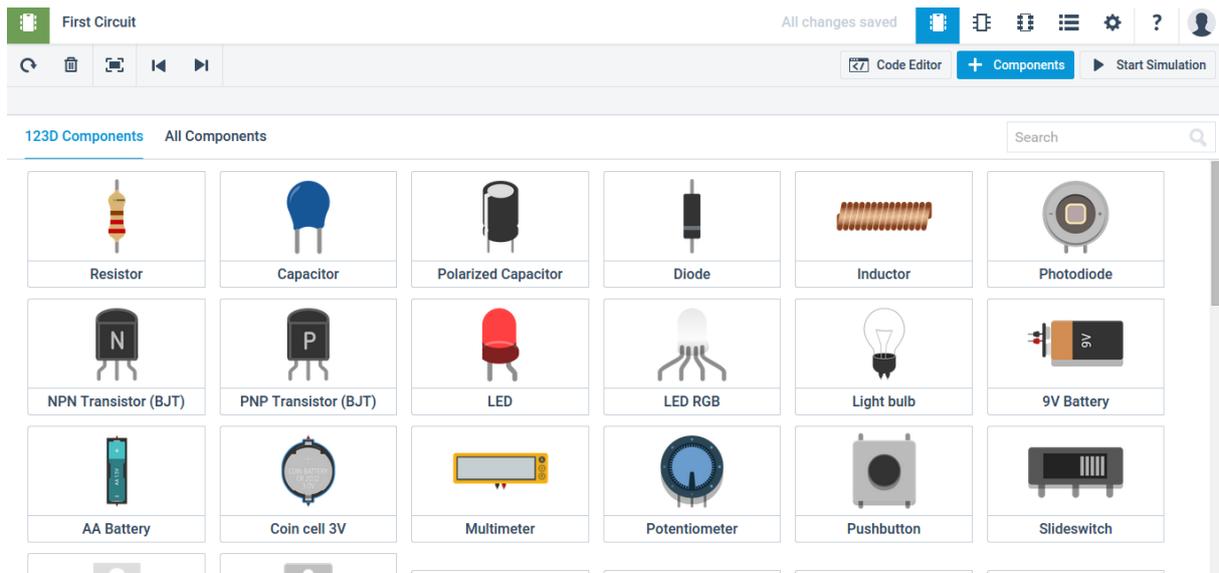


Рисунок 2.4. Набор компонентов для добавления на виртуальную модельную плату сервиса 123D Circuits

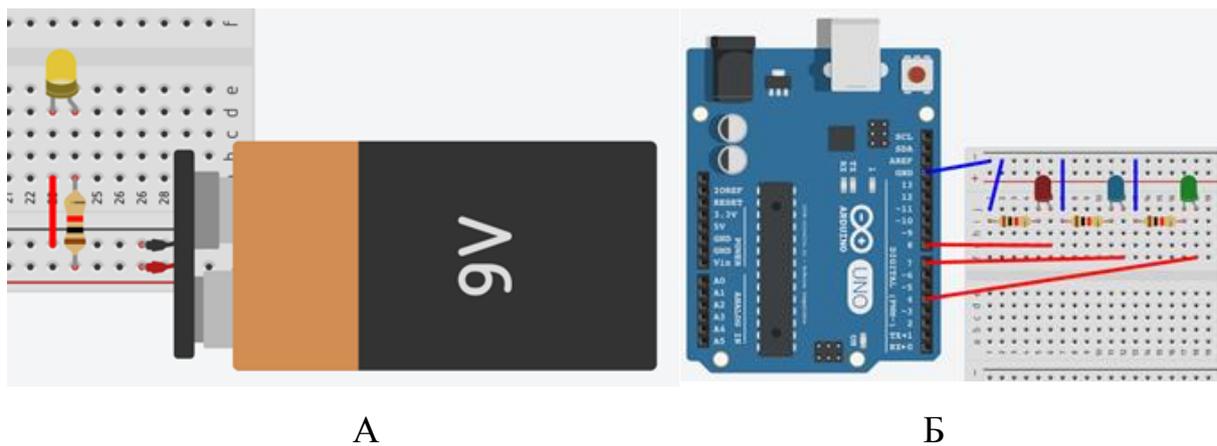


Рисунок 2.5. Формирование цепи из источника питания и элементов устройства без Arduino (А) и с его использованием (Б)

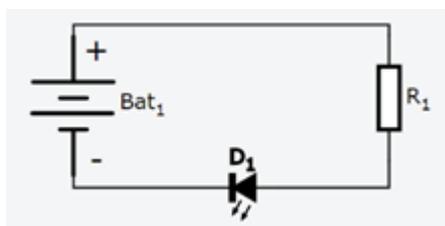


Рисунок 2.6. Принципиальная схема устройства, отображенного на рисунке 2.5А

Настройка элементов состоит из задания характерных параметров, включая сопротивление резисторов, цвет светодиодов и т.п. Сервис хорошо имитирует сборку схем. Все элементы в нём выглядят и функционируют как в реальной жизни. Например, при изменении сопротивления резистора также будет меняться цвет полосок на нем по аналогии с резисторами в реальной практике (рисунок 2.7).

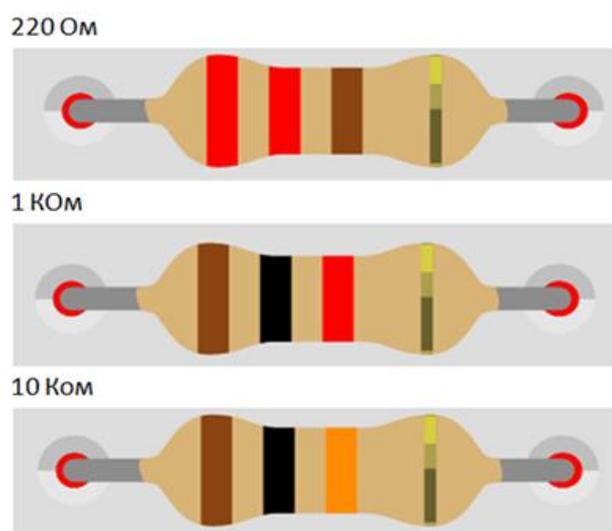


Рисунок 2.7. Изменение схематического обозначения сопротивления различных резисторов

Второй этап требуется только при наличии в составе схемы платы Arduino (рисунок 2.5Б). При этом вызывается специальное меню редактирования кода, где создается скетч и производится его загрузка на виртуальную плату (рисунок 2.8). Например, мигание светодиодами описывается набором чередующихся включений различных портов и соответствующей подачи напряжения на участок цепи с одним из светодиодов.

Для полноценной разработки в системе поддерживается:

- автоматическое создание спецификаций на основе сформированной схемы;
- автоматическая генерация платы для распайки с использованием поверхностного монтажа;
- виртуальная имитация с поддержкой анимации и интерактивного взаимодействия с элементами цепи;
- экспорт скетча для использования на реальных устройствах;
- гибкий поиск среди большой базы реализованных в системе проектов.

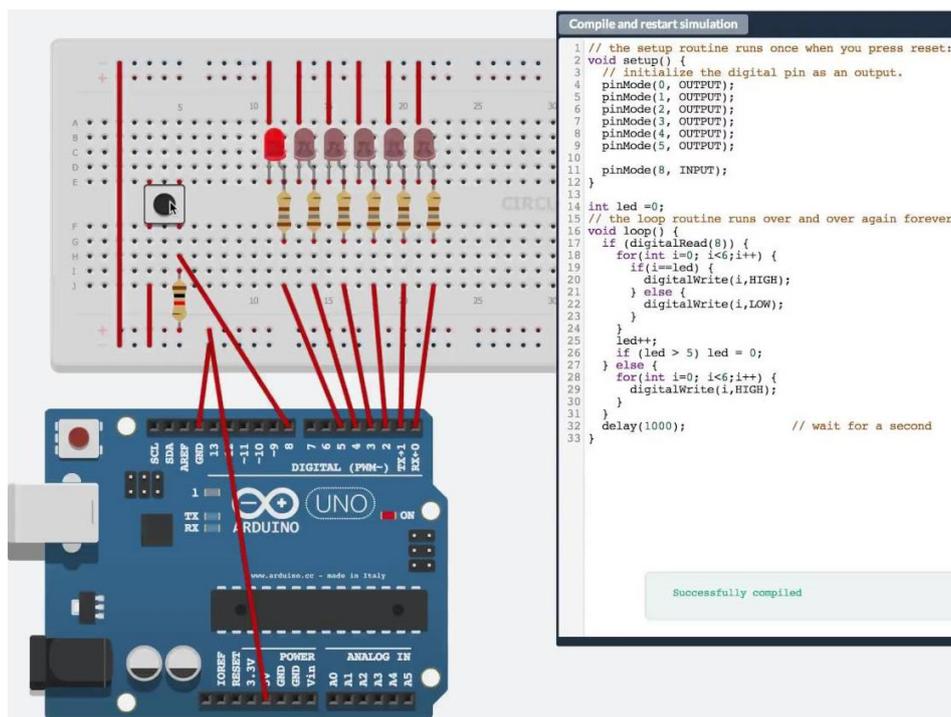


Рисунок 2.8. Пример схемы устройства и соответствующего скетча, позволяющего поочередно включать светодиоды

Бесплатный статус, интуитивный интерфейс, низкий порог входа и функционирование в виде web-сервиса делает 123D Circuits отличным способом познакомиться с электротехникой и начать создавать свои первые приборы

# ГЛАВА 3

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ

Какие бы изменения ни происходили с производством, но контроль изделий остается ключевым понятием, обеспечивающим выпуск качественных изделий. В условиях быстрого производства потребность в эффективном контроле не только не снижается, но и становится более острой, что связано с особенностями такого производства. Сам принцип быстрого производства определяет сокращение сроков на разработку и выпуск продукции, поэтому к средствам контроля предъявляются еще более жесткие требования по производительности и качеству контроля, что приводит к необходимости использовать передовые технологии и подходы [12].

### 3.1 Компьютерная томография в задачах анализа и контроля изделий

Компания Werth является одним из ведущих разработчиков и поставщиков измерительного оборудования. Среди новейших типов оборудования этой компании выделяется серия Tomoscore (рисунок 3.1А), реализующая принцип компьютерной томографии для детального контроля различных объектов (рисунок 3.1Б, В).

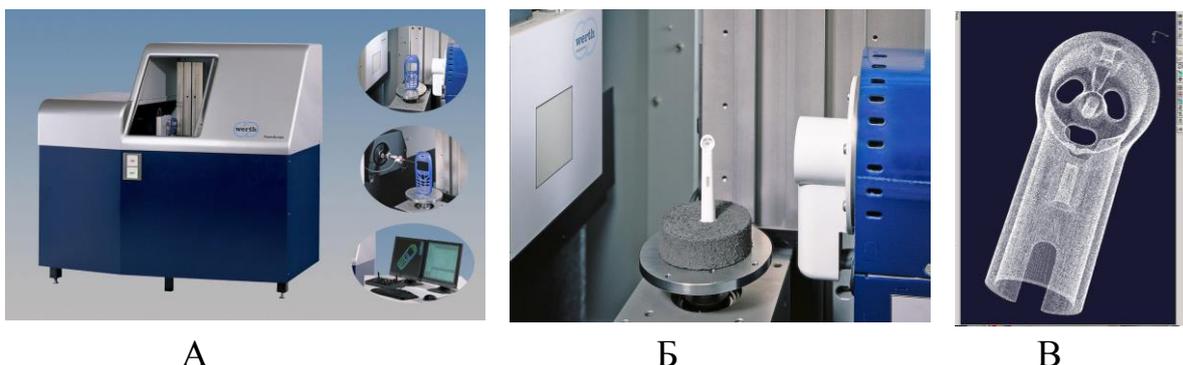


Рисунок 3.1. Компьютерный томограф серии Tomoscore (А), процесс съемки головки зубной щетки (Б) и модель, полученная в результате (В)

В процессе работы проецируемое на объект рентген-излучение фиксируется на специализированном детекторе, тем самым создавая снимок сечения модели (рисунок 3.2А). При этом деталь поэтапно поворачивается, что позволяет получить полную картину объекта в виде трехмерной модели. Особенности процесса получения снимков позволяет свободно перемещать объект между детектором и источником излучения. При этом меняется захватываемая излучением область и фиксируется полный объект или его часть. В результате любая область объекта может быть изучена более детально без потери общей разрешающей способности снимка (рисунок 3.2Б).

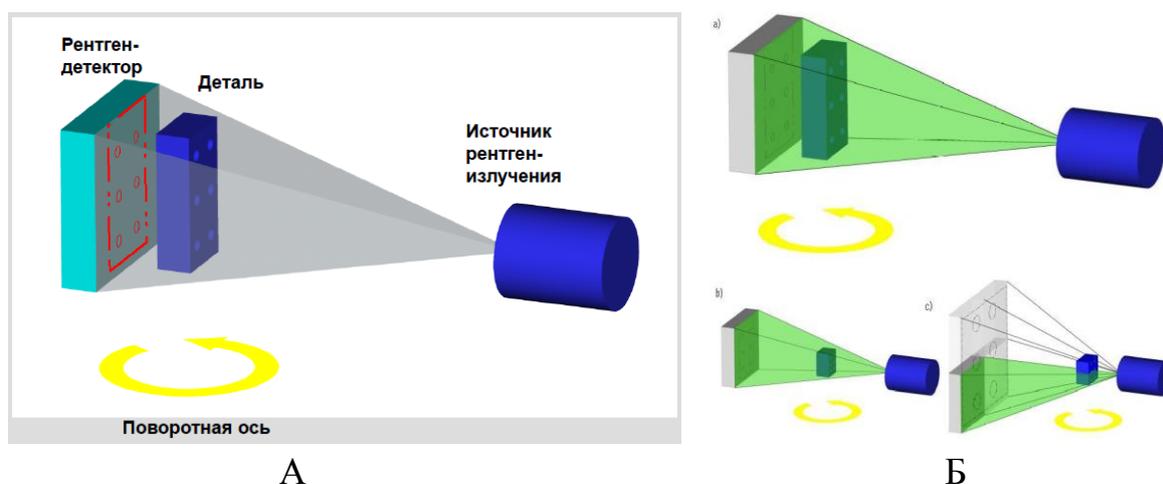


Рисунок 3.2. Общий принцип работы томографа серии Tomoscope (А) и схематическое изображение особенностей масштабирования областей (Б)

Ключевые преимущества такого способа анализа объекта проистекают из его уникальности:

- Полное 3D-измерение.
- Полное, не деструктивное распознавание внутренних и внешних форм за короткий период времени и с точностью КИМ<sup>1</sup>.
- Точное измерение функциональных размеров с обработкой изображения, лазером и щупом.
- Отслеживаемые результаты через калибровку непосредственно на измеряемом объекте (искусственная коррекция).
- Значительное сокращение времени при первой проверке.

Как известно, разные материалы имеют свои особенности поглощения рентген-излучения. На этой особенности базируется специализированная

<sup>1</sup> КИМ: Координатно-измерительная машина.

функция анализа объектов в системах Tomoscore - автоматическое разделение мультиматериальных сборных изделий. Суть метода представлена на рисунке 3.3. Как видно из рисунка, часть объекта не поглощает рентген-излучение. В этих областях находится воздух. Остальные области имеют различную степень поглощения. Те, которые поглощают полностью, будут иметь белый цвет и отлично могут быть различены с серыми и черными участками.

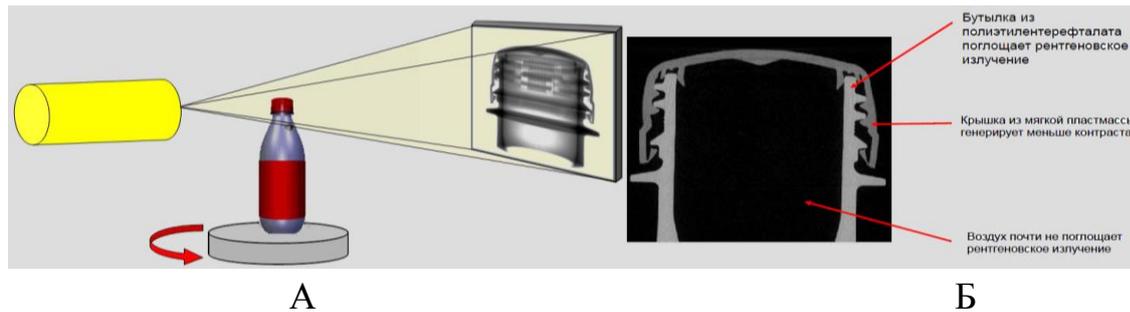


Рисунок 3.3. Схема сканирования сборных изделий (А) и последующего распознавания компонентов (Б)

В результате мы не только получаем трехмерную сборку (рисунок 3.4А, Б), но и подробную гистограмму материалов (рисунок 3.4В), что позволяет производить более детальный анализ и, в некоторых случаях, точно определять состав материалов изделия.

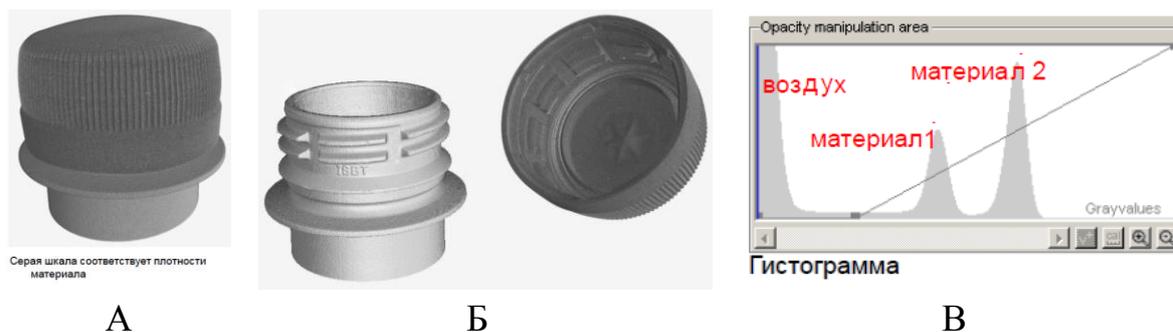


Рисунок 3.4. Результат сканирования сборки (А) с последующим разделением на компоненты (Б) и анализом особенностей их материала (В)

Следующий уровень анализа, уникальный для данного типа устройств, это внутренний анализ. Послойное изучение изделия позволяет проанализировать внутреннюю структуру и определить те особенности, которые недоступны другим технологиям. Например, при литье пластиковых

изделий внутрь может попасть воздух (рисунок 3.5), что в будущем может нарушить его работоспособность или привести к полному разрушению.

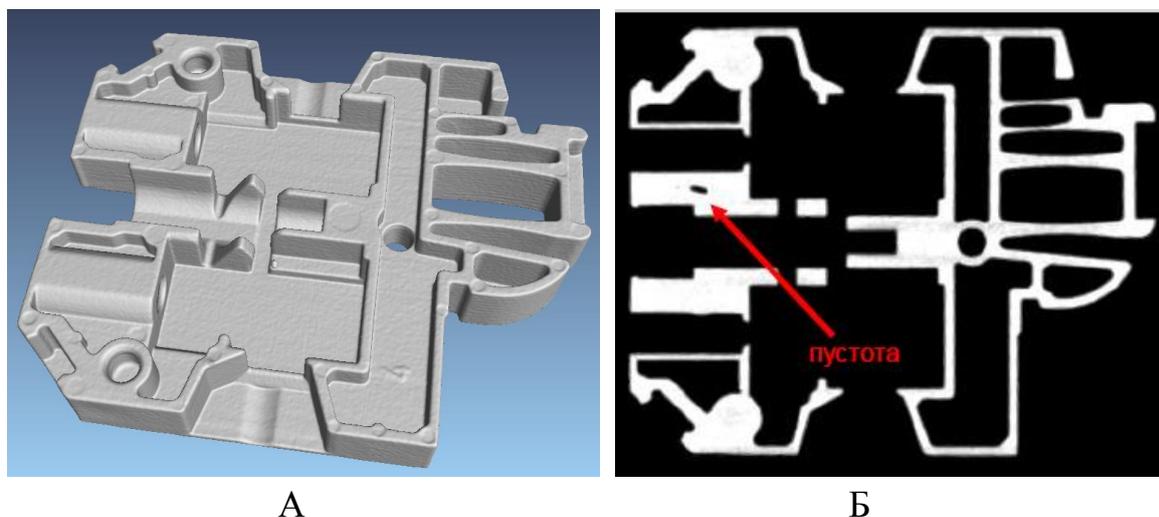


Рисунок 3.5. Облако точек изделия (А) и 2D-сечение с визуализацией внутренних пустот, вызванных захватом воздуха (Б)

Автоматический анализ пустоты по набору сечений позволяет создать карту расположения и размеров пустот (рисунок 3.6А). Анализ свойств таких пустот позволяет легко определить пористость изделия (рисунок 3.6Б).

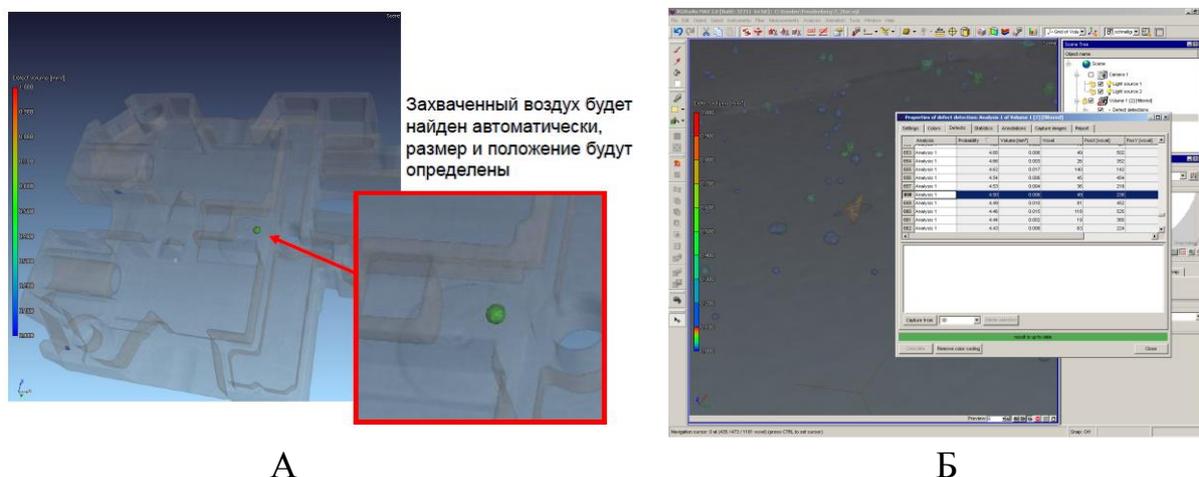


Рисунок 3.6. Карта пустот (А), выявленных в трехмерной модели объекта, и результаты ее анализа (Б)

Аналогично могут быть проанализированы трещины (рисунок 3.7), которые либо полностью располагаются внутри модели, либо просто не могут быть достаточно подробно изучены по их внешнему проявлению.

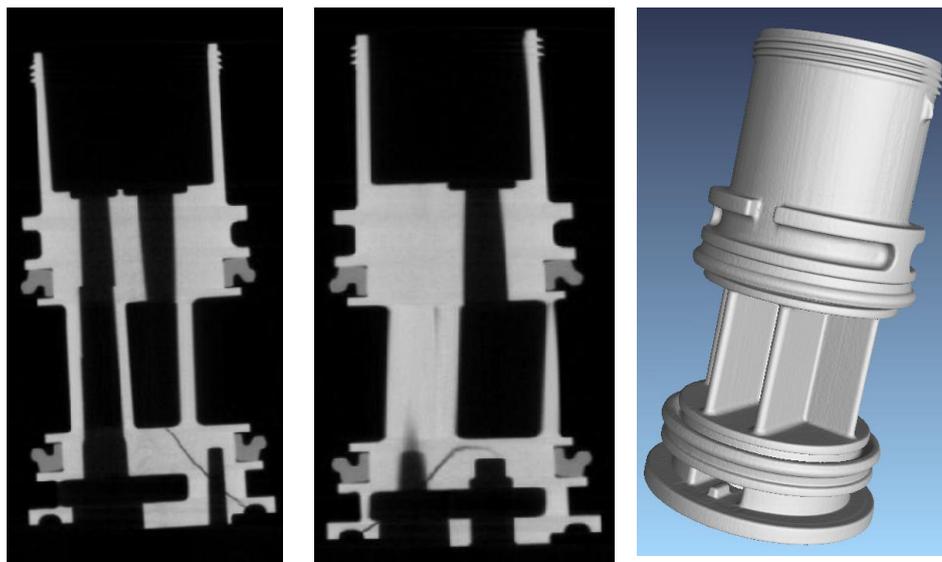


Рисунок 3.7. Трещины, которые не видны снаружи, но ясно различимы в поперечном сечении

Если анализ пористости или внутренних трещин еще возможен при деструктивном анализе, то функциональный анализ сборных изделий может быть произведен только с использованием представленной технологии. Например, процесс деформации компонентов механической ручки в зависимости от ее состояния анализируется только на основе рентген-сечений. Так, искривление пружины внутри ручки (рисунок 3.8) может характеризовать равномерность распределения нагрузок, что определяет долговечность изделия и указывает на потенциальные проблемы при производстве или сборке компонентов. Для изготовления функциональных изделий повышенной надежности такой анализ имеет большое значение.

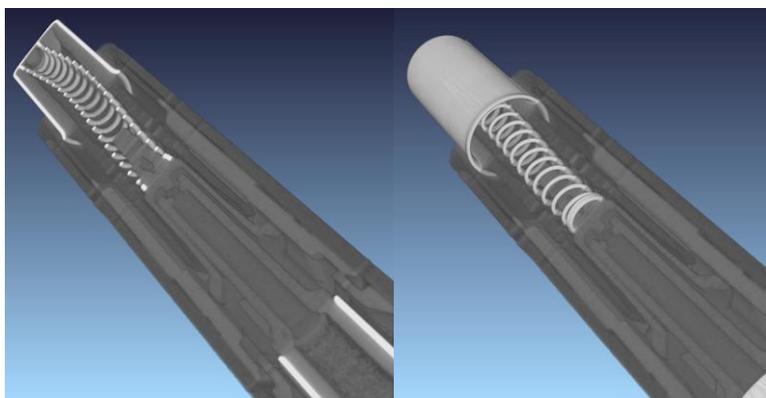


Рисунок 3.8. Анализ деформаций компонентов изделия на различных этапах функционирования

## 3.2 Использование оптических сенсоров для двумерного анализа изделий

Далеко не все объекты требуют объемного контроля. Часть объектов достаточно проанализировать в двумерном виде (рисунок 3.9А), чтобы получить большую часть необходимых размеров. Для решения таких задач используются специализированные оптические сенсоры (рисунок 3.9Б).

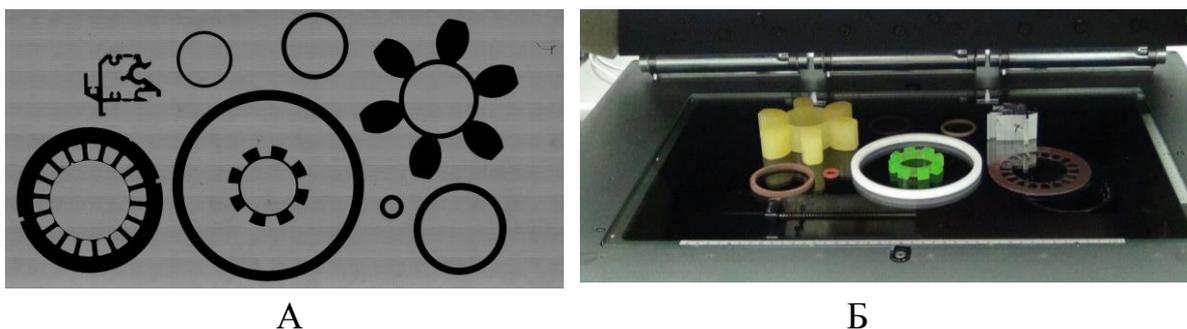


Рисунок 3.9. Анализ деталей простой геометрии (А) с использованием оптических сенсоров (Б)

Система автоматически фокусирует сенсор перед объектом и производит его освещение оптимальным способом для получения четких граней и качественного измерения (рисунок 3.10А). Полученный снимок объекта анализируется и оперативно разбивается системой на примитивы (рисунок 3.10Б), которые измеряются и автоматически контролируются при наличии эталонной модели.

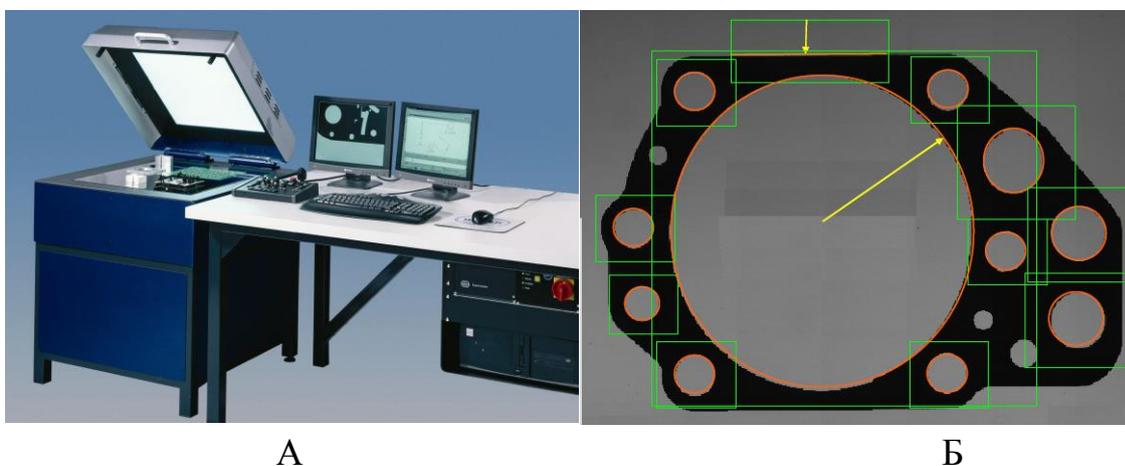


Рисунок 3.10. Оптический сенсор Score Check (А) и результаты распознавания элементов на объекте (Б)

Точность измерения такого устройства составляет  $(2,5+L/120)$  мкм, при этом разрешение изображения может достигать 0,1 мкм. При контроле поврежденных или засоренных изделий (рисунок 3.11А) технология фильтрации позволяет точно определить контур и корректно проанализировать изделие (рисунок 3.11Б).

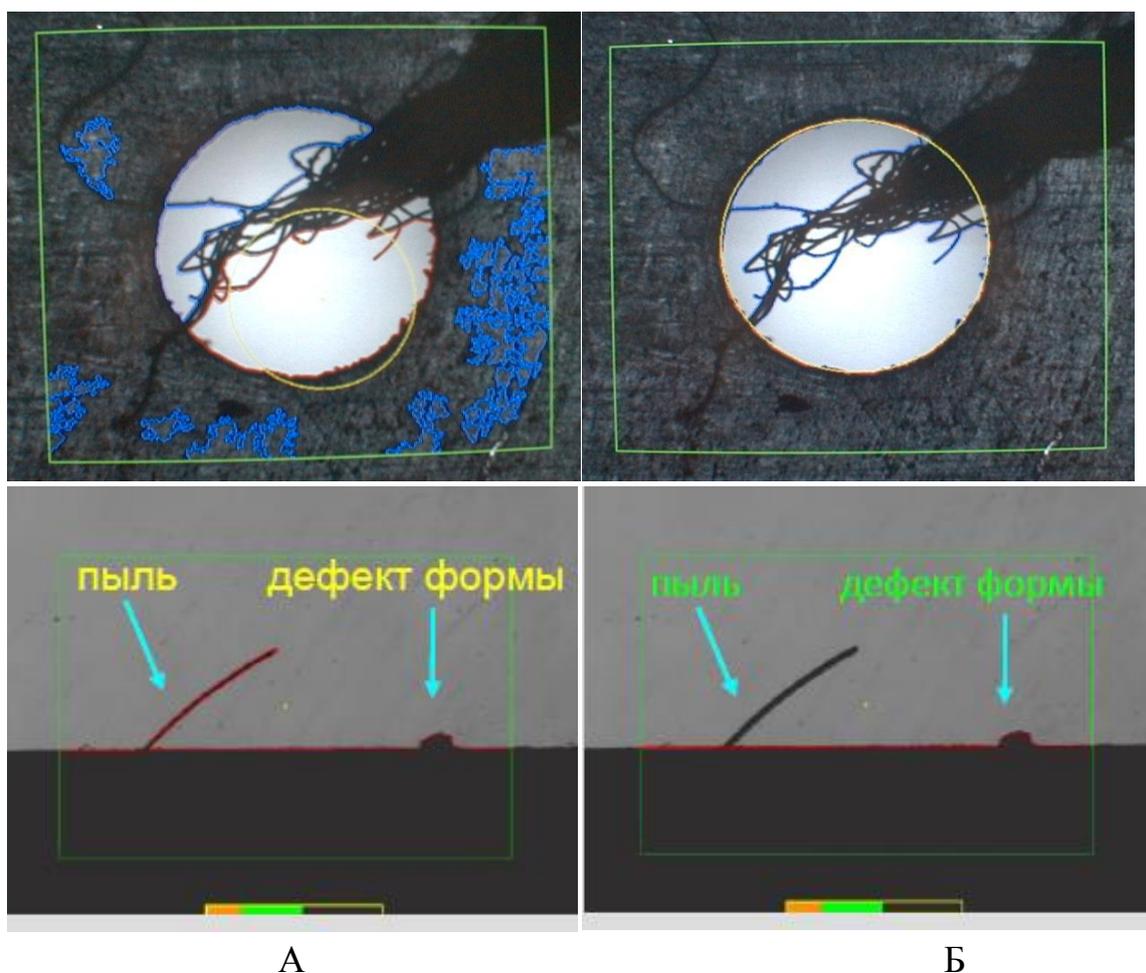
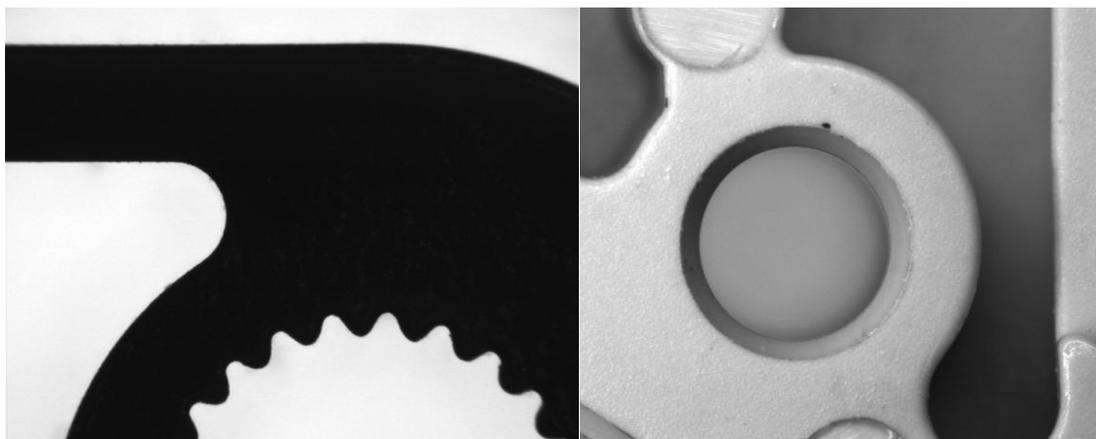


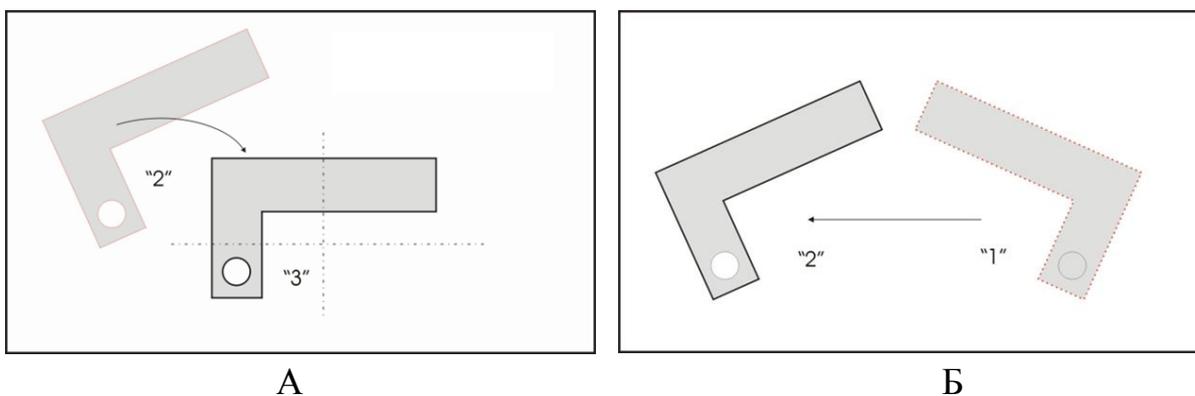
Рисунок 3.11. Контроль размеров без фильтров (А)  
и с их использованием (Б)

Процесс контроля может производиться как в проходящем (рисунок 3.12А), так и в отраженном свете (рисунок 3.12Б), что позволяет анализировать объект с двух сторон, существенно ускорить контроль и сделать его полностью автоматизированным. Особенности оптической системы представлены в Приложении 1.



А Б  
Рисунок 3.12. Контроль размеров в проходящем (А)  
и в отраженном (Б) свете

Уровень автоматизации также повышается за счет использования системы автоматического совмещения эталонной модели со снимком изделия. При этом объект может автоматически поворачиваться или отображаться относительно оси симметрии (рисунок 3.13).



А Б  
Рисунок 3.13. Поворот эталонного объекта (А)  
или формирование его зеркального отображения(Б)

За счет такой автоматизации существенно упрощается работа оператора, что позволяет работать на оборудовании даже с низкой квалификацией. Также обеспечивается многопозиционный контроль партии изделий небольшого размера (рисунок 3.14).

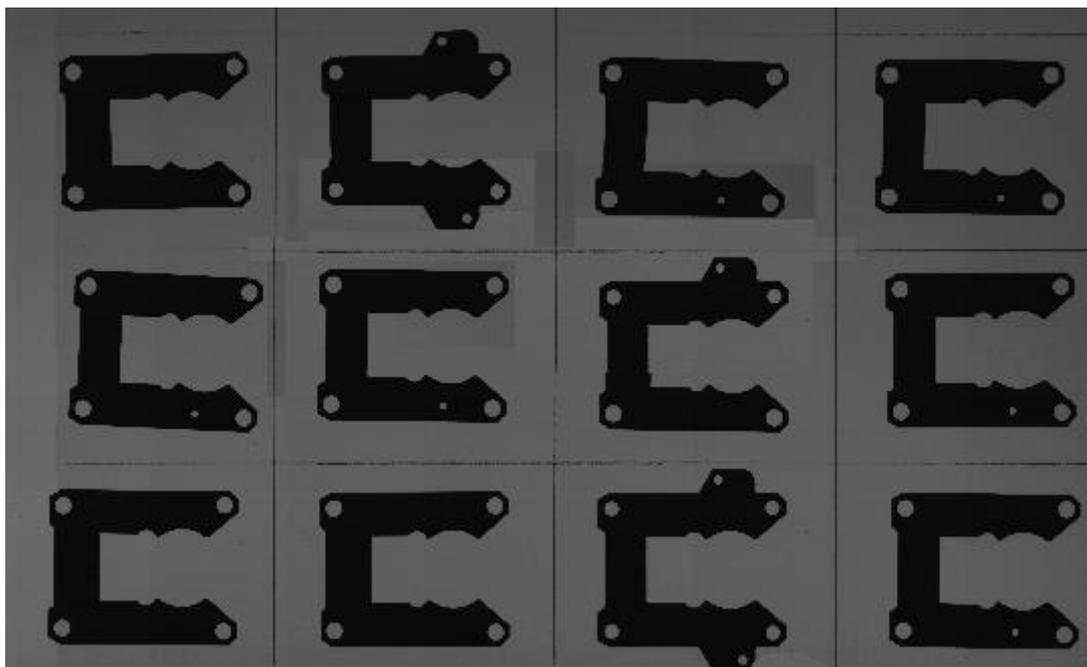
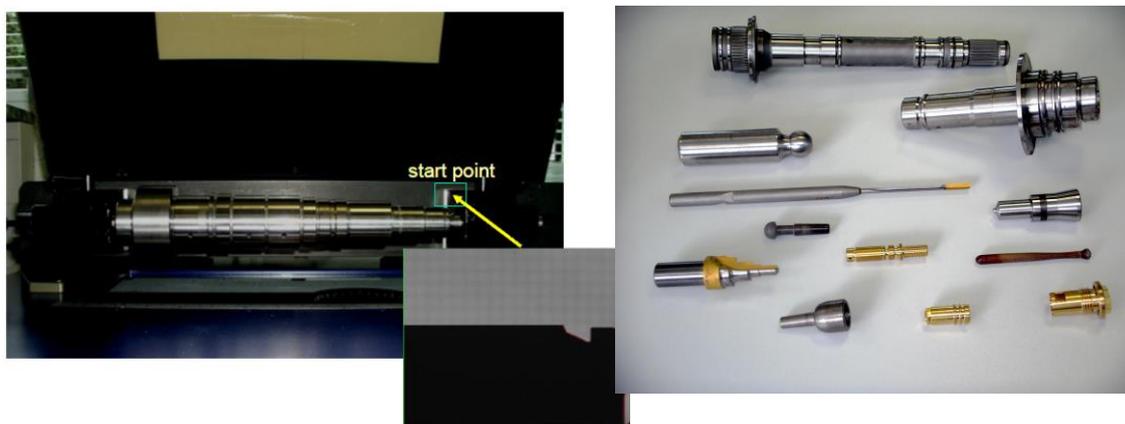


Рисунок 3.14. Измерение набора однотипных изделий на паллетах оптического сенсора

При использовании дополнительного приспособления в виде поворотной оси (рисунок 3.15А) на устройстве становится возможным производить контроль осесимметричных изделий (рисунок 3.15Б).



А

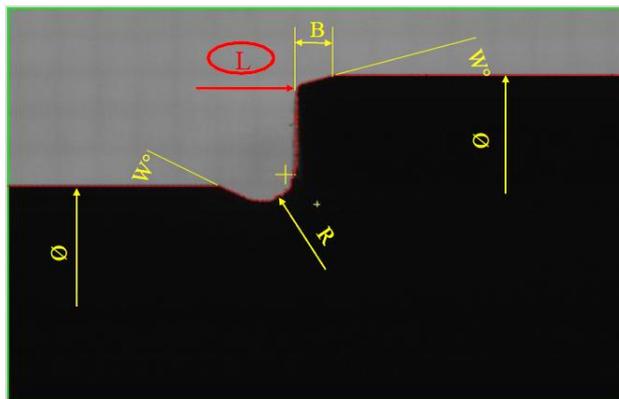
Б.

Рисунок 3.15. Контроль осесимметричных изделий с использованием поворотной оси (А) и примеры таких изделий (Б)

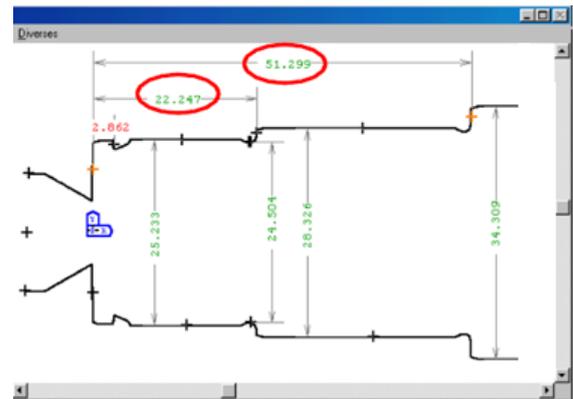
При этом система автоматически определяет основные параметры таких изделий (рисунок 3.16 А,Б) и формирует эскиз изделия (рисунок 3.16В) [13].



А



Б



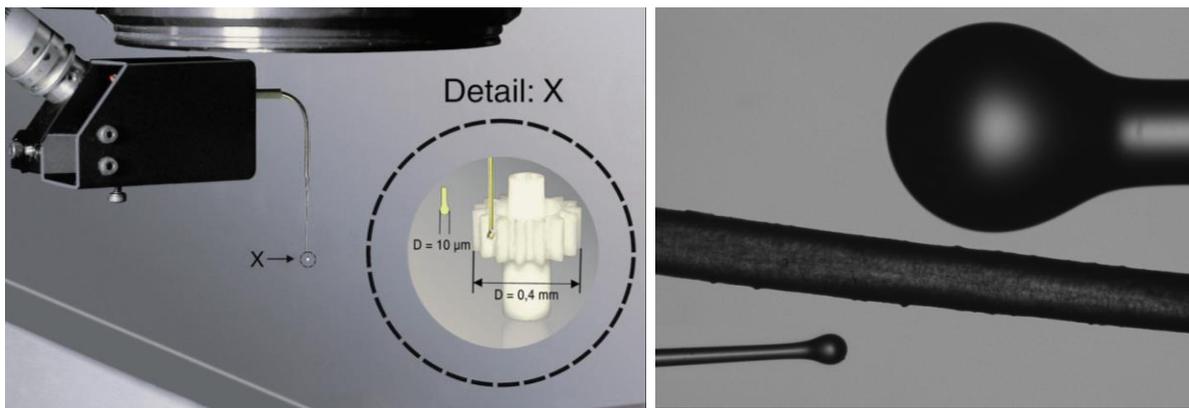
В

Рисунок 3.16. Изображение осесимметричной детали, полученное сенсором (А), результаты его измерения (Б) и контроля (В)

### 3.3 Использование оптоволоконных инструментов в координатно-измерительных машинах

Среди оборудования, применяемого для контроля изделий, продолжают доминировать координатно-измерительные устройства, обеспечивающие высокий уровень автоматизации и точности измерений. Однако особенности применяемого инструмента зачастую ограничивают и точность измерения и потенциальные возможности контроля сложной геометрии.

Одним из способов повышения качества контроля является применение новых видов инструментов, повышающих разрешающую способность при измерении. Такому подходу соответствует оптоволоконный датчик Werth WFP. Размеры этого датчика настолько небольшие, что он без проблем может контролировать объекты очень малого размера (рисунок 3.17А). На рисунке 3.17Б представлено сравнение размера обычного щупа (справа вверху) с размером человеческого волоса (по центру) и размером оптоволоконного щупа (слева внизу).



А. Б.  
 Рисунок 3.17. Контроль микрометровых размеров (А)  
 с использованием щупа малого диаметра (Б)

Из-за малых размеров датчика его невозможно визуально различить, тем самым не зафиксировать момент и положение его касания поверхности объекта. В результате требуется использовать специальный подход к контролю, представленный на схеме (рисунок 3.18).

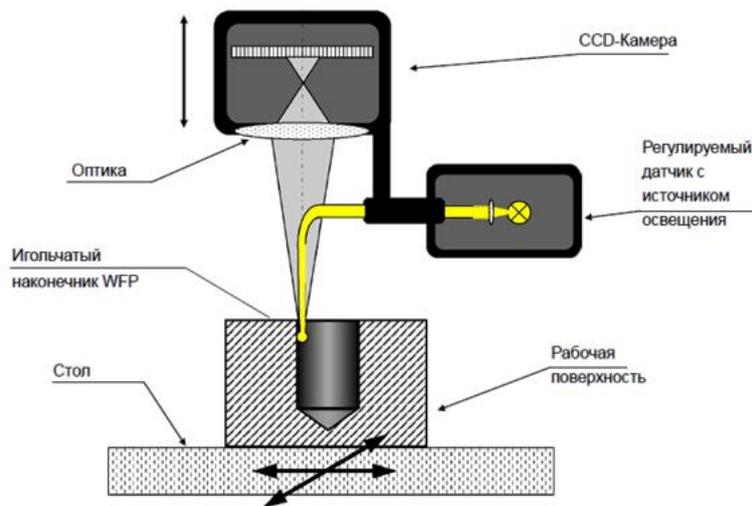


Рисунок 3.18. Схема контроля изделий с использованием оптоволоконного щупа

Как видно из изображения, традиционная схема дополняется источником освещения и камерой для отслеживания процесса. Особенность датчика позволяет проводить через него свет и формировать самоосвещение на поверхности наконечника. В процессе контроля это самоосвещение фиксируется камерой с увеличивающей оптикой, что позволяет отслеживать как его

перемещение рядом с деталью (рисунок 3.19А), так и момент касания (рисунок 3.19Б, В).

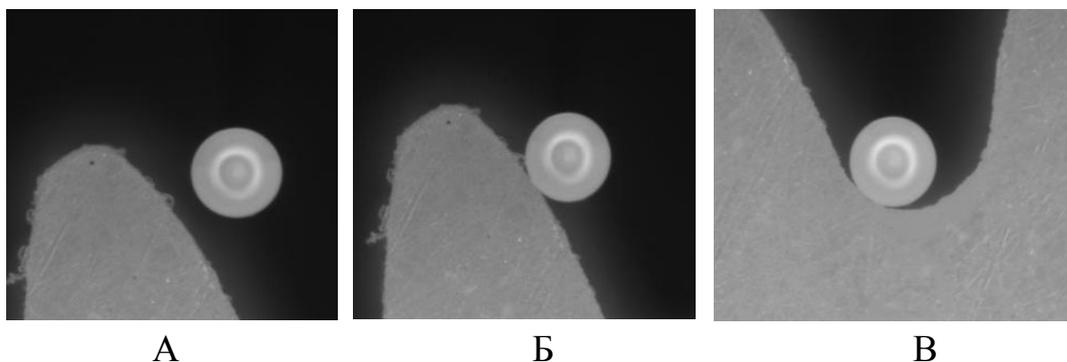


Рисунок 3.19. Измерение профиля шестерни с использованием Werth Fiber Probe WFP в режиме самоосвещения

Различные модификации конструкции измерительной системы (рисунок 3.20) позволяют применять такое средство контроля для широкой номенклатуры изделий. Особенности такой конструкции обеспечивают ряд преимуществ:

- Можно измерять наименьшие 3D-параметры (сферы от 20мкм до 500мкм).
- Незначительное измерительное усилие ("почти бесконтактный").
- Самое точное измерение среди всех существующих щупов.
- Отсутствует влияние длины щупа на результаты контроля.
- Возможен контроль шероховатости поверхности.

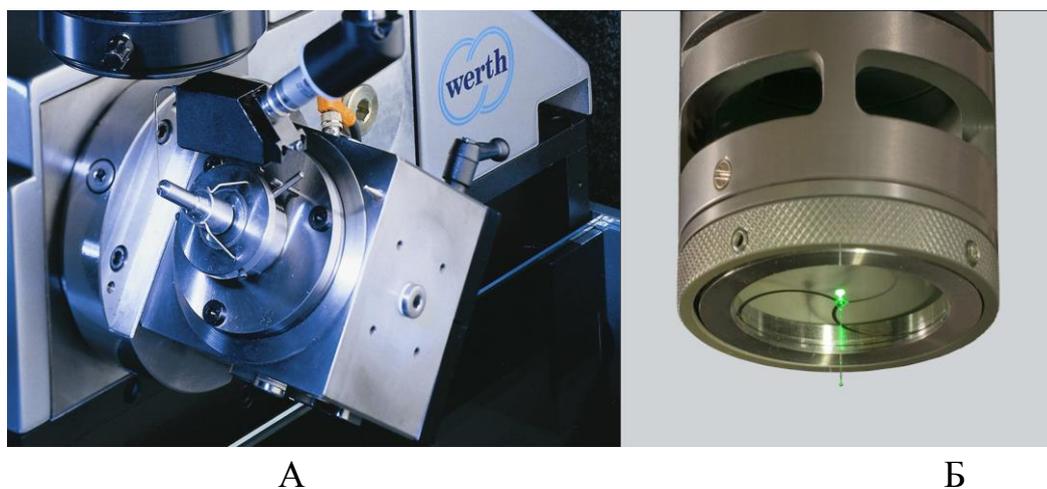


Рисунок 3.20. Использование датчика в конструкции с поворотным столом (А) и в виде 3D микро щупа (Б)

## ГЛАВА 4

# ТРЕХМЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ В БЫСТРОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ

Переход к индустрии 4.0 характеризуется повсеместным внедрением цифровых моделей производства, характеризующихся всесторонним применением трехмерных моделей объектов [14]. Одним из ключевых способов получения трехмерной модели на основе физических объектов является технология трехмерного сканирования, которая может реализовываться с использованием различных принципов и устройств. Самыми распространенными принципами трехмерного сканирования являются принцип линейного сканирования и принцип фотограмметрии.

### 4.1 Линейное трехмерное сканирование

Линейное сканирование обычно представляется в виде лазерного линейного сканирования, поэтому на базе него рассмотрим особенности технологии. Линейные системы используют анализ проекции плоского пучка на исследуемый объект (рисунок 4.1).

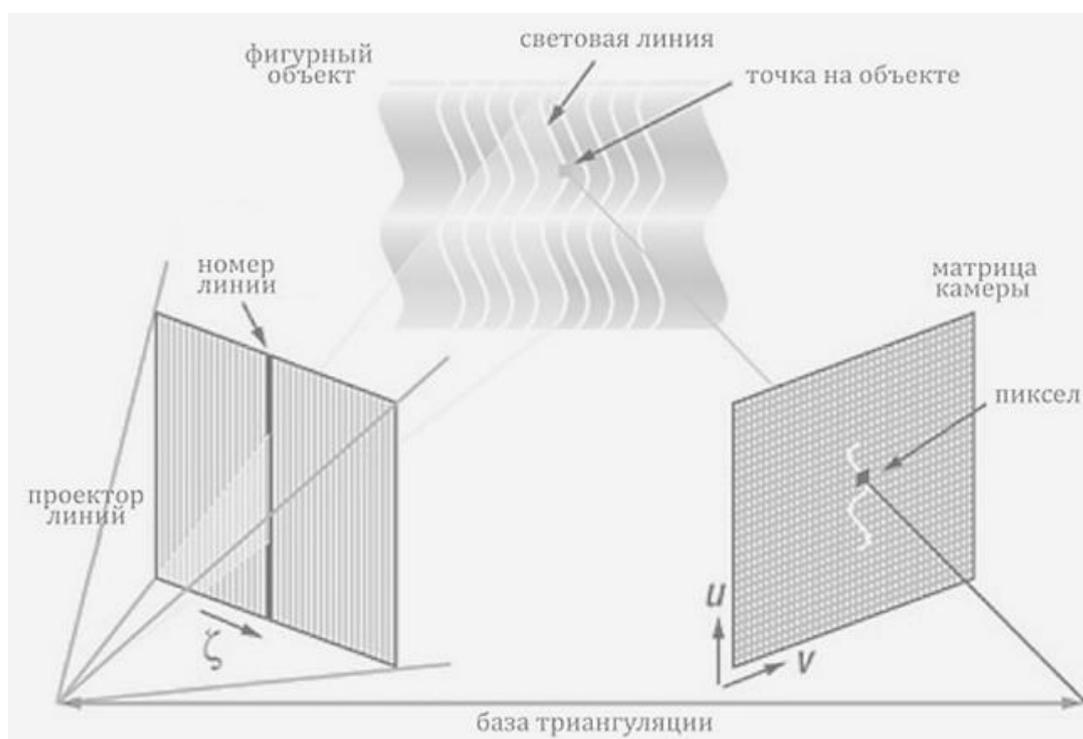


Рисунок 4.1. Принципиальная схема лазерного сканирования



сунка видно, что диапазон сканирования зависит от геометрических размеров матрицы и соответственно от параметров объектива камеры (фокусного расстояния и величины аберраций). Очень часто подобную систему используют в машинном зрении. Например, поиск стыков (рисунок 4.3), подлежащих сварке, позиционирование и др. Также подобные системы позволяют производить контроль геометрических изделий на конвейерах с высокой производительностью и точностью.



Рисунок 4.3. Поиск области сварки с помощью лазерного сканера

Также существует специализированный метод линейного сканирования, в котором используется опорный угол, по проекции на который линейного пучка, можно рассчитать положение источника света, а относительно положения источника света уже рассчитывается расстояние от точки объекта до объектива камеры, которая в данном случае служит базой. Этот метод хорош тем, что его реализация достаточно дешева и необходим только опорный угол, веб-камера (от характеристик которой зависит точность сканирования), источник плоского лазерного пучка и программное обеспечение для анализа данных (рисунок 4.4).

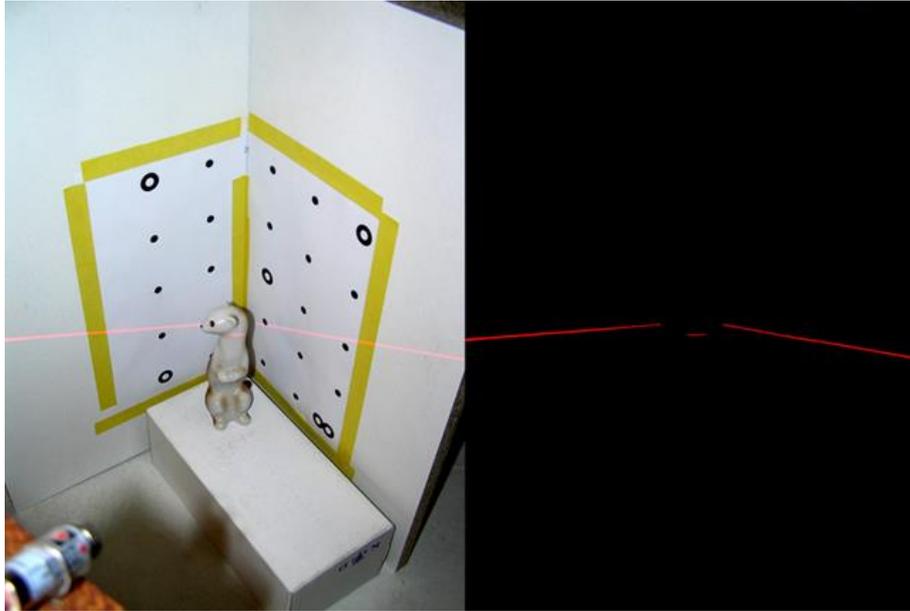


Рисунок 4.4. Метод сканирования с опорным углом

Лазерное сканирование имеет огромный диапазон применений и ценовых решений, позволяет проводить достаточно точные и быстрые измерения в больших динамических диапазонах. Часто применяются в промышленности, геодезии и строительных изысканиях.

Также лазерные сканеры применяются как вспомогательное устройство для контактного измерения. Например, основная часть изделия контролируется с использованием лазерного сканера (рисунок 4.5), а остальные параметры контролируются с использованием контактного щупа.

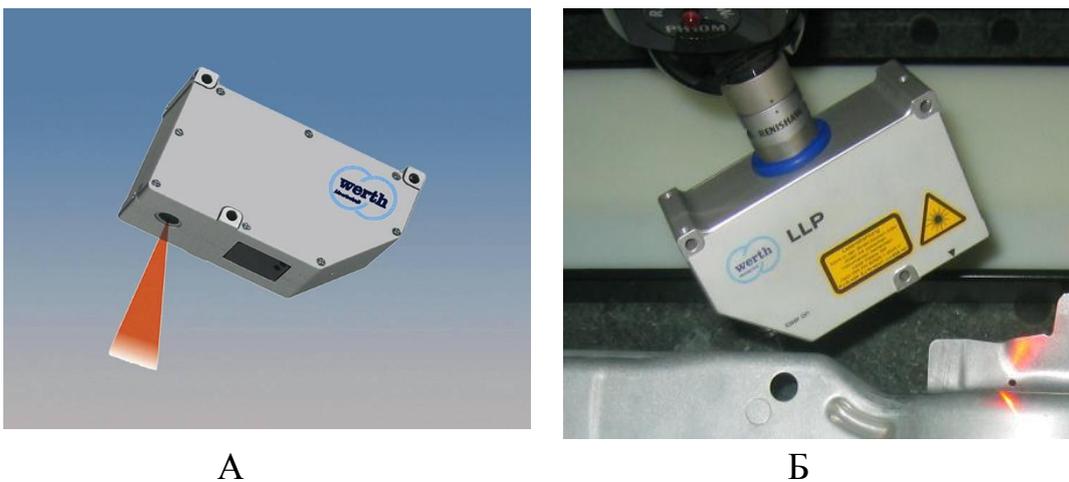


Рисунок 4.5. Визуализация лазерного сканера (А) и его применени на измерительной машине (Б)

## 4.2 Трехмерное сканирование на основе фотограмметрии

Фотограмметрия - это технология исследования объектов с целью определения их геометрических и прочих пространственных параметров, базирующаяся на фотографических изображениях. Фотограмметрия часто применяется в топографии, астрономии, геологических изысканиях, экологических исследованиях, проектировании и строительстве сооружений, археологических раскопках, кино индустрия и т.п.

В простейшем случае пространственные координаты точки объекта определяют по двум или более фотографиям, снятым с разных ракурсов. У полученных изображений отыскиваются общие точки и, зная положение во время съемки (или аналитически рассчитывая относительное положение для некоторых модификаций технологии), можно провести лучи от центра объектива в разных положениях до идентичных точек на снимках, и в точке пересечения лучей будет находиться данная точка исследуемого объекта. Принципиальная схема представлена на рисунке 4.6.

В результате сканирования всего массива общих точек двух изображений можно построить поверхность исследуемого объекта. Так же существуют алгоритмы, позволяющие анализировать геометрические параметры объектов по одному снимку, если геометрия исследуемого объекта известна заранее.

Развитие фотограмметрии идет в ногу с развитием фотографии и на данный момент в фотограмметрии используется множество систем для съемки. Сами системы для съемки можно разделить на два основных типа: пассивные и активные.

Пассивные системы строят изображения, фиксируя отраженную от исследуемого объекта энергию, полученную от естественных источников освещения, например солнца, либо фиксируя собственное излучение тел, например, свет в ИК спектральном диапазоне. Активные системы сами генерируют сканирующее излучение: радары, лидары, радио интерферометрические системы.

Необходимый метод выбирают в зависимости от свойств материалов, из которых состоит исследуемый объект: спектры поглощения и отражения, наличие флуоресценции в данном диапазоне; характер внешних условий: освещенность объекта, метеоусловия, электромагнитные свойства внешней

среды, удаленность объекта от места съемки. Проанализировав все перечисленные факторы, можно легко подобрать оптимальную систему для конкретного исследования.

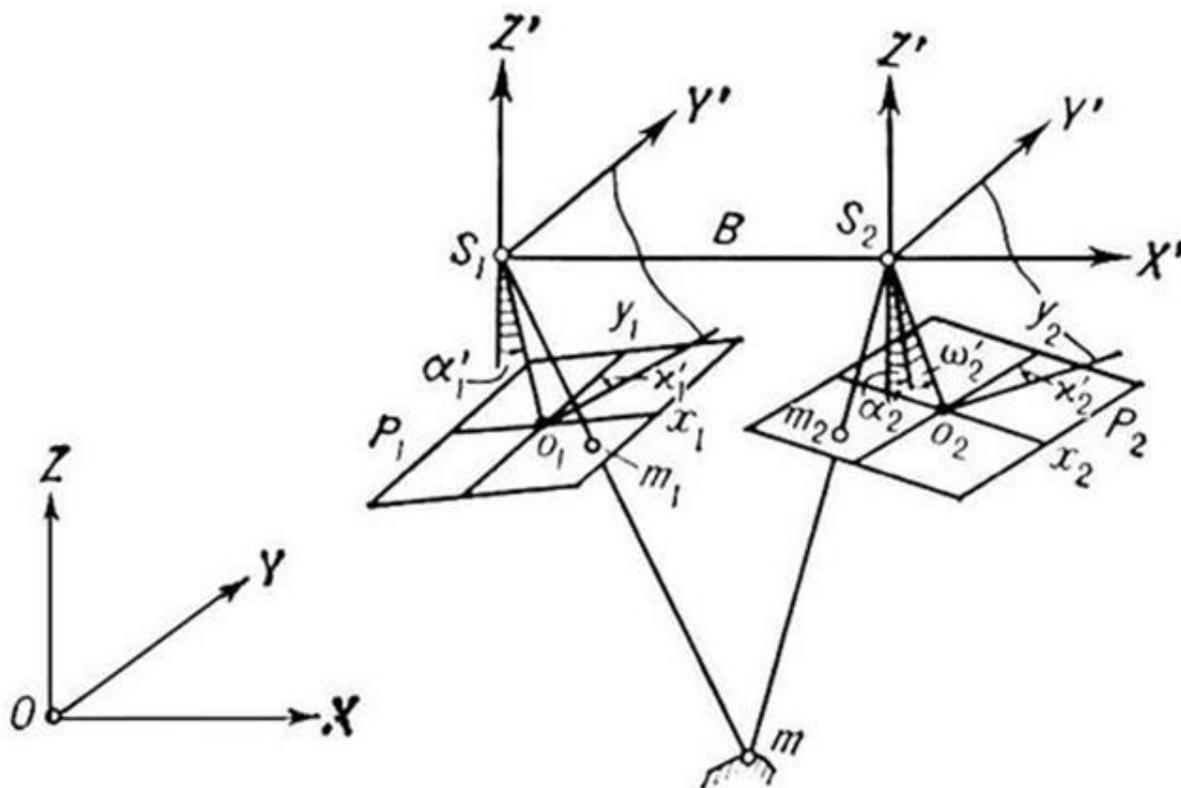


Рисунок 4.6. Общий принцип фотограмметрии

#### 4.2.1 Agisoft PhotoScan

Если среди средств трехмерного сканирования, использующих фотограмметрический принцип, выделять самый простой с точки зрения используемых технических средств, то безусловно таким средством является программное обеспечение Agisoft Photoscan, для работы которого достаточно наличия набора фотографий объекта с различных позиций (рисунок 4.7А). Программное обеспечение самостоятельно на основе фотографий строит текстурированную 3D-модель объекта и окружающего пространства (рисунок 4.7Б).



А



Б

Рисунок 4.7. Построение карты снимков для создание трехмерной модели скульптуры (А) и наложение текстуры на отсканированный объект (Б)

Данная технология часто применяется для быстрого создания трехмерных сканов различных объектов достаточно большого размера. Простота используемого подхода привела к появлению очень простых средств на основе подобного принципа. Так, например, программное обеспечение 123D Catch, которое может работать даже на мобильных устройствах с использованием встроенных фотокамер (рисунок 4.8). При этом получаемые модели имеют низкое качество, но этот недостаток отлично компенсируется простотой использования, что позволило данному средству заполнить нишу примитивного трехмерного сканирования.



Рисунок 4.8. Примеры трехмерного сканирования с использованием программы 123D Catch

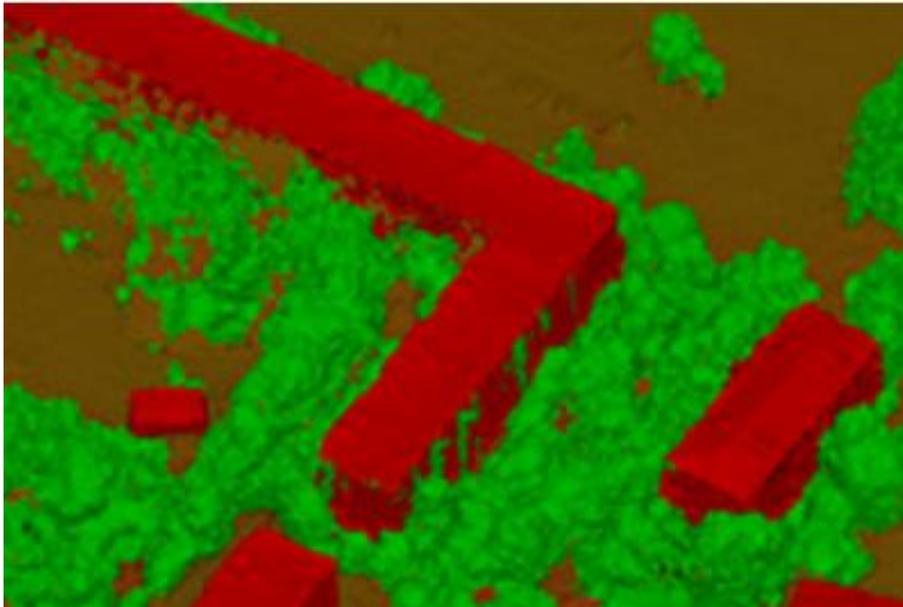


Рисунок 4.9. Построение трехмерной модели местности с цветовой классификацией объектов различных типов

Уникальные возможности Agisoft Photoscan проявляются в профессиональной, наиболее полной, версии этой программы. Она применяется преимущественно для получения трехмерных моделей обширной местности. В области трехмерной аэрофотографии данная технология полностью раскрывается и позволяет сканировать огромные площади вплоть до полных горных массивов. При этом получаемая модель может дорабатываться в программе для получения дополнительных данных, включая:

- автоматический анализ данных и их классификация (рисунок 4.9);
- интеграция с данными теплового анализа или с GPS-координатами;
- измерение расстояний на карте местности;
- экспорт в Google Earth.

Также профессиональная версия позволяет оптимизировать сканирование и обычных объектов за счет применения динамического трехмерного моделирования, языка сценариев автоматизации на базе python и пакетной обработки.

## 4.2.2 Трехмерные сканеры Artec

Среди технологий простого трехмерного сканирования изделий длиной до нескольких метров большую популярность получили средства сканирования на основе инфракрасного излучения. Такой подход позволяет получать быстро и относительно точно (с точностью от 0,1 до 1 мм) модель с поддержкой текстурированного дополнения геометрии. Двумя самыми характерными представителями данного направления является сенсор Microsoft Kinect и сканеры Artec.

В области инфракрасного сканирования самым профессиональным решением является серия сканеров Artec, включающая в себя 3 модели:

- Eva.
- Space Spider.
- Shapify Booth.

### Artec Eva

Трехмерный сканер Artec Eva (рисунок 4.10А, Б) является самым компактным среди устройств Artec. Как и в других системах Artec, процедура трехмерного сканирования в Artec Eva базируется на освещении объекта структурированной подсветкой. На базе анализа получаемых изображений в реальном времени формируются 3D снимки и автоматически объединяются между собой (рисунок 4.10В).



Рисунок 4.10. Трехмерный сканер Artec Eva (А,Б)

и пример автоматического объединения отдельных снимков модели (В)

За счет использования нескольких камер на сканере становится возможным получить не только трехмерный скан объекта, но и его текстуру. В результате формируется полноцветовая модель объекта. В работе с трехмерным сканом выделяется 3 этапа (рисунок 4.11):

1. Сканирование объекта.
2. Объединение отдельных сканов и очистка модели.
3. Наложение текстуры и экспорт результата.

Сканирование и вся доработка результатов производится в программном обеспечении Artec Studio. Объединение сканов и наложение текстур осуществляется в автоматическом режиме.

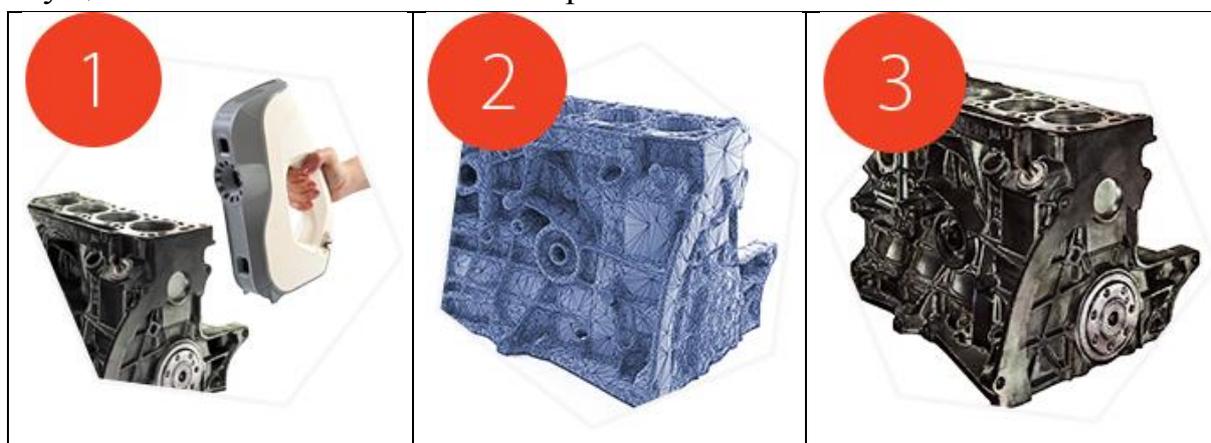


Рисунок 4.11. Этапы работы с трехмерным сканом объекта

Сканер весит менее 1 кг и может использоваться в полностью мобильном варианте за счет подключения специализированной батареи и ноутбука или планшетного компьютера. Так как отдельные 3D-снимки объединяются в процессе сканирования автоматически на основе данных о геометрии и текстуре, то нанесение специализированных реперных меток на объект не требуется.

За счет сканирования со скоростью до 16 кадров в секунду и точностью 0,5-1 мм, трехмерный сканер Artec применяется во множестве областей, включая:

- Промышленное производство и дизайн.
- Медицина.
- Наука и образование.
- Искусство.

С использованием Artec Eva был получен первый трехмерный скан президента США (рисунок 4.12), использованный для создания прижизненного бюста.



Рисунок 4.12. Трехмерное сканирование Барака Обамы сканерами Artec Eva

### **Artec Space Spider**

Трехмерный сканер Artec Space Spider (рисунок 4.13) обладает повышенной точностью сканирования по сравнению с Artec Eva и может более эффективно использоваться в промышленности.



А

Б

Рисунок 4.13. Трехмерный сканер Artec Space Spider (А)  
и пример отсканированного изделий (Б)

### **Artec Shapify Booth**

Технология трехмерного сканирования Artec не подходит для профессионального промышленного использования таких сканеров на объектах высокой точности, но за счет мобильности, быстрой скорости работы, простоты и поддержки текстур, является очень эффективным решением для сканирования объектов реального мира, требующих компьютерной визуализации. В первую очередь, технология отлично подходит для трехмерного сканирования человека. Именно для такой задачи разработана Artec Shapify Booth - система трехмерного сканирования человека, выполняющая процесс сканирования за несколько секунд. Высокая скорость достигается за счет использования четырех подвижных широкоформатных сканеров и специальной конструкции устройства (рисунок 4.14).



Рисунок 4.14. Внешний вид Artec Shapify Booth

### 4.2.3 Трехмерный сенсор Microsoft Kinect

Другим типом оборудования, работающим на основе инфракрасного принципа, является сенсор Microsoft Kinect, который создан изначально для игровой приставки Xbox 360, но его уникальные особенности позволили использовать сенсор в различных задачах, включая простое трехмерное сканирование. В первую очередь такая ситуация сложилась за счет простоты конструкции (рисунок 4.15), наличию открытого интерфейса для создания собственных приложений и низкой стоимости (от 100 до 300 \$ в зависимости от модели).

Сообщество OpenKinect занимается разработкой и поддержкой драйверов и библиотек libfreenect, которые позволяют получать данные с сенсоров Kinect (включая цветное изображение, карты глубины и показатели акселерометров). На данный момент - это основной инструмент при работе с сенсором Kinect.

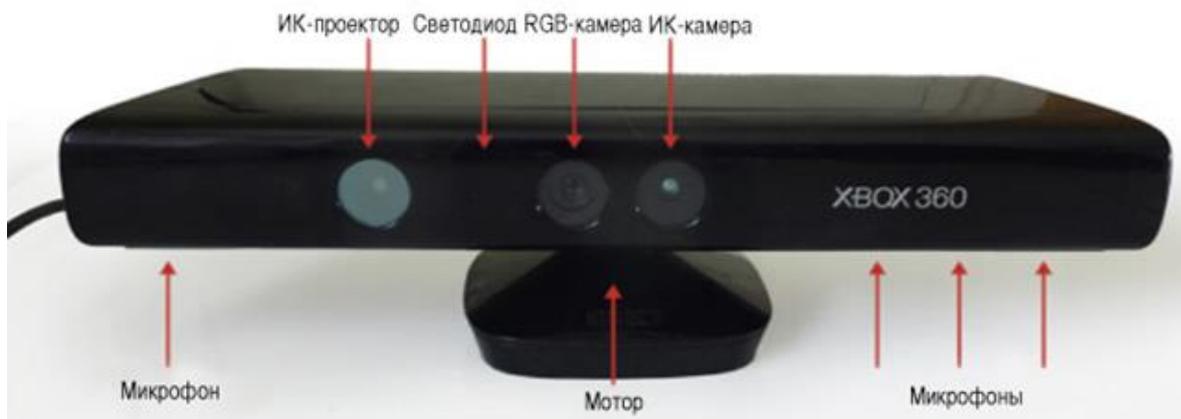


Рисунок 4.15. Внешний вид и основные компоненты трехмерного сенсора Microsoft Kinect

На более высоком уровне используется opensource фреймворк OpenNI framework, который реализует API для взаимодействия ПО и сенсора, а также позволяет реализовывать предобработку данных, например, отслеживание жестов, положения рук и скелета, которое реализуется специализированным ПО NITE (рисунок 4.16).

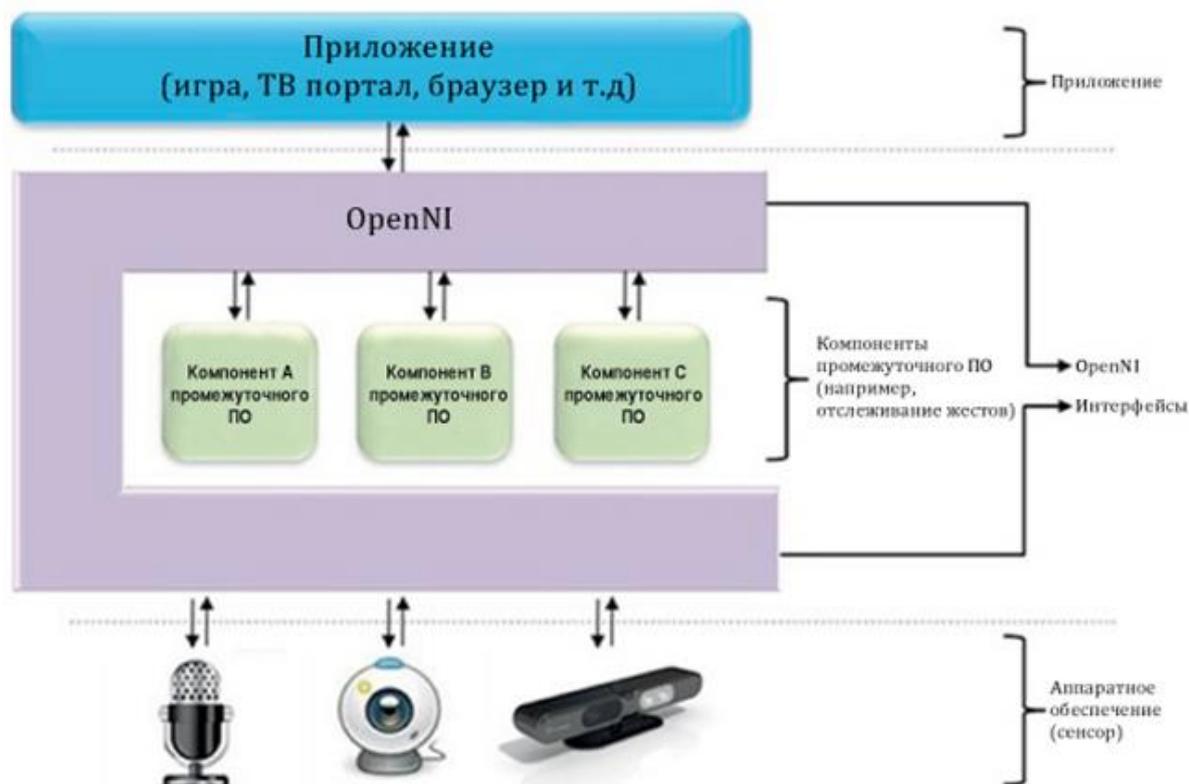


Рисунок 4.16. Схема абстрактных уровней фреймворка OpenNI

За счет использования таких интерфейсов становится возможным создавать множество различных специализированных средств от трехмерных сканеров до систем распознавания изображений на базе единой платформы разработки начального уровня.

#### 4.2.4 Интерференционное проецирование в трехмерном сканировании

Среди производителей высокоточного оборудования, использующего фотограмметрический метод, лидирующее положение занимает компания GOM, которая обладает спектром измерительных систем для различных сфер применения (рисунок 4.17).



Рисунок 4.17. Линейка измерительных систем компании GOM

Основные задачи, решаемые этой серией устройств, представлены на рисунке 4.18.

Для получения объемных моделей изделий в различных сферах деятельности используется серия сканеров ATOS, которая производит трехмерное сканирование на основе совмещения фотограмметрического принципа с интерференционным проецированием, за счет чего достигается высокая точность измерения. При этом для съемки объектов применяются 2 камеры с фиксированным углом и взаимным расположением [15]. Одни из самых передовых сканеров в серии ATOS носят название Triple Scan, так как позволяют производить захват объемных данных как с каждой из камер (рисунок 4.19А, Б), так и с комбинации 2 камер и сканера (рисунок 4.19В). Подробнее про технологию трехмерного сканирования ATOS и особенности ATOS Triple Scan описано в приложении 2.

## GOM – Промышленная 3D метрология Измерительные системы



Рисунок 4.18. Задачи, решаемые измерительными системами компании GOM

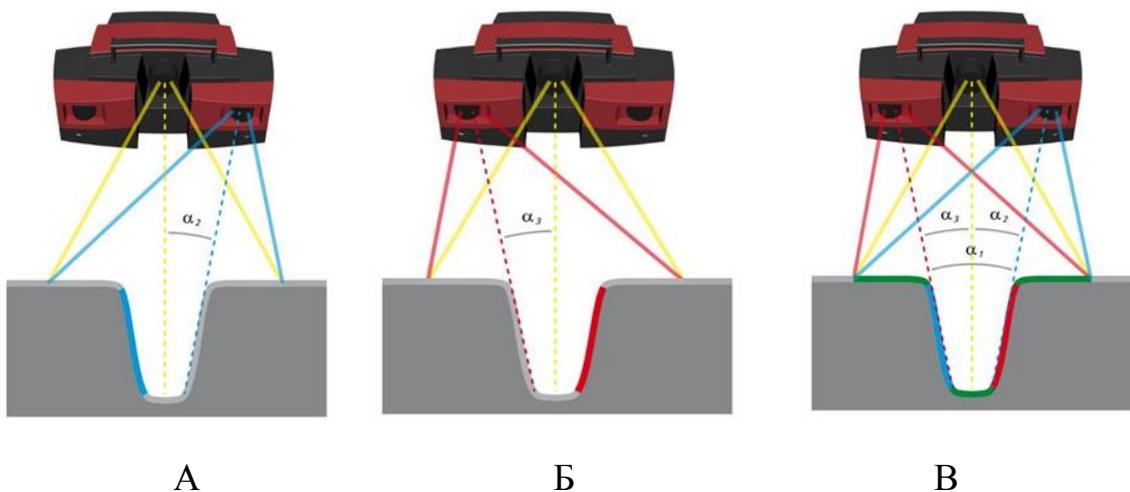


Рисунок 4.19. Три вида сканирования с использованием ATOS Triple Scan

На основе совмещения фотограмметрии и интерференционного проектирования компания GOM выпускает 3 линейки сканеров и платформу автоматизации (рисунок 4.20), которая позволяет с использованием роботов или поворотных столов производить полностью автоматизированное сканирование различных видов изделий [16].



Рисунок 4.20. Серия сканеров ATOS и различные виды платформ автоматизации сканирования

При сканировании изделий системой ATOS имеется возможность получения моделей, размеры которых превышают измерительный объем. В этом случае имеется три стратегии измерения в зависимости от размеров изделия:

Стратегия 1, изображенная на рисунке 4.21а, используется в случае, если модель вписывается в измерительный объем. Данная стратегия применялась при оцифровке корпуса.

Стратегия 2, изображенная на рисунке 4.21б, применяется, если размер объект превышает измерительный объем в 2-3 раза.

Если применять стратегию 2 для более крупных объектов, тогда из-за погрешности совмещения частей точность полученной модели будет гораздо ниже точности участков по отдельности. В таких случаях применяется стратегия 3, основанная на комбинировании систем ATOS и TRITOP. Принцип сканирования остается аналогичным стратегии 2, но для обеспечения

высокой точности объединения частей применяются специальные кодированные метки, которые распознаются как системой ATOS, так и системой TRITOP. За счет того, что каждая метка индивидуальна, формируется каркас изделия на основе данных, полученных системой TRITOP. После сканирования поверхности по частям объединение происходит с учетом сформированного каркаса. Таким образом, используя комбинации кодированных меток можно сканировать объекты с габаритами самолета или здания. На рисунке 4.22 приведена схема сканирования автомобиля при использовании такого подхода.

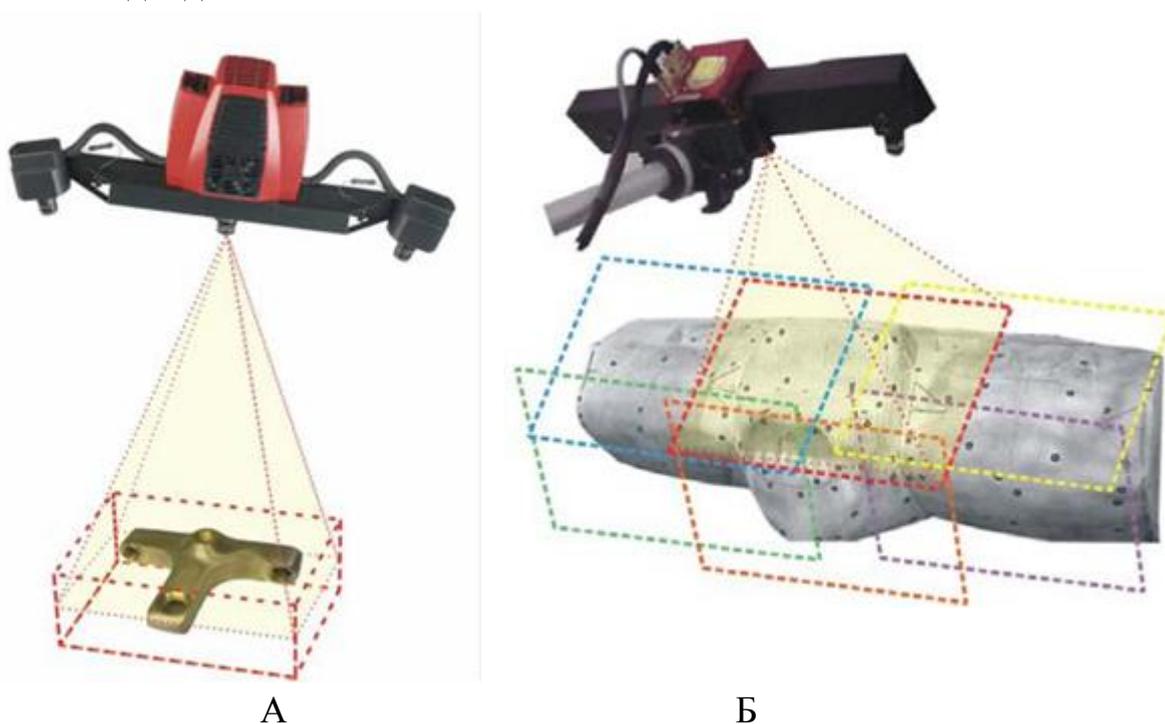


Рисунок 4.21. Применение при сканировании стратегии 1 (А) и стратегии 2 (Б)

Сканируя прототип автомобиля, созданного дизайнерами, можно получить модель, которая после некоторой доработки может служить основой для массового производства. Однако для достижения наилучших эксплуатационных характеристик автомобиль также требуется протестировать при динамических нагрузках. Особенности поведения устройств в подвижном состоянии важны для полной оценки эффективности применения, что позволяет выпускать конкурентоспособную продукцию. Одной из оптических систем динамического анализа является GOM PONTOS. Общий принцип работы аналогичен системе ATOS, но за счет применения высокоскоростных камер за короткий промежуток времени поступает большое количество

данных, позволяющих учесть даже кратковременные изменения. Положения точек поверхности определяется с использованием маркеров, аналогичных тем, что применяются при сканировании системой ATOS. Применение системы PONTOS представлено на рисунке 4.23 (А,Б).

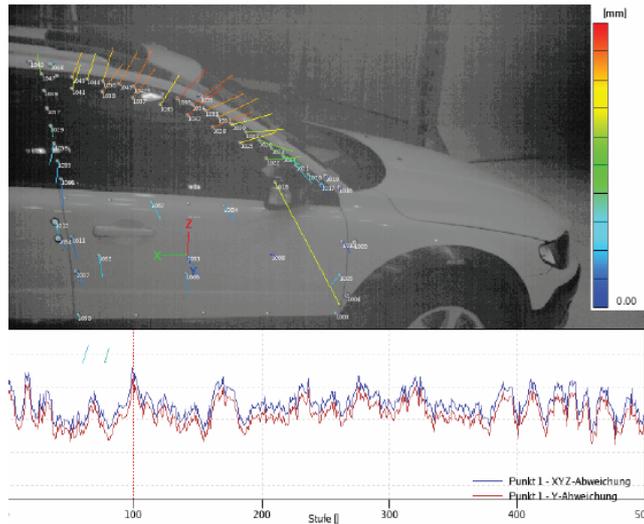


Рисунок 4.22. Сканирование автомобиля с использованием системы TRITOP

После проведения динамического анализа формирует набор данных о процессе, который может быть представлен в виде отчетов или временных диаграмм. Однако при некоторых видах деформаций не требуется формирование описания процесса во времени, а необходимо зафиксировать ряд состояний изделия. В таких случаях применяются системы статического анализа деформаций. Одной из таких систем является ARAMIS, которая также как и ATOS применяет оптическое сканирование, но не требует применение специальных меток, так как находится неподвижно перед изучаемым объектом и фиксирует протекание процесса при помощи двух высокоскоростных камер.



А



Б

Рисунок 4.23. Внешний вид системы PONTOS (А) и пример ее использования (Б)

Динамический анализ важен не только на уровне всего изделия, но и на уровне его составляющих. Пример анализа влияния динамических нагрузок на поведение материала с использованием системы GOM ARAMIS представлен на рисунке 4.24.

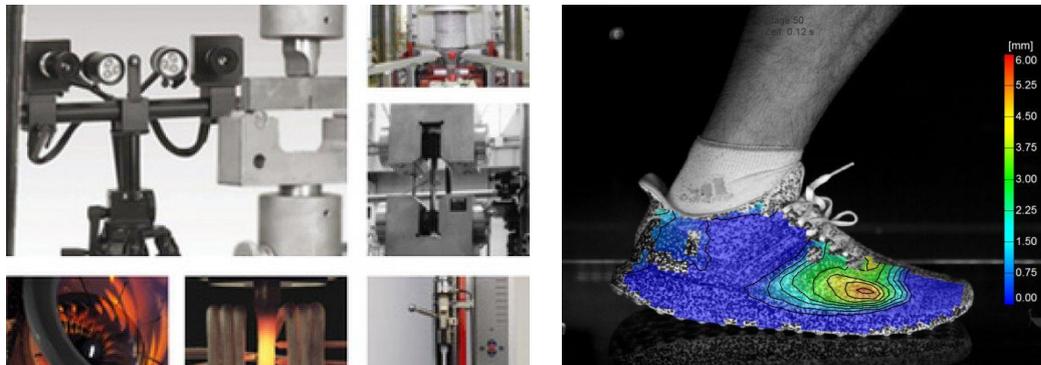


Рисунок 4.24. Анализ динамических нагрузок с использованием системы GOM ARAMIS

Система в реальном времени с высокой точностью и скоростью анализирует протекающие процессы на макроуровне, что позволяет отследить, например, переход материала из упругой деформации в состояния текучести и последующего разрыва (рисунок 4.25).

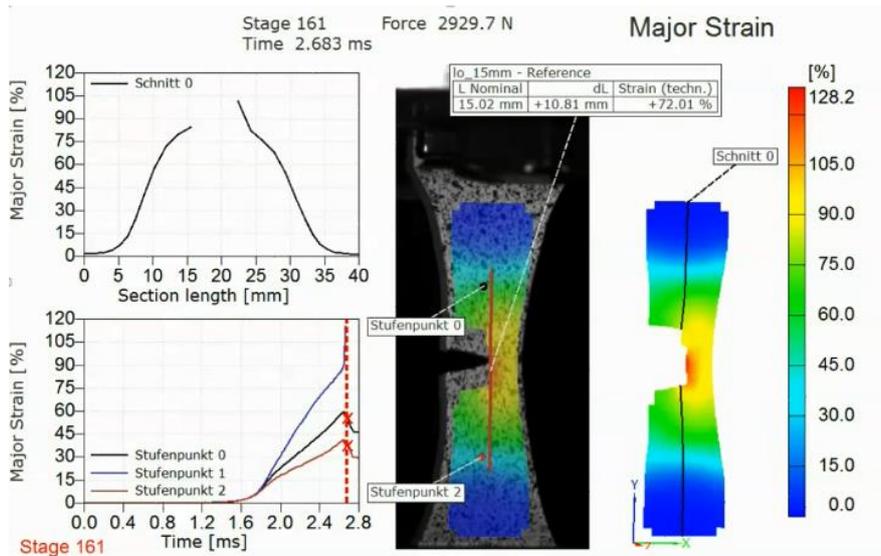


Рисунок 4.25. Анализ процесса разрушения с использованием системы ARAMIS

Другим наглядным примером анализа динамических нагрузок является анализ процесса смыкаемости частей пресс-формы (рисунок 4.26).

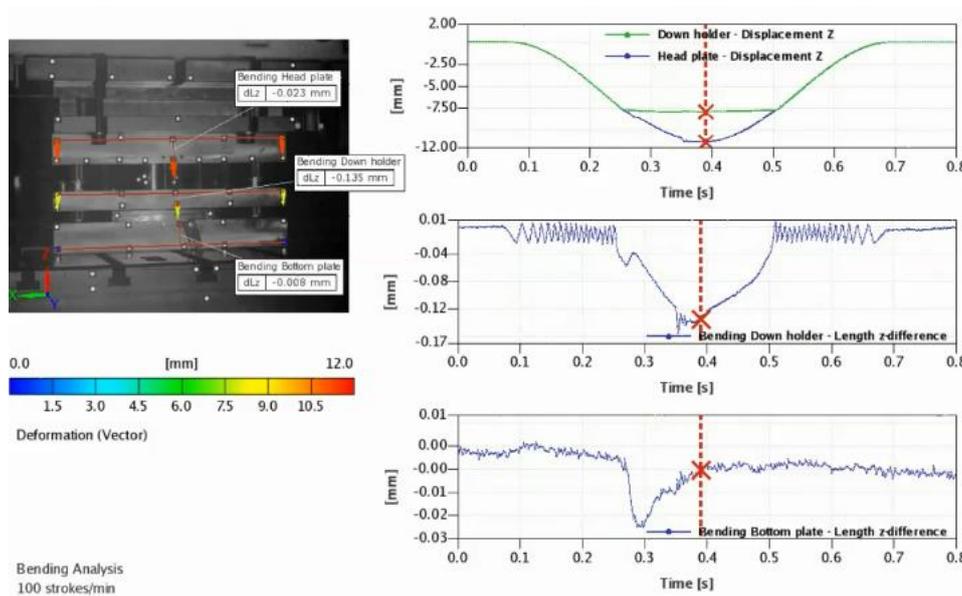


Рисунок 4.26. Анализ смыкаемости форм в ТПА с использованием ARAMIS

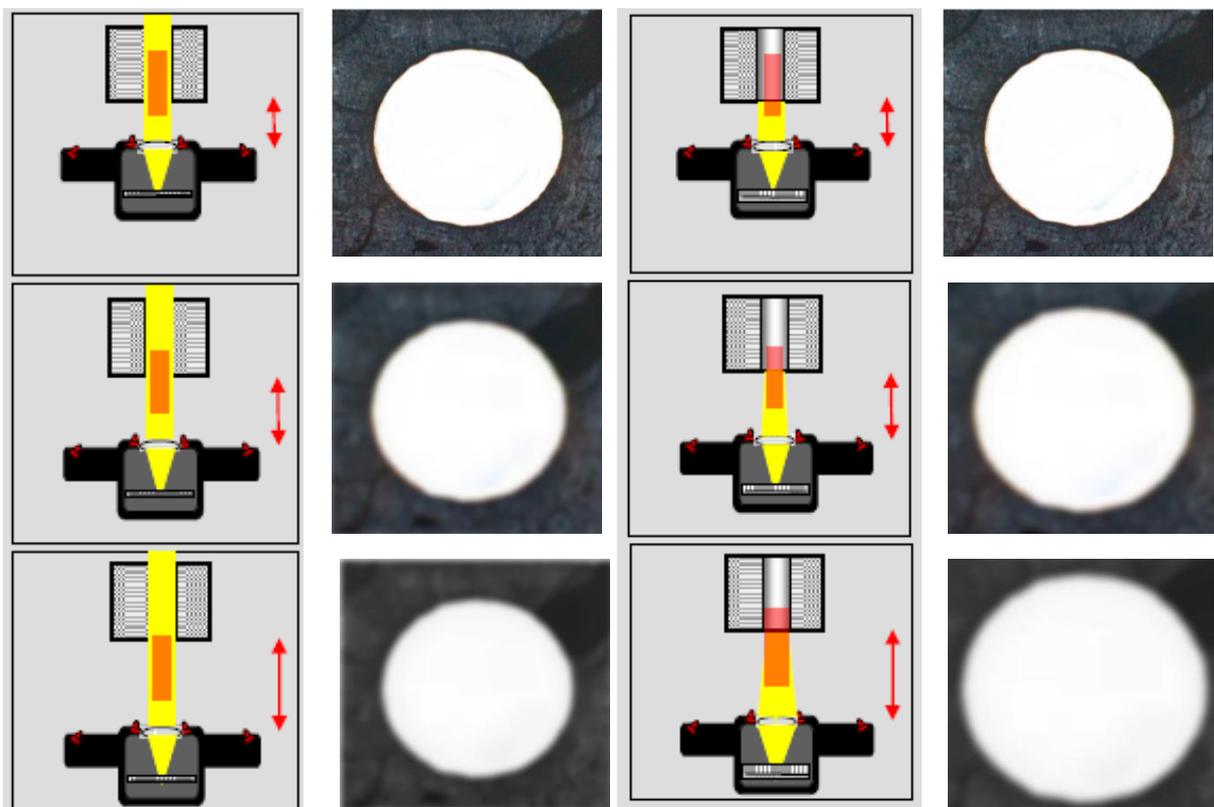
Таким образом, при использовании подобных систем формируется большое количество данных, полученных с высокой точностью. Такие результаты позволяют сделать детальный анализ условий эксплуатации изделий и определить как их характеристики, так и характеристики других изде-

лий или материалов, которые входят с ними в контакт. Получение достоверных данных также имеет большое значение для анализа качества инженерного расчета или другого метода виртуального исследования.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

## ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКОГО СЕНСОРА ДЛЯ ДВУМЕРНОГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ

Качественная фокусировка для контроля обеспечивается настройками телецентричности. Сравнение контроля с телецентричностью и без нее представлен на рисунке 1.



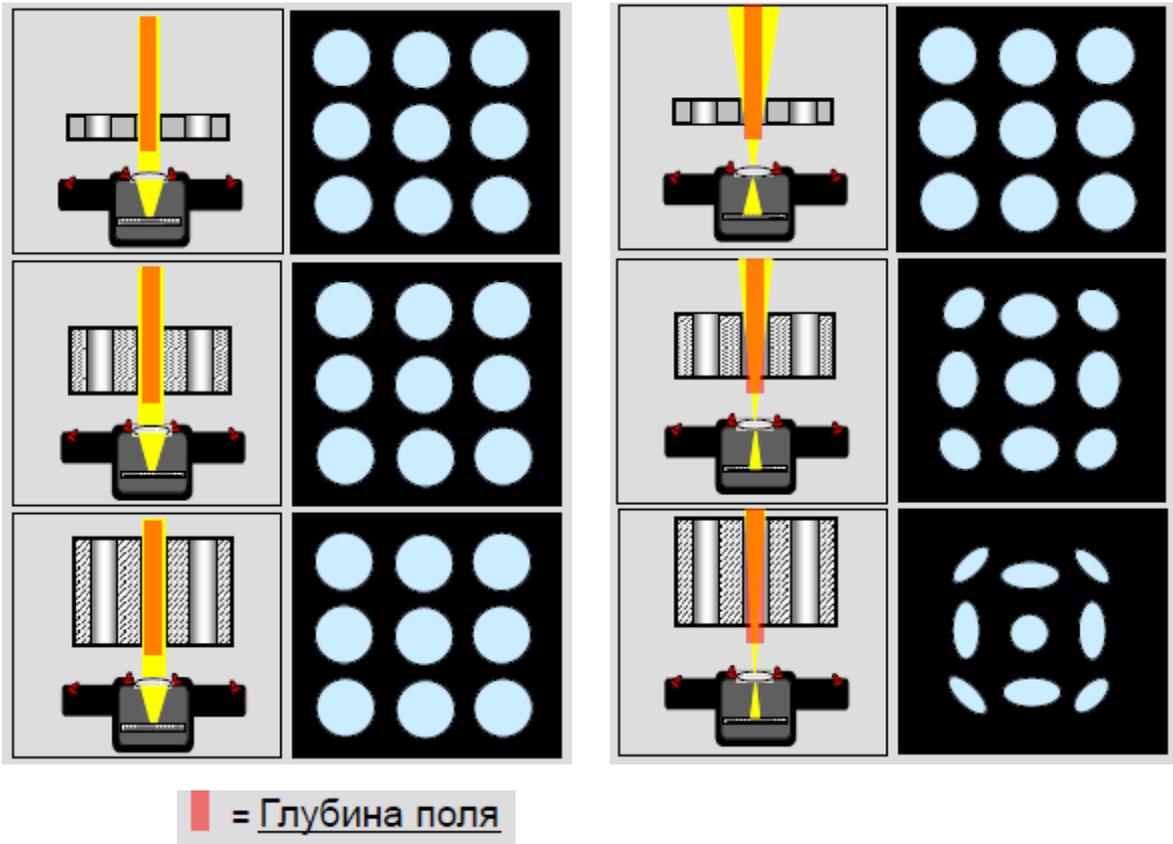
■ = Глубина поля

Телецентрические  
Изображение не в фокусе  
Диаметр остается постоянным

Нетелецентрические  
Изображение не в фокусе  
Диаметр становится больше

Рисунок 1. Эффект телецентричности при контроле

На рисунке 2 представлены искажения геометрии при контроле на различных высотах без телецентричности.



Телецентрический  
 Постоянное изображение не  
 зависит от высоты детали

Нетелецентрический  
 Искажение изображения увеличива-  
 ется с высотой детали (абберация)

Рисунок 2. Эффект телецентричности при использовании различных высот

Одна из ключевых особенностей системы Werth – направленный свет, схема которого представлена на рисунке 3.

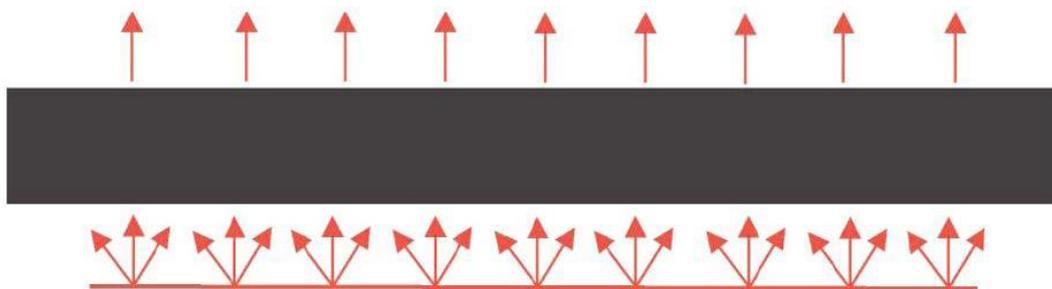


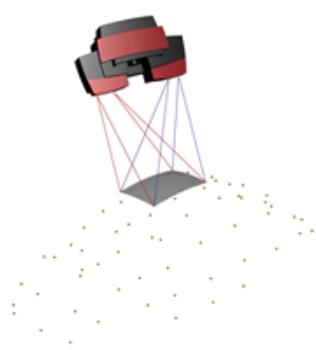
Рисунок 3. Направленный свет в системе Werth

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2 ATOS TRIPLE SCAN

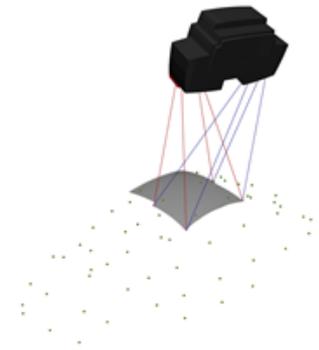
Процесс контроля с использованием системы ATOS представлен на рисунке 1.



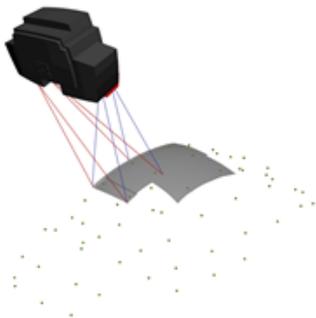
Размещение объекта перед сканером



Сканирование первой поверхности



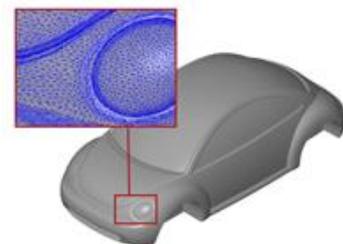
Сканирование второй поверхности



Повторение сканирования до получения полного скана



Постепенное воссоздание поверхности



Получение финального детализированного скана

Рисунок 1. Этапы трехмерного сканирования

Для объединения отдельных сканов используются специализированные реперные точки. Принцип сканирования с точками и без представлен на рисунке 2.

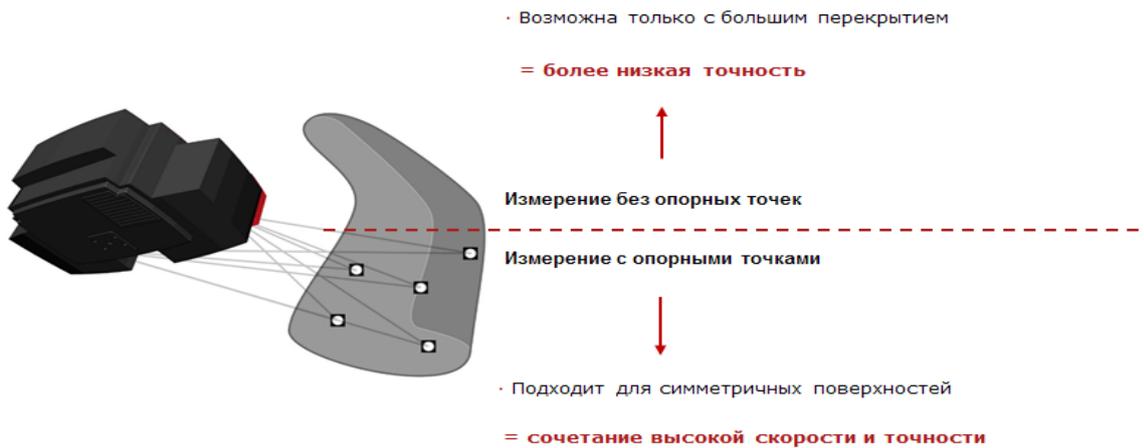
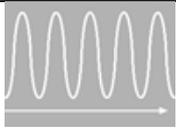
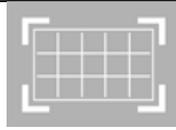


Рисунок 2. Методы сканирования больших моделей с использованием системы ATOS

Особенности технологии голубого света, используемой в системе ATOS Triple Scan, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Особенности технологии голубого света

		
Светодиодный источник света	Низкая пропускная способность / узкополосность голубого света	Цифровой активный и калиброванный проектор
	Сканирование при любых условиях освещения Меньше отражений и шумов Лучшее качество данных	Проецирование элементов на объект, например, линий разметки, отверстий

Основные особенности систем ATOS представлены на рисунке 3.

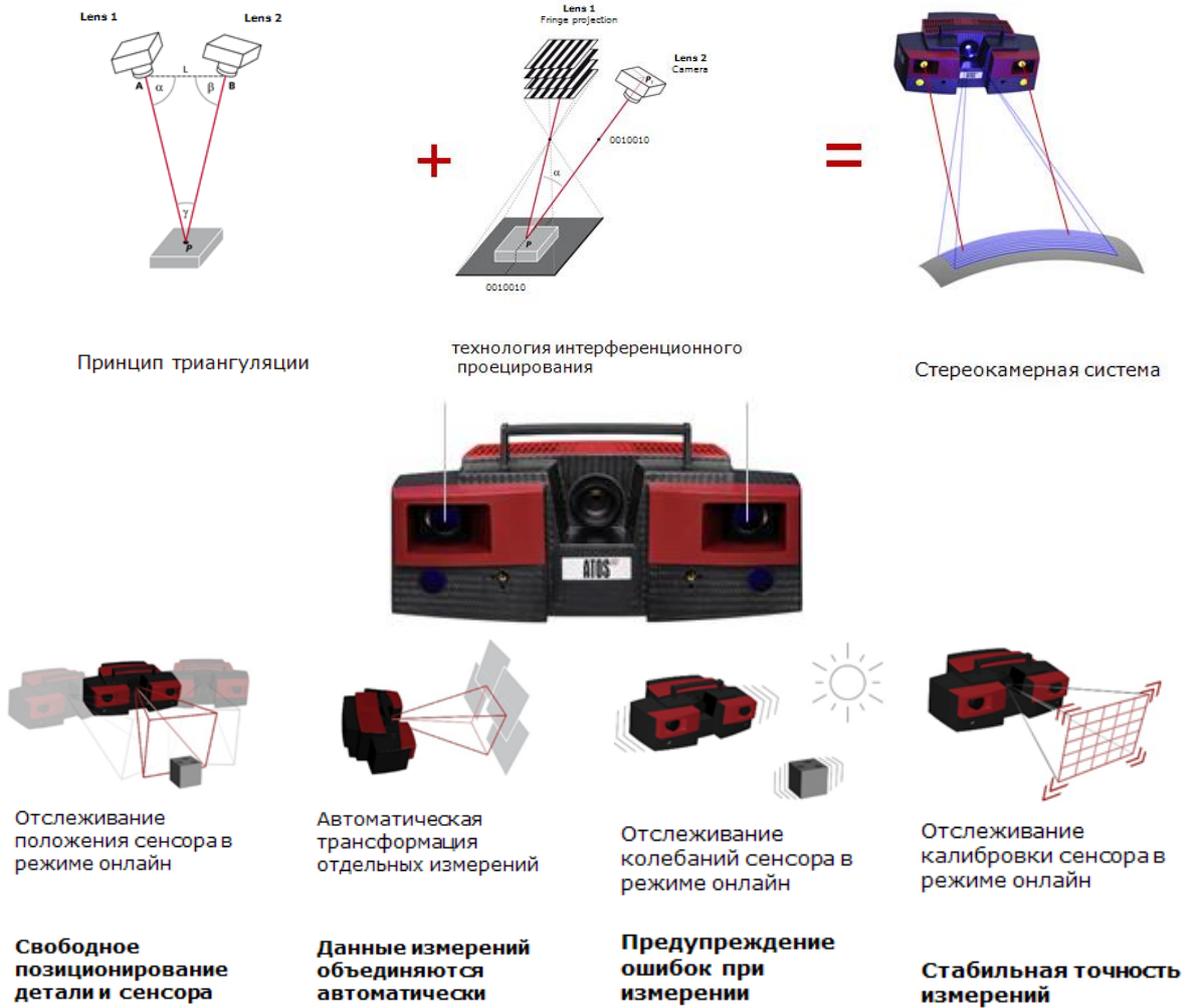


Рисунок 3. Особенности систем ATOS

# ЛИТЕРАТУРА

1. Horvath. J. Mastering 3D Printing . – Apress., 2014. – 196 p.
2. Е.И. Яблочников, В.И. Молочник, А.А. Миронов ИПИ-технологии в приборостроении. - СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. - 128 с. - 100 экз.
3. Dugan. U. Solid Modeling and Applications . – Springer International Publishing., 2016. – 298 p.
4. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies. – Springer New York., 2015. – 498 p.
5. Грибовский А.А., Тамбовцева. Н.А. Алгоритмы выбора технологий быстрого прототипирования для единичного и мелкосерийного производства изделий // Сборник тезисов докладов конференции молодых ученых, Выпуск 2. Труды молодых ученых / Под ред. В. О. Никифорова. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011 С. 207–209.
6. Яблочников Е.И., Грибовский А.А., Пирогов А.В. Эффективность применения аддитивных технологий для изготовления литьевых форм и при подготовке производства изделий из термопластичных полимерных материалов. Металлообработка. 2014. Т.77-78, №5-6, - С.74-81. – 93с.
7. Е.И. Яблочников, Ю.Н. Фомина, А.А. Саломатина Компьютерные технологии в жизненном цикле изделия - СПб: СПб ГУ ИТМО, 2010. - 188 с. - 100 экз.
8. Е.И. Яблочников, Д.Д. Куликов, В.И. Молочник Моделирование приборов, систем и производственных процессов. - СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. - 156 с. - 100 экз.
9. Грибовский А. А. Системная интеграция при моделировании и изготовлении изделий в среде расширенного предприятия // Научно-технический вестник. – 2011. – Том 73, выпуск № 3. – С. 71–74.
10. Margolis M. Arduino Cookbook. – O'Reilly Media., 2011. – 724 p.
11. Грибовский А.А., Андреев Ю.С, Афанасьев М.Я. Интегрированные технологии производства и современные среды моделирования в приборостроении. Учебное пособие - Санкт-Петербург: СПб: Университет ИТМО, 2015. - 139 с. - 100 экз.

12. Колчин А.Ф., Стрекалов А.Ф., Сумароков С.В. Управление жизненным циклом продукции. М.: Анахарсис, 2002. -303 с: ил..
13. ГОСТ 24642-81. Допуски формы и расположения поверхностей. Термины и определения.
14. Е.И. Яблочников, В.И. Молочник, Ю.Н. Фомина, А.А. Саломатина, В.С. Гусельников Методы управления жизненным циклом приборов и систем в расширенных предприятиях / Учебное пособие – СПб: СПбГУИТМО, 2008. – 148 с.
15. Афанасьев М.Я., Грибовский А.А., Куликов Д.Д., Падун Б.С., Яблочников Е.И. ИПИ-технологии в приборостроении. Учебно-методическое пособие – СПб: Университет ИТМО, 2014. – 149с
16. Грибовский А.А., Пирогов А.В., Алёшина Е.Е. Использование технологии оптического сканирования при подготовке производства новых изделий // Известия вузов. Приборостроение. 2010 Том 53, выпуск №8 С. 60–64.

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

---

## **КАФЕДРА ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

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

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

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

В настоящее время кафедра осуществляет выпуск бакалавров и магистров по направлениям подготовки 200100 «Приборостроение» и 230100 «Информатика и вычислительная техника».

Грибовский Андрей Александрович  
Грибовская Анна Алексеевна

## **Технологии быстрого производства в приборостроении**

**Учебное пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н. Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж 50 экз.

Отпечатано на ризографе