

В. А. Шустова, М. А. Шустов

ПРИМЕНЕНИЕ 3D-ТЕХНОЛОГИЙ В ОРТОПЕДИЧЕСКОЙ СТОМАТОЛОГИИ



Санкт-Петербург
СпецЛит

В. А. Шустова, М. А. Шустов

ПРИМЕНЕНИЕ 3D-ТЕХНОЛОГИЙ В ОРТОПЕДИЧЕСКОЙ СТОМАТОЛОГИИ

*Утверждено и рекомендовано к печати
Центральным методическим советом ГБОУ ВПО СибГМУ Минздрава России
(протокол № 4 от 28 ноября 2014 г.)*

Санкт-Петербург
СпецЛит
2016

Авторы:

Шустова Валентина Алексеевна — кандидат медицинских наук, ассистент кафедры стоматологии лечебного факультета Сибирского государственного медицинского университета, г. Томск. Автор 14 печатных работ, в числе которых одна монография и два изобретения;

Шустов Михаил Анатольевич — доктор технических наук. Работал главным редактором журнала «Известия Томского политехнического университета» от Издательства ТПУ (2003–2012 гг.). С сентября 2008 г. по октябрь 2013 г. — профессор кафедры теоретической и прикладной механики Института физики высоких технологий Томского политехнического университета. Автор 494 печатных работ, среди которых 15 монографий и два сборника (в соавторстве), 18 изобретений.

Рецензенты:

Н. А. Молчанов — д-р мед. наук, профессор Научно-практического центра «Стоматология», г. Томск;

А. А. Клопотов — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры прикладной механики и материаловедения ФГБОУ ВПО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск.

Шустова В. А., Шустов М. А.

Ш97 Применение 3D-технологий в ортопедической стоматологии / В. А. Шустова, М. А. Шустов. — Санкт-Петербург : СпецЛит, 2016. — 159 с.

ISBN 978-5-299-00772-5

В издании рассмотрены современные прогрессивные методы получения зубных протезов с использованием 3D-технологий. Подробно и систематически изложены технические и методические сведения, необходимые для освоения и последующего применения технологии трехмерной печати зубных протезов в практике стоматологических клиник и стоматологических научно-практических центров. Процесс зубопротезирования с применением 3D-технологий сводится к бесконтактному созданию объемной копии полости рта пациента (сканированию), компьютерному моделированию будущего зубного протеза и последующей 3D-печати самого протеза. Процесс протезирования занимает считанные часы. В монографии подробно рассмотрена классификация методов 3D-печати, их достоинства и недостатки, особенности практического применения. Приведен анализ свойств и характеристик основных и вспомогательных расходных материалов для трехмерной печати. Дана классификация и развернутая характеристика технических средств, применяемых для получения трехмерного изображения полости рта пациента (томографов, сканеров и т. п.). Описаны технологии формирования 3D-объектов с использованием фрезерно-станочных технологий, установок газовой, плазменной, гидроабразивной, лазерной резки исходного материала. Систематизированы сведения по средствам отображения и принтерам для 3D-печати. Подробно рассмотрены вопросы программного сопровождения процесса 3D-печати, пакеты прикладных программ. Изложены в примерах процессы автоматизированной организации работ для изготовления зубных протезов, а также практические приемы применения 3D-печати в ортопедической стоматологии.

Монография предназначена для специалистов в области ортопедической стоматологии, интересующихся технологией 3D-протезирования.

УДК 616.314-089.23:004.358

© Шустова В. А., Шустов М. А., 2016

© ООО «Издательство „СпецЛит“», 2016

ISBN 978-5-299-00772-5

СОДЕРЖАНИЕ

Условные сокращения	5
Введение	7
ЭКСКУРС В ИСТОРИЮ ПОЯВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ 3D-ПЕЧАТИ	8
Метод селективного лазерного спекания или лазерной 3D-печати	12
Моделирование методом послойного наплавления или струйной 3D-печати	14
Современные технологии 3D-печати	16
МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБНЫХ ПРОТЕЗОВ ПО 3D-ТЕХНОЛОГИЯМ	30
Основные расходные материалы	30
Вспомогательные расходные материалы	42
ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ 3D-МОДЕЛИ ПОЛОСТИ РТА	44
Применение магнитно-резонансных томографов в стоматологии	44
Компьютерные томографы с конусообразным лучом	47
Волнометрическая система 3D-визуализации i-CAT FLX	63
3D-сканеры оптического диапазона	64
ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ 3D-ОБЪЕКТОВ	90
Фрезеровально-станочные технологии 3D-печати	90
Установки газовой и плазменной резки с числовым програм- мным управлением	96
Установки гидроабразивной резки с числовым програм- мным управлением	97
Лазерно-станочные технологии 3D-печати	98
УСТРОЙСТВА ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ПЕЧАТИ 3D-ОБЪЕКТОВ ...	100
3D-мониторы	100
3D-принтеры	112
ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ 3D-ТЕХНОЛОГИЙ	130
Системы автоматизированного проектирования	130
Системы автоматизированного производства	131
Пакеты программ для создания 3D-графики	132
CAD/CAM-системы стоматологического применения	136

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ 3D-ОРТОПЕДИЧЕСКОЙ СТОМАТОЛОГИИ	142
Схема автоматизированной организации работ для изготов- ления зубных протезов	143
Компьютерная технология CEREC	148
Практические способы применения 3D-печати в ортопедичес- кой стоматологии	151
Заключение	153
Литература	154
Дополнительная литература	158
Ссылки на видеофайлы, в которых демонстрируется про- цесс создания зубных протезов с применением 3D-технологий	158

УСЛОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

3D (3-Dimension (printing))	— трехмерная (печать)
3DP (Plaster-based 3D printing)	— технология послойного распределения клеящего вещества по гипсовому порошку
ABSА	— акрилонитрилбутадиенстирол
BPA (Binding powder by adhesives)	— технология склеивания порошков
CAD (Computer-Aided Design)	— система автоматизированного проектирования
CAM (Computer-Aided manufacturing)	— система автоматизированного производства
CC (Contour Crafting)	— контурное изготовление
DMLS (Direct Metal Laser Sintering)	— селективное лазерное спекание порошковых материалов
CSG (Constructive Solid Geometry)	— конструктивная блочная геометрия
DODJet (Drop-on-Demand Jet)	— моделирование методом напыления с последующим фрезированием слоя
EBM (Electron Beam Melting)	— электронно-лучевая плавка
FDM (Fused Deposition Modeling)	— моделирование методом послойного наплавления
HDMI (High Definition Multimedia Interface)	— интерфейс для мультимедиа высокой четкости
HDPE, PE-HD (High Density Polyethylene)	— полиэтилен низкого давления или полиэтилен высокой плотности
LOM (Laminated Object Manufacturing)	— ламинирование листовых материалов
MJM (Multi-Jet Modeling)	— метод многоструйного моделирования
Nylon	— нейлон
PC	— поликарбонаты
PCL	— поликапролактон
PETF, PET	— полиэтилентерефталат (ПЭТФ, ПЭТ)
PJET (Poly Jet)	— полиструйная технология

PLA	— полилактид
PP	— полипропилен
PPSU	— полифенилсульфон
PVA	— поливинилацетат
SGC (Solid Ground Curing)	— метод послойного уплотнения
SLA (Stereolithography Apparatus, Laser Stereolithography)	— лазерная стереолитография
SLM (Direct Metal Selective Laser Melting)	— прямое лазерное спекание металла
SLS (Selective Laser Sintering)	— селективное лазерное спекание порошковых материалов
UHDTV (Ultra High Definition Television)	— телевидение сверхвысокой четкости
ЖК	— жидкокристаллический
КЛКТ	— конусно-лучевая компьютерная томография
КТ	— компьютерная (осевая) томография
МРТ	— магнитно-резонансная томография
ПММА	— полиметилметакрилат
САПР	— система автоматизированного проектирования
ЧПУ	— числовое программное управление

ВВЕДЕНИЕ

Развитие научно-технической революции, происходящее на глазах современного поколения, позволяет использовать и внедрять в повседневную жизнь людей передовые технологии, которые были совершенно немыслимы еще какие-либо четверть века назад. Научно-технический прогресс наблюдается и в области ортопедической стоматологии. Еще недавно для того, чтобы отреставрировать поврежденный зуб, поставить или отремонтировать зубной протез, требовались недели напряженного ювелирного труда коллектива стоматологов, зубных техников, обслуживающего персонала, многочисленные визиты пациента.

Сегодня подобные задачи решаются легко и быстро за счет применения современных 3D-технологий. Весь процесс протезирования сводится к бесконтактному получению объемной копии полости рта пациента (сканированию), последующему компьютерному моделированию будущего зубного протеза и собственно 3D-синтезу самого протеза. Сам процесс протезирования занимает считанные часы. Стоит ли говорить о том, что созданный таким образом зубной протез идеальным образом вписывается в полость рта пациента и, соответственно, не доставляет ему каких-либо неудобств, связанных с привыканием к «инородному» телу.

Таким образом, использование 3D-технологий в ортопедической стоматологии имеет следующие преимущества:

- процесс изготовления протезов полностью автоматизирован и сводит участие человека-оператора к минимуму;
- готовые протезы полностью учитывают сугубо индивидуальные анатомические особенности строения полости рта пациента;
- возможно принимать или передавать по электронной почте заказы на изготовление зубных протезов, оперативно восстанавливать утраченный или поврежденный зубной протез даже при нахождении пациента в другом городе или стране;
- заметно возрастает производительность зубопротезной лаборатории при одновременном сокращении сроков изготовления и установки протезов.

Настоящая монография посвящена изложению технических и методических сведений, характеризующих процесс создания зубных протезов с использованием 3D-технологий.

Впервые монография была издана на базе лаборатории оперативной полиграфии Сибирского государственного медицинского университета, г. Томск, в 2015 г.

ЭККУРС В ИСТОРИЮ ПОЯВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ 3D-ПЕЧАТИ

Трехмерная печать (3D-печать, 3-Dimension printing) – это уже далеко не научная фантастика, а вполне рутинный метод, широко применяемый в промышленном моделировании [1]. Когда-то компьютеры перешли из стен крупнейших лабораторий практически в каждый дом. Теперь и 3D-печать движется в сторону рядового потребителя.

Создание объемных объектов за счет использования механизмов – процесс не новый, вероятно, первые попытки получения подобным образом 3D-фигур можно отнести к временам появления стереофотографических снимков. Проблема заключалась в том, что тогда возможности вычислительной техники были малы; лазеров, многих технологий, которые кажутся нам обыденными сегодня, тоже не было.

Тем не менее попытки создания трехмерных конструкций были описаны в перечисленных ниже патентах США (табл. 1) и ряде других публикаций.

Таблица 1

Перечень ранних патентов США в области создания трехмерных конструкций

Номер патента	Название патента	Автор(ы)	Дата приоритета	Дата публикации
1382978	Photosculture	Hopkins Marcus C.	18 октября 1919 г.	28 июня 1921 г.
3085923	Recording and reproducing the shape of three-dimensional objects	Agnew Kenneth L.	3 июня 1960 г.	16 апреля 1963 г.
3244065	Camera apparatus for producing a plane pictorial representation of a three dimensional surface	Lemelson Jerome H.	31 января 1962 г.	5 апреля 1966 г.
3246570	Automatic photomechanical equipment for preparing sculptures	Miklos Nogradi, Zoltan Nogradi	5 января 1965 г.	19 апреля 1966 г.

Номер патента	Название патента	Автор(ы)	Дата приоритета	Дата публикации
3338766	Recording and reproducing the shape of three-dimensional objects by contour lines	Leslie Agnew Kenneth	22 июля 1964 г.	29 августа 1967 г.
3796129	Apparatus for the manufacture of three-dimensional reproduction of an object	Cruickshank J.	12 марта 1974 г.	25 сентября 1970 г.
3988520	Three dimensional image reproduction	Marlene A. Riddle	6 октября 1975 г.	26 октября 1976 г.

С появлением первых, пусть далеко не совершенных компьютеров, прогресс в области способов и устройств создания трехмерных моделей заметно ускорился. Так, например, с помощью робота, управляемого компьютером, в компании Cincinnati Milicron было создано оборудование для фрезерования металлических деталей заданной объемной конфигурации.

В качестве другого примера использования компьютеризированных механических операций, подобие которых применяется в современных технологиях 3D-печати, упомянем метод программированного послойного нанесения слоев покрытий при помощи управляемого компьютером пистолета-распылителя.

Метод создания 3D-модели путем лазерного спекания слоев был запатентован Р. Ф. Хаусхолдером (Ross F. Housholder), г. Арлингтон, Техас, еще в 1979 г. (Патент США № 4247508 «Molding process» от 27 января 1981 г. с датой приоритета 3 декабря 1979 г.). Патент оказался не востребован и не получил последующего развития и распространения.

Второго июля 1984 г. Уильям Мастерс (William E. Masters) подал заявку на патент под названием «Компьютерный автоматизированный производственный процесс и система» (Computer automated manufacturing process and system), в которой предложил способ и устройство для автоматического воспроизведения физического трехмерного изделия из твердых частиц. Двенадцатого мая 1987 г. патент США № 4665492 был получен, но и он остался вне поля зрения общественности.

Первые практически осуществимые применения технологии 3D-печати относятся к 1980-м гг. Тогда трехмерные принтеры были

громоздкими и чрезвычайно дорогими, а область их использования — весьма ограниченной, да и самого термина — 3D-печать — тогда еще не существовало.

Родоначальником современных установок по формированию 3D-объектов считают сотрудника калифорнийской компании Ultra Violet Products Чарльза Халла (Charles W. Hull), который в 1984 г. разработал технологию изготовления твердотельных трехмерных объектов на основе компьютерных данных, а 11 марта 1986 г. получил патент на первую в мире установку стереолитографии (патент США № 4575330, дата приоритета 8 августа 1984 г.).

Конечно, эта установка была далека от того, чтобы называться 3D-принтером, но основные идеи послойного создания объемных фигур были заложены именно в ней.

Ч. Халл занимался разработкой полимерных покрытий, затвердевающих под действием ультрафиолетового света [2]. В экспериментах по регулированию толщин покрытий путем наложения слоев полимера с разными очертаниями друг на друга он показал, что таким образом можно получать трехмерные объекты. Очертания слоев создавались за счет передвижения лазерного луча, сфокусированного на поверхности жидкого полимера, по заданному контуру. В местах, где луч проходил, оставались линии затвердевшего материала (рис. 1, порядок создания трехмерного объекта обозначен на рисунке цифрами 1–4) [2].

В том же году Ч. Халл основал компанию 3D-Systems и разработал первый коммерческий 3D-прибор, названный стереолитографическим аппаратом (Stereolithography Apparatus или SLA). Название происходит от слова «литография», которое в переводе с древнегреческого означает «камень» («λίθος») и «пишу» («γράφω»). В 1988 г. была разработана усовершенствованная модель аппарата для стереолитографии SLA-250, она стала первой серийной машиной для широкого круга пользователей.

В 1985 г. Михаил Фейген (Michael Feygin), бывший одессит, выпускник механического факультета Московского технологического института пищевой промышленности, эмигрировавший в 1978 г. в США, предложил альтернативный метод получения объемных фигур. Наименование метода — технология ламинирования или послойного формирования объемных моделей из листового материала (Laminated Object Manufacturing или LOM). Патент США № 4752352 на аппаратуру и метод формирования трехмерных объектов ламинированием М. Фейген получил 21 июня 1988 г. Сама заявка имеет дату приоритета 6 июня 1986 г. В соответствии с этой технологией из тонких пленок вырезаются слои, которые соединяются в готовый объект под действием нагрева или давления.

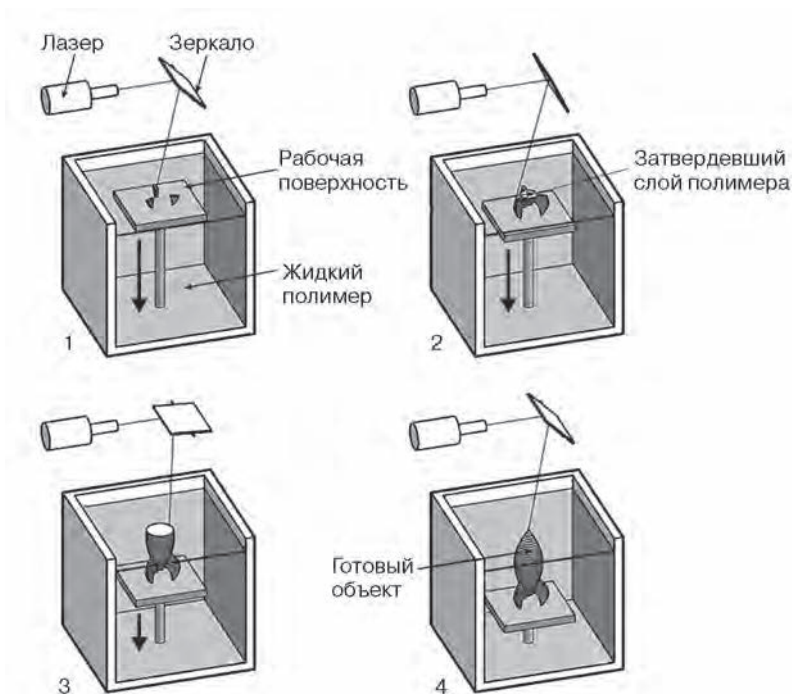


Рис. 1. Принцип работы установки для стереолитографии (пояснения даны в тексте)

На основе технологии ламинирования компания Helisis (1985–2000 гг.), созданная М. Фейгенем, ее преемник — компания Cubic Technologies (США), а также ряд других компаний — Solido3Da, Paradigm и Sparx AB — производят промышленные установки. Раскрой происходит по заданному контуру резкой листового материала сфокусированным лучом CO_2 -лазера. Заготовкой могут служить пластик, керамика, бумага и другие недорогие материалы. Для склеивания слоев используют подогреваемый валик. Полученные модели имеют минимальные деформации, поскольку тепловое воздействие на материал происходит лишь в узкой зоне фокусировки лазерного луча.

К концу 1988 г. технологии 3D-копирования получили дальнейшее развитие, сформировались и окрепли технологии: **метод селективного лазерного спекания (Selective Laser Sintering (SLS))** и **моделирование методом послойного наплавления (Fused Deposition Modeling (FDM))** [3].

Метод селективного лазерного спекания или лазерной 3D-печати

В самом начале 80-х гг. прошлого века в Техасском университете, г. Остин (США), доцент, а затем профессор Джозеф Биман (Joseph J. Beaman) и студент-магистрант Карл Декард (Carl R. Decard) при содействии и поддержке Агентства передовых оборонных исследовательских проектов, Национального научного фонда США и Остинского машиностроительного департамента Техасского университета разработали технологию селективного лазерного спекания материалов (Selective Laser Sintering, или SLS) [4].

Для выполнения работ они использовали лазер мощностью 2 Вт, сканер, а также примитивный 8-битный компьютер Commodore с ОЗУ 4 кб и процессором на частоту 1 МГц. Для регулирования мощности лазерного луча К. Декард составил на Бейсике собственную программу синхронизации компьютера и источника питания лазера. В мае 1986 г. Декард получил степень магистра и остался в университете в качестве аспиранта.

Патент США № 4863538 с приоритетом от 17 октября 1986 г. на данную технологию был получен Карлом Декардом 5 сентября 1989 г.

Спустя некоторое время Карл Декард и Джозеф Биман решили основать собственную компанию, которая должна была разработать дизайн и начать производить SLS-устройства. SLS, или выборочное лазерное спекание, — метод аддитивного производства, используемый для создания функциональных прототипов и мелких партий готовых изделий. Технология основана на последовательном спекании слоев порошкового материала с помощью лазеров высокой мощности.

Лазерное спекание похоже по своему принципу на стереолитографию, но вместо жидкого полимера луч лазера направлен на поверхность с равномерно распределенным слоем пластиковой пудры, и по ходу движения он превращает пудру в твердый пластик (рис. 2, порядок создания трехмерного объекта обозначен на рисунке цифрами 1—6) [3].

Важное достоинство данного метода в том, что пудра может быть не только пластиковая, но и, например, металлическая.

В 1988 г. компании Nova Automation, основанной для внедрения метода, удалось найти инвестора в лице Goodrich Corp. В этом же году Nova Automation была переименована в DTM Corp. В 1992 г. компания DTM выпустила на рынок станок, работающий по технологии селективного лазерного спекания. В этом же году компания приобрела у Nico Western Products Co. права на использование технологии построения объекта с помощью песка и цемента — она была необходима DTM для выхода и удержания позиций на рынке. DTM удалось создать несколько моделей SLS-устройств; компания Goodrich Corp. продолжила инвестировать разработки.

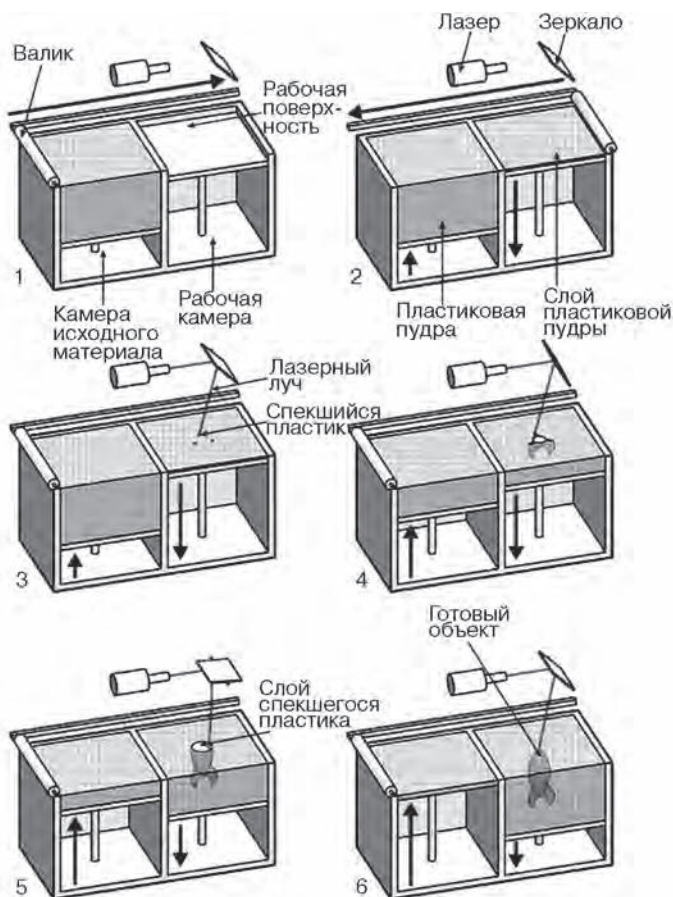


Рис. 2. Принцип работы установки для селективного лазерного спекания материалов (пояснения даны в тексте)

В 1999 г. DTM частично продала группе частных инвесторов ProActive Finance, а в 2001 г. компания была полностью выкуплена конкурирующей компанией 3D-Systems, занимавшейся разработками стереолитографии (другой технологии 3D-печати). Имея в своем распоряжении две технологии 3D-печати, компания 3D-Systems и теперь остается лидером-монополистом на рынке, и ее единственным конкурентом является компания Stratasys Inc., владеющая технологией струйной 3D-печати.

В феврале 2014 г. истек 25-летний срок действия патентов на лазерную технологию 3D-печати. В этой связи следует ожидать существенного расширения ассортимента и количества таких принтеров на мировом рынке при одновременном падении цен на них.

Моделирование методом послойного наплавления или струйной 3D-печати

Технология моделирования методом послойного наплавления (Fused Deposition Modeling, или FDM) была изобретена Скоттом Крампом (S. Scott Crump), который в 1988 г. запатентовал метод 3D-струйной печати [1, 3]. В 1990 г. он вместе с супругой Лизой Крамп стали авторами одного из способов 3D-печати — моделирования методом наплавления.

В следующем году Скотт и Лиза Крамп основали компанию Stratasys. В 1991 г. было налажено промышленное производство станков — FDM-принтеров. В 1992 г. компания продала свой первый станок 3D Modeler.

В конце 80-х гг. прошлого века в Китае разработали технологию Melted and Extruded Manufacturing, или MEM, напоминающую FDM, но названную по-иному в связи с требованиями патентного законодательства.

Современная история 3D-принтеров началась в 1993 г., когда была создана компания Solidscape для производства струйных принтеров — предшественников 3D-принтеров. В 1993 г. в Массачусетском технологическом институте (США) студентами Джимом Бредтом и Тимом Андерсоном была изобретена и запатентована еще одна технология 3D-печати. Она получила название «технология трехмерной печати» и была подобна технологии струйной печати, используемой в традиционных 2D-термоструйных принтерах.

Вначале технология создания трехмерных объектов называлась быстрым прототипированием. Выражение «3D-печать» было предложено Джимом Бредтом и Тимом Андерсоном в 1995 г., когда они модифицировали плоский струйный принтер так, что он выводил изображения не на бумагу, а в специальную емкость и делал их объемными.

Метод послойного наплавления создает трехмерные формы не с помощью лазерного луча, а с помощью выдавливания струи нагретого жидкого пластика (рис. 3, порядок создания трехмерного объекта обозначен на рисунке цифрами 1–4) [3].

В настоящее время моделирование методом наплавления — один из самых распространенных способов 3D-печати, тем более что патент С. Крампа прекратил действие в 2009 г.

В основе технологии лежит струйная печать, выполняемая блоком головок по порошку на гипсовой основе. Три головки такого

Z-принтера отвечают за формирование цвета будущей модели, а четвертая содержит прозрачный клей, обеспечивающий послойное склеивание частиц порошка. Эта технология широко применяется для промышленного 3D-моделирования, хотя и не лишена ряда недостатков, главный из которых — низкая прочность модели и необходимость ее обработки после изготовления.

Следующим этапом развития 3D-прототипирования стало появление в 2000 г. технологии **фотополимерной струйной печати PolyJet**. Суть ее заключается в том, что головка принтера наносит послойно слой фотополимера, который затвердевает под действием ультрафиолета. Эта технология и оборудование значительно дешевле, к тому же позволяют производить 3D-печать не только моделей, но и готовых изделий с очень высокой точностью.

Принтеры, выпускаемые под маркой PolyJet, в настоящее время наиболее доступны по цене, и их уже вполне можно отнести к обычному офисному оборудованию.

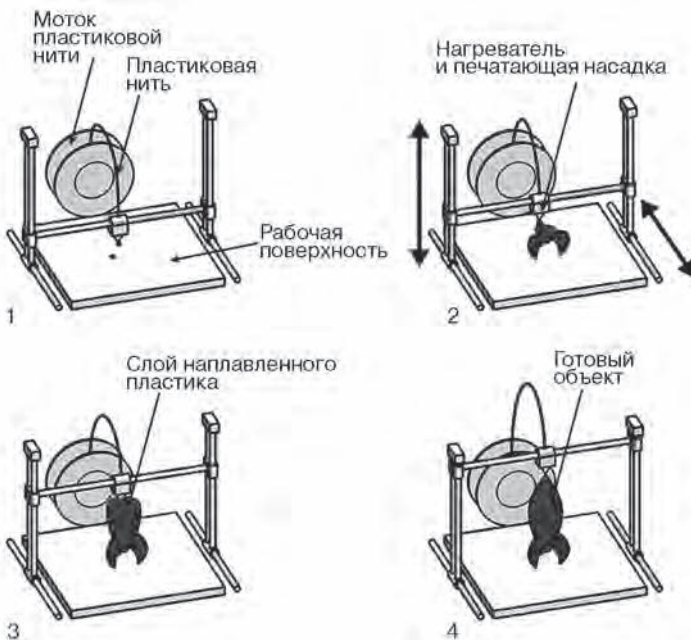


Рис. 3. Принцип работы установки для послойного наплавления пластика (пояснения даны в тексте)

В 1995 г. компания Z Corporation получила от Массачусетского технологического института патент на использование технологии и начала производство 3D-принтеров на базе ZDP-технологий. Теперь патент на это изобретение используется компаниями Z Corporation (создана Дж. Бредтом и Т. Андерсоном) и ExOne. Эта технология используется и сегодня в 3D-принтерах ZCorp.

Современные технологии 3D-печати

Технологии 3D-печати развиваются стремительно, появляются новые разновидности описанных выше методов 3D-печати и новые модели принтеров. К ним относятся 3D-принтеры, печатающие объемный предмет путем послойного наплавления полимера по цифровой 3D-модели.

3D-печать может осуществляться разными способами и с использованием различных материалов, но в основе любого из них лежит принцип послойного создания (выращивания) твердого объекта.

Подобно тому как на обычном принтере можно распечатать листы бумаги с разными текстами, с помощью 3D-принтера можно получить предметы самой различной формы с высокой точностью, задав индивидуальные параметры объекта.

Для изготовления предметов могут использоваться различные материалы, например, высокопрочные термостойкие пластмассы. Теоретически с помощью 3D-принтера можно напечатать любой предмет. Никаких геометрических ограничений для 3D-печати не существует.

С помощью 3D-печати можно изготовить и элементы протеза, необходимые для использования в ортопедии или стоматологии. Так, 83-летней женщине из Голландии в начале 2012 г. вместо челюсти, разрушенной раком, имплантировали титановую челюсть, целиком отпечатанную на 3D-принтере.

Уже сейчас можно получить четкую копию, например, человеческого черепа. Исходный объект послойно сканируется, затем «переводится» на язык многоугольников, и с помощью 3D-принтера его воссоздают с заданной точностью.

С технологией действия 3D-принтеров в РФ можно ознакомиться, например, в лаборатории персонального цифрового производства (FabLab – Fabrication Laboratory – «фабрика-лаборатория»). Первая в мире FabLab появилась в Массачусетском технологическом университете (MIT, США) в конце XX в., ее создателем стал профессор Нил Гершенфельд. Первая такая лаборатория в России появилась в Москве, в НИТУ МИСиС, при участии MIT и Российской венчурной компании.

В настоящее время наибольшее распространение получили следующие технологии 3D-печати: стереолитография, лазерное спекание порошковых материалов, послойная печать расплавленной полимерной нитью, технология струйного моделирования, технология склеивания порошков, ламинирование листовых материалов и УФ-облучение через фотомаску [5, 6].

Лазерная стереолитография

При лазерной стереолитографии (Laser Stereolithography, Stereolithography Apparatus, или SLA) используется в качестве модельного материала специальный фотополимер — светочувствительная смола.

Технология SLA состоит в следующем: сканирующая система направляет на фотополимер лазерный ультрафиолетовый луч (или ультрафиолетовое излучение ртутно-кварцевых ламп), под действием которого материал твердеет. В качестве фотополимера используется хрупкий и твердый полупрозрачный материал, который коробится под действием атмосферной влаги. Материал легко склеивается, обрабатывается и окрашивается. Рабочий стол находится в емкости с фотополимерной композицией. После прохождения лазерного луча и отверждения очередного слоя его рабочая поверхность смещается вниз на 0,025—0,300 мм, объект погружается в фотополимер на толщину одного слоя, чтобы лазер мог приступить к формированию следующего слоя (рис. 4). Процесс повторяется до завершения построения модели [3].

Стереолитография — наиболее популярная RP-технология для получения высокоточных моделей. Она охватывает практически все отрасли материального производства от медицины до тяжелого машиностроения. SLA-технология позволяет быстро и точно построить модель изделия практически любых размеров. Качество поверхностей зависит от шага построения. Современные машины обеспечивают шаг построения 0,025—0,150 мм.

Стереолитография благодаря низкой себестоимости готовых изделий получила наибольшее распространение среди технологий 3D-печати. SLA-технология дает наилучший результат при изготовлении мастер-моделей для последующего изготовления силиконовых форм и литья в них полимерных смол, а также используется для выращивания ювелирных мастер-моделей.

Оборудование для SLA-печати изготавливают компании F&S Stereolithographietechnik GmbH, 3DSystem, а также Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН.

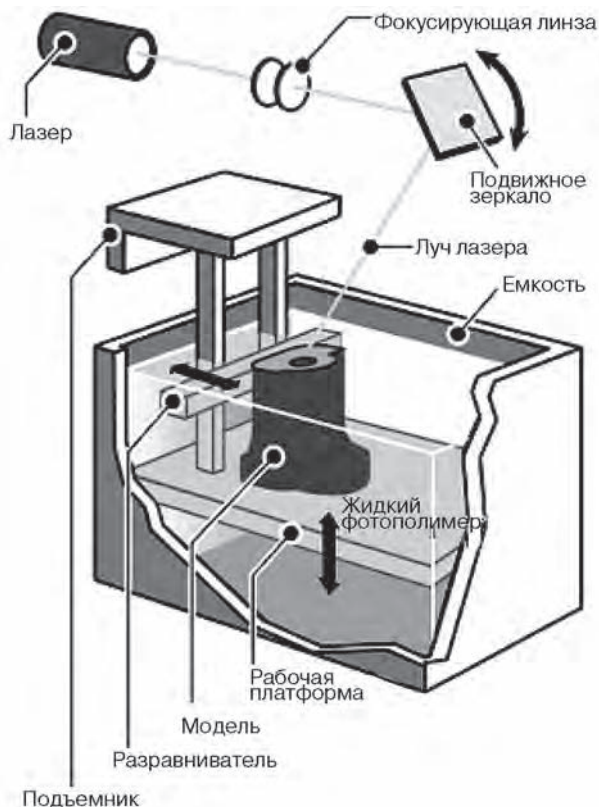


Рис. 4. Оборудование для печати по SLA-технологии

Селективное лазерное спекание порошковых материалов

Селективное лазерное спекание порошковых материалов (Selective Laser Sintering, или SLS, также Direct Metal Laser sintering, или DMLS) является единственной технологией 3D-печати, которую можно использовать для изготовления металлических формообразующих для металлического и пластмассового литья [7]. Пластмассовые прототипы обладают хорошими механическими свойствами.

В технологии SLS модели создаются из порошковых материалов в результате эффекта спекания за счет энергии лазерного луча. В от-

личие от SLA-процесса, лазерный луч является источником не оптического излучения, а источником тепловой энергии. Попадая на тонкий слой порошка, лазерный луч спекает его частицы и формирует твердую массу в соответствии с геометрией детали. В качестве материалов используются полиамид, полистирол, песок, керамика и порошки ряда легкоплавких металлов или их сплавов. Плавкие порошковые материалы наносят на поверхность рабочего стола выравнивающим валиком и запекают лазерным лучом в твердый слой, соответствующий сечению 3D-модели и определяющий ее геометрию (рис. 5) [3].

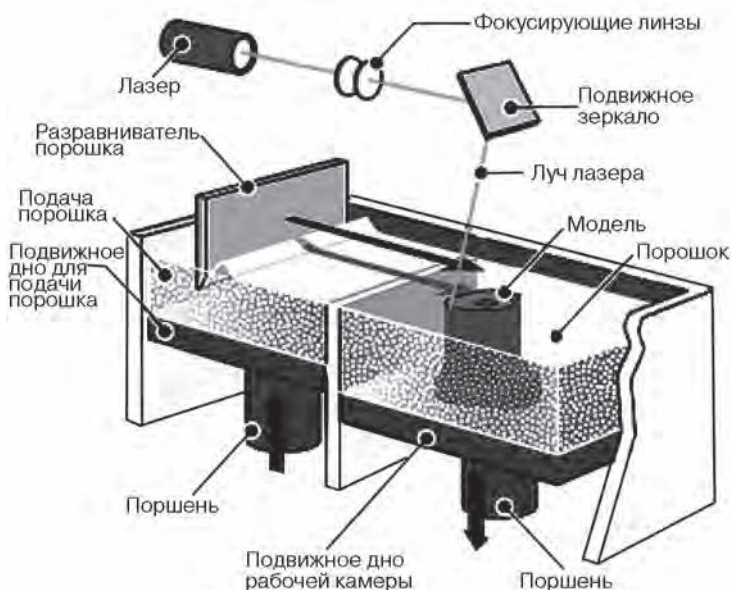


Рис. 5. Оборудование для печати по SLS-технологии

После формирования первого слоя платформу опускают на толщину слоя, и на нее вновь наносят порошкообразный материал. Для уменьшения энергии, необходимой для спекания, температура рабочей камеры поддерживается на уровне чуть ниже точки плавления рабочего материала. Для избежания окисления процесс проходит в бескислородной среде.

Существенным преимуществом SLS-процесса является отсутствие так называемых поддержек при построении модели. В процессах SLA

и MJM (Multi-Jet Modeling) при построении нависающих элементов детали используются специальные поддержки, предохраняющие свежестроенные тонкие слои модели от обрушения. В SLS-процессе в таких поддержках нет необходимости, поскольку построение ведется в однородной массе порошка. После построения модель извлекается из массива порошка и очищается.

Прямое лазерное спекание металла (Direct Metal Selective Laser Melting, SLM) — разновидность технологии SLS. Материалом выступают металлы и сплавы в виде порошка. Для печати доступны следующие металлы и сплавы: сталь, нержавеющая сталь, инструментальная сталь, алюминий, сплав кобальт-хром, титан.

Электронно-лучевая плавка (Electron Beam Melting, EBM) является модификацией SLS. Позволяет получать прототипы из металлического порошка за счет его послойного плавления. Плавка расходного материала происходит в вакууме с помощью электронного луча. Модели, «напечатанные» по такой технологии, получаются прочными и долговечными.

Электронно-лучевая плавка аналогична технологиям SLS/DMLS, но объект формируется путем плавления металлического порошка электронным лучом в вакууме.

Оборудование для SLS-печати изготавливают компании 3D Systems, F&S Stereolithographie GmbH, The ExOne Company/Prometal, EOS GmbH.

Послойная печать расплавленной нитью

Послойная печать расплавленной нитью (Fused Deposition Modeling, или FDM), или **моделирование методом наплавления**, применяется для получения единичных изделий, приближенных по своим свойствам к серийным, а также для изготовления выплавляемых форм для литья металлов (рис. 6) [3].

Технология FDM-печати заключается в следующем: головка-экструдер с контролируемой температурой разогревает до полужидкого состояния нити из плавкого термопластичного моделирующего материала (ABS-пластика, воска, легкоплавкого металлического порошка или поликарбоната) и с высокой точностью выдавливает полученную нить расплава тонкими слоями на холодную рабочую поверхность 3D-принтера.

Большая разница температур способствует быстрому застыванию слоя нового объекта. После полного затвердевания первого контура головка наносит на платформу следующий слой. Слои наносятся друг на друга, соединяются между собой и отвердевают, постепенно формируя готовое изделие.

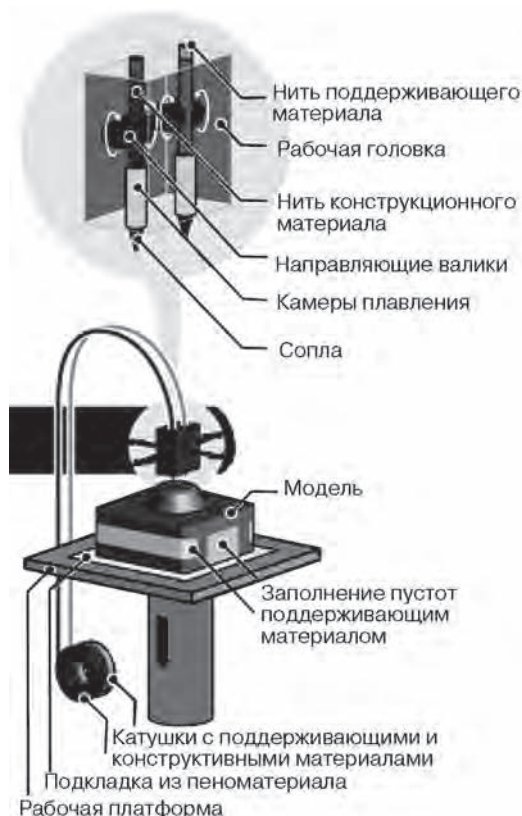


Рис. 6. Оборудование для печати по FDM-технологии

Часто в данной технологии участвуют две рабочие головки: одна выдавливает на платформу рабочий материал, другая — материал поддержки.

Достоинства технологии FDM 3D-печати:

- скорость и простота изготовления моделей;
- безопасность технологий;
- экологическая чистота и нетоксичность моделирующих материалов;
- точность моделирования;
- простота использования и обслуживания;
- прочность деталей;
- простота утилизации.

В то же время данная технология не лишена недостатков: между слоями образуются швы; головка экструдера должна постоянно двигаться, иначе материал застынет и засорит ее; возможно расслоение в случае температурных колебаний в течение цикла обработки.

В настоящее время 3D-принтеры с технологией FDM-печати изготавливаются компанией Stratasys Inc.

Технология струйного моделирования

Технология струйного моделирования, или Ink Jet Modelling, имеет следующие запатентованные подвиды: 3D Systems (Multi-Jet Modeling, или MJM), PolyJet (Objet Geometries) и Solidscape (Drop-on-Demand Jet, или DODJet).

Перечисленные технологии основаны на одном принципе, но каждая имеет свои особенности. Для печати используются поддерживающие и моделирующие материалы. К числу поддерживающих материалов чаще всего относят воск, а к числу моделирующих — широкий спектр материалов, близких по своим свойствам к конструкционным термопластам. Печатающая головка 3D-принтера наносит поддерживающий и моделирующий материалы на рабочую поверхность, после чего производится их фотополимеризация и механическое выравнивание (рис. 7) [3].

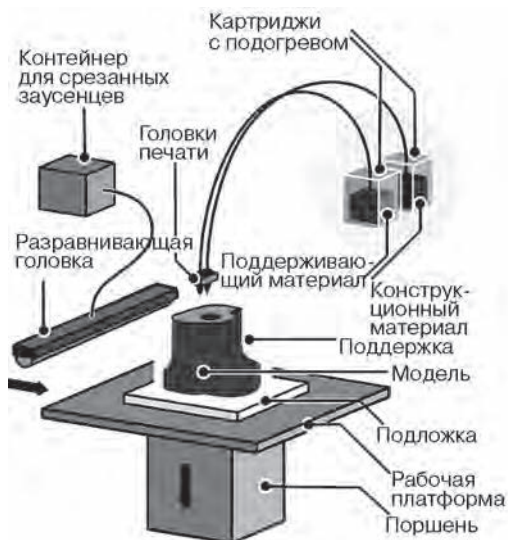


Рис. 7. Оборудование для печати по технологии струйного моделирования

Технология струйного моделирования позволяет получить окрашенные и прозрачные модели с различными механическими свойствами, это могут быть как мягкие, резиноподобные, изделия, так и твердые, похожие на пластики.

Принтеры для 3D-печати с использованием технологии струйного моделирования изготавливают следующие компании: Solidscape Inc, Objet Geometries Ltd, 3D Systems.

Технология склеивания порошков

Технология склеивания порошков (Binding powder by adhesives) позволяет не только создавать объемные модели, но и раскрашивать их.

Принтеры с технологией Binding powder by adhesives используют крахмально-целлюлозный порошок, из которого формируется модель, и жидкий клей на водной основе, проклеивающий слои порошка. Клей поступает из печатающей головки 3D-принтера, связывая между собой частицы порошка и формируя контур модели. После завершения печати излишки порошка удаляются. Чтобы придать модели дополнительную прочность, ее пустоты заливаются жидким воском (рис. 8) [3].

Последовательность рабочих процедур отображена на рис. 8: 1–2 – ролик наносит тонкий слой порошка на рабочую поверхность; 3 – струйная печатающая головка печатает каплями связующей жидкости на слое порошка, локально укрепляя часть сплошного сечения; 4 – процесс 1–3 повторяется для каждого слоя до готовности модели, оставшийся порошок удаляется.

В настоящее время 3D-принтеры, работающие по технологии склеивания порошков, изготавливает компания Z Corporation.

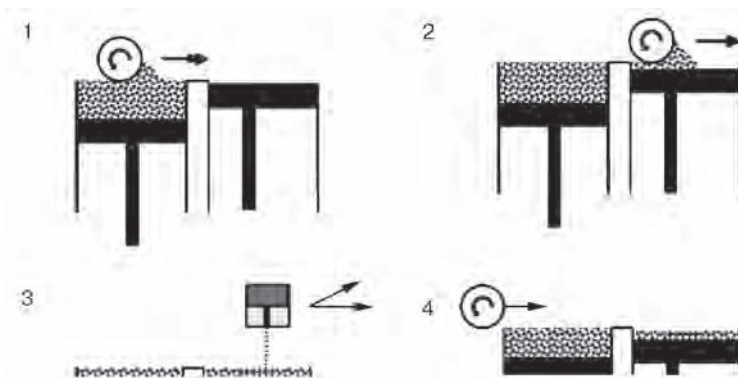


Рис. 8. 3D-печать по технологии склеивания порошков (пояснения даны в тексте)

Ламинирование листовых материалов

Ламинирование листовых материалов (Laminated Object Manufacturing, или LOM) предполагает изготовление 3D-моделей из тонких слоев полимерной пленки или бумажных листов при помощи ламинирования.

Объект формируется послойным склеиванием (нагревом, давлением) тонких пленок рабочего материала, с вырезанием (с помощью лазерного луча или режущего инструмента) соответствующих контуров на каждом слое. Готовые формы слоев размещаются в установленном порядке и склеиваются. Послойное соединение производится при помощи локального нагрева, прессовки под давлением или склеивания. За счет отсутствия пустот данная технология не нуждается в поддерживающих структурах «висящих в воздухе» элементов разрабатываемого объекта, но удаление лишнего материала (обычно его режут на небольшие квадратики) иногда может вызывать затруднения. Структура готового изделия похожа на древесную, изделие боится влаги (рис. 9) [3].

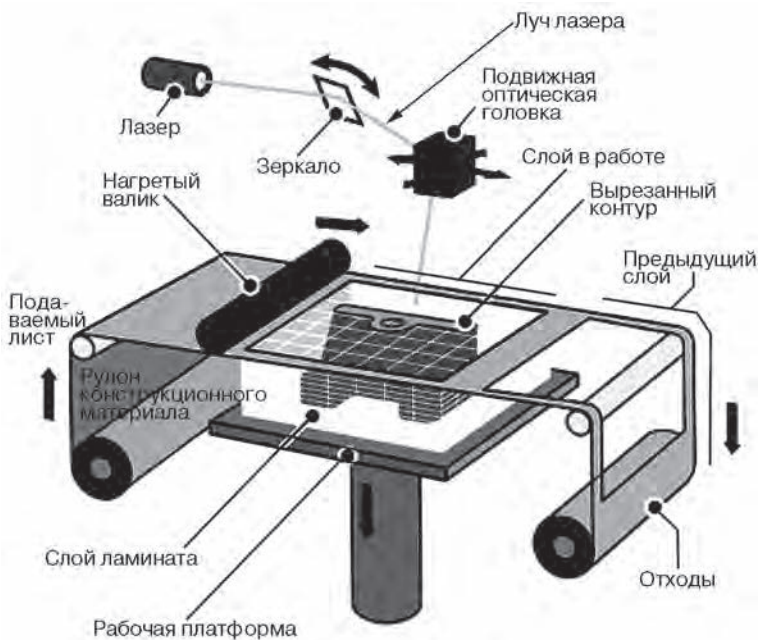


Рис. 9. Оборудование для печати по технологии ламинирования листовых материалов

До последнего времени 3D-принтеры для ламинирования листовых материалов производила компания Helisys Inc, сейчас выпуск такого оборудования прекращен.

Моделирование методом послойного уплотнения

Метод послойного уплотнения (Solid Ground Curing, или SGC) путем облучения слоя фотополимера ультрафиолетом через фотомаску был разработан в Израиле [9, 10].

Послойное уплотнение имеет сходства с фотокопией. При помощи тонера на заряженной стеклянной пластине формируется изображение слоя — фотошаблон основания модели. Шаблон должен находиться над тонким слоем фотополимера, который распределен по поверхности стола. Далее происходит кратковременное экспонирование ультрафиолетовой лампой. В результате облучения слой смолы-фотополимера твердеет. Неотвердевшая (необлученная) смола удаляется вакуумированием. Полости готового изделия заполняются расплавленным воском, который быстро затвердевает и служит для поддержки следующих слоев.

Полученный слой фрезеруется для получения гладкой поверхности и одинаковой высоты слоя. Далее деталь повторно облучают для окончательного формирования слоя. Затем процесс повторяется: создается фотошаблон для очередного слоя-сечения, по рабочему столу распределяется новый слой жидкой смолы-фотополимера и т. д. (рис. 10) [3].

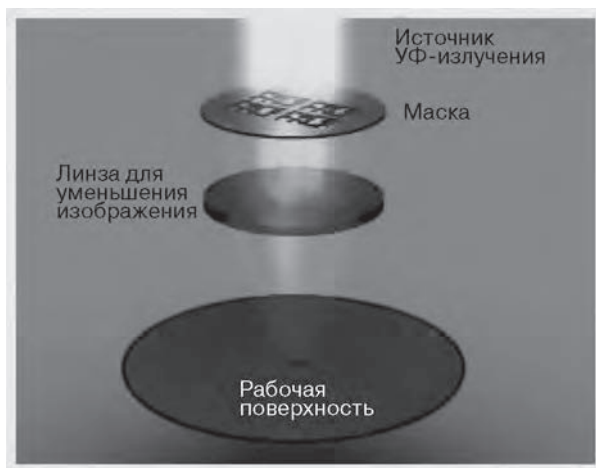


Рис. 10. Оборудование для печати по технологии облучения ультрафиолетом через маску

SGC-технология имеет немало преимуществ: синтез моделей происходит без подпорок, отпадает необходимость в дальнейшей обработке. Можно на время приостановить процесс, например для устранения дефектов.

Основным провайдером технологии SGC является компания Cubital, выпускающая установки Solider 5600 и Solider 4600. Точность построения – 0,084 мм, скорость построения – 70 и 120 с/слой, толщина слоя – 0,1–0,2 мм.

Компания Cubital была основана в 1987. Первая SGC-система была установлена в США в 1991 г. Ныне системы компании используются в 14 странах мира.

Полиструйная технология

Полиструйная технология (Poly Jet, или PJET) напоминает стереолитографию (SLA), поскольку модель создается из фоточувствительной смолы [10]. Полимерная смола предварительно расплавляется и поступает в струйную головку. Головка, перемещаясь вдоль горизонтальной оси, напыляет расплавленную смолу на рабочую плоскость. Толщина такого слоя составляет всего 16 мкм, что в 5 раз меньше, чем толщина слоя при стереолитографии. Облучение ультрафиолетовым светом ускоряет затвердевание полимера. Особо сложные модели печатаются с добавлением материала поддержки в виде геля, который удаляется после окончания работы при помощи воды.

Технология MJM

В основе **технологии MJM** (Multi-Jet Modeling) лежит послойное сечение модели на горизонтальные слои, которые последовательно отправляются на 3D-принтер. Каждый слой формируется печатающей головкой, которая через группы сопел выпускает на горизонтальную движущуюся платформу или расплавленный фотополимер (температура около 80 °С), или расплавленный воск. Фотополимер или воск расплавляются в системе подачи материала до того, как попадают в печатающую головку. Если 3D-печать выполняется из фотополимера, то после печати каждого слоя платформа, на которой выращен слой, отъезжает за печатающую головку под ультрафиолетовую лампу. Вспышка ультрафиолетовой лампы вызывает реакцию фотополимеризации, вследствие чего материал твердеет. Затем платформа отъезжает под печатающую головку и цикл формирования слоя повторяется. Печатающая головка образует новый слой.

Особенностями технологии MJM является возможность воспроизводить 3D-модели с высокой точностью. В процессе 3D-печати

используется материал поддержки: воск (поставляется отдельными картриджами). Если 3D-печать выполняется из фотополимера, то материал поддержки удаляется посредством высокой температуры: деталь с поддержкой помещается в печь с температурой ~60 °С. Если 3D-печать выполняется из воска, то поддержка удаляется с помощью специального раствора.

В клей можно добавлять красящие вещества, следовательно, можно получить не только объемную модель, но и разноцветную.

Контурное изготовление

Контурное изготовление (Contour Crafting, или CC) — это строительная технология. Устройство для печати больше похоже на козловой кран, у которого вместо многотонного крюка находится распыляющая бетонную смесь головка со встроенными пневматическими формователями поверхностей.

Мгновенно застывающий бетонный раствор слой за слоем наносится на основу дома. Стены, вместе с проемами, вентиляционными отверстиями, дымоходами в прямом смысле этого слова растут на глазах. На возведение полых «коробки» коттеджа площадью 100 м² уходит примерно 8 ч непрерывной работы.

Моделирование методом напыления с последующим фрезерованием слоя

При моделировании методом напыления с последующим фрезерованием слоя (Drop-on-Demand Jet, или DODJet) используется два вида материалов: модельный и материал поддержки. Печатающая головка одновременно распыляет оба типа «расходников». Затем специальная фрезеровочная головка производит охлаждение распыленного слоя и его механическую обработку.

Технология DODJet позволяет строить высокоточные модели с абсолютно гладкой поверхностью. Поскольку распыление рабочего слоя происходит за счет механически движущейся головки, то скорость изготовления прототипа во многом зависит от сложности печатной модели.

Технология послойного распределения клеящего вещества по гипсовому порошку

В технологии послойного распределения клеящего вещества по гипсовому порошку (3DP) в процессе печати печатающий блок 3D-принтера сначала равномерным тонким слоем распределяет строительный материал модели по всей плоскости платформы камеры построения, затем этот блок склеивает частицы материала между со-

бой согласно математической 3D-модели, передаваемой на принтер из управляющего программного обеспечения.

После нанесения связующего вещества платформа области построения опускается вниз, а платформа подающей камеры поднимается вверх на одинаковую высоту, после чего печатающая головка снова начинает движение.

Рабочая камера 3D-принтера, работающего по технологии 3DP, состоит из подающей камеры, которая заполняется модельным материалом, и камеры построения, где осуществляется непосредственное выращивание модели.

Технология 3DP, в сравнении с другими технологиями, обладает низкой себестоимостью производства прототипа, обеспечивая высокую скорость 3D-печати и качество моделей. Это достигается за счет низкой стоимости материала и его безотходного применения.

Используемый материал служит как для построения модели, так и для ее поддержки во время процесса 3D-печати. Это единственная технология, способная передавать цвета палитры CMYK.

3D-печать от Moor Technologies

Данная технология позволяет печатать изделия из обычной бумаги формата А4. Резец из твердосплавной стали вырезает каждый слой будущей модели из листа бумаги. Затем слои проклеиваются силикатным (канцелярским) клеем.

Краткая сопоставительная характеристика основных видов 3D-печати представлена в табл. 2 [6].

Точность создания прототипов различными 3D-принтерами находится в диапазоне от 0,05 до 0,20 мм по каждой координате. Точность создания прототипов увеличивается при уменьшении толщины слоя, но при этом падает скорость печати и повышается ее себестоимость. В свою очередь, себестоимость прототипа зависит от его объема. В зависимости от выбранной технологии 3D-печати цена 1 см³ модели составляет от 1 до 5 \$ США.

Таблица 2

Основные современные технологии и методы 3D-печати

Технология печати	Метод печати	Краткая характеристика технологий
Струйная	Экструзия	Материал плавится и в жидком виде выдавливается в рабочую зону через сопло малого диаметра. Слои жидкого материала соединяются друг с другом и при охлаждении застывают, приобретая прочность
	Фотополимеризация	Жидкий фотополимеризующийся материал подается в рабочую зону через сопло малого диаметра. Слои облучаются ультрафиолетом и твердеют
	Склеивание	Объект формируется чередованием слоев порошкообразного материала и клея. Клей выдавливается из сопла принтера
Лазерная	Лазерное спекание	Порошкообразный материал наносится тонким слоем и спекается лазерным лучом, затем наносится и спекается следующий слой и т. д.
	Стереолитография	Лазерный луч засвечивает верхний слой жидкого фотополимера, которым наполнена рабочая емкость принтера. В местах касания лазерного луча фотополимер твердеет. Платформа с готовым слоем погружается, и формируется следующий слой
Термопрес-синговая	Ламинирование	Из тонких пленок вырезаются слои, которые соединяются в готовый объект под действием нагрева и/или давления

МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБНЫХ ПРОТЕЗОВ ПО 3D-ТЕХНОЛОГИЯМ

Для медицинских целей широко используют полимерные материалы общетехнического и/или специального назначения. Помимо общетехнических требований (температура плавления, прочность, износостойкость и т. п.) к полимерным материалам медицинского назначения, и особенно стоматологического назначения, предъявляются дополнительные санитарно-гигиенические требования: это минимальное взаимодействие с биологически активными средами, отсутствие токсичных свойств, низкая растворимость, минимальные сорбирующие свойства и др. [6, 11 – 13].

Специальные полимерные материалы медицинского назначения предназначены для непосредственного контакта с живым организмом. Основу таких материалов составляют синтетические и природные высокомолекулярные соединения, не оказывающие на живой организм вредного воздействия. Наиболее широкое применение в медицине находят полимерные материалы на основе поливинилхлорида, сополимеров стирола, полипропилена, полиметилметакрилата, полиуретанов и т. п. По характеру взаимодействия с биологическими тканями и органами полимерные материалы условно подразделяют на биологически инертные, совместимые и активные.

Биологически инертные полимерные материалы (полиэтилен, полипропилен, фторопласт, силиконы, полиметилметакрилат и др.) практически не изменяют своих свойств под влиянием сред живого организма.

Биологически совместимые полимерные материалы способны постепенно подвергаться разложению или растворению в биологических средах, что позволяет без последствий для организма пациента осуществлять восстановительные хирургические операции.

Биологически активные полимерные материалы обладают физиологической активностью благодаря лекарственным препаратам, содержащимся в них в виде компонента-наполнителя.

Основные расходные материалы

ABS-пластик

Самым популярным расходным материалом является ABS-пластик (АБС-пластик). Такой пластик не имеет запаха, он не токсичен, ударопрочен и эластичен [14].

ABS-пластик (акрилонитрилбутадиенстирол) получают из нефтепродуктов. Он достаточно прочный, твердый, жесткий, по этой

причине широко применяется в автомобильной промышленности, в производстве бытовых приборов, в канцелярии, в изготовлении детских игрушек, в медицинском оборудовании и др.

При 3D-печати из ABS-пластика этот материал дает достаточно сильную усадку. Из-за неравномерного остывания изделия могут возрасти внутренние напряжения, что может привести к деформации изделия или образованию трещин.

Минимизировать этот эффект позволяют подогреваемая платформа и закрытая рабочая камера 3D-принтера, но даже в этом случае эффект усадки будет в той или иной степени выражен.

Особая структура этого вида расходного материала позволяет выдерживать высокие механические нагрузки. Пластик относится к ударопрочной группе, и если сравнить ABS-пластик с полистиролом, то первый в значительной степени превосходит другие аналоги в плане механической прочности и жесткости.

Преимущества ABS-пластика:

- непрозрачный (хотя есть и прозрачная модификация). Окрашивается в различные цвета;
- обладает повышенной ударопрочностью и эластичностью;
- нетоксичен;
- долговечен;
- обладает стойкостью к щелочам и моющим средствам;
- обладает масло-, влаго- и кислотостойкостью.

Этот материал можно также использовать для нанесения гальванических покрытий, в сфере вакуумной металлизации и даже для спайки контактов. Он отлично подходит для сварки или точного литья.

Материал обладает высокой размерной стабильностью. Распечатанные объекты имеют блестящую поверхность (уровень блеска можно регулировать).

Среди огромного списка достоинств можно отметить стойкость к щелочам, смазке, кислотам, некоторым углеводородам, жирам и даже бензину. Однако он прекрасно растворяется в ацетоне, эфире, бензоле, этилхлориде, этиленхлориде, анилине и анизоле. Это позволяет обрабатывать изделия из ABS-пластика, убирать слоистость, получать ровную и гладкую поверхность.

Основной недостаток — чувствительность к воздействию ультрафиолетовых лучей и атмосферных осадков. Данный материал характеризуется низким уровнем электроизоляции.

Поступает в розничную продажу в виде порошка или тонких пластиковых нитей, намотанных на бобины.

Технические характеристики:

Плотность: 1,05 г/см³.

Температура стеклования (размягчения): ~100 °С.

Температура плавления: 220–248 °С.
Температура воспламенения около 395 °С.
Теплостойкость: 103 °С (до 113 °С у модифицированных марок).
Диапазон эксплуатационных температур: от –40 до +90 °С.
Предел прочности на разрыв: 22–30 МПа.
Модуль упругости на растяжение: 1627 МПа.
Модуль упругости на изгиб: 1834 МПа.
Ударная прочность: 130 кДж/м² (при 23 °С), 100 кДж/м² (при –30 °С).
Относительное удлинение: 6 %.
Объемная скорость плавления: 5–9 (220 °С/10 кг) см³/10 мин.
Массовая скорость плавления: 5–9 (220 °С/10 кг) г/10 мин.

PLA-пластик

PLA-пластик, или полилактид, является самым экологически чистым и подходящим расходным материалом для 3D-печати. PLA-пластик обладает наименьшим уровнем токсичности. Данный вид пластика представляет собой термопластичный полиэфир, который создается из растительного сырья — биологических отходов (сахарной свеклы или силоса кукурузы). Его мономером является молочная кислота.

Распечатанные объекты имеют отличный уровень скольжения, и из такого пластика можно производить даже подшипники скольжения. Недостатком полилактида является недолговечность и постепенное разложение.

PLA-пластик близок к ABS-пластику, но имеет меньшую температуру плавления и не подвержен температурной деформации, дает меньшую усадку, что делает PLA-пластик прекрасным материалом для 3D-печати больших изделий.

Для повышения прочности изделия полилактид можно смешать с ABS-пластиком. Если необходимо расплавить PLA-пластик, то достаточно поместить модель в ультразвуковую ванну, наполненную водой с небольшим количеством каустической соды. Более простой способ расплавления — поместить объект в воду при температуре около 80 °С.

Пластик распадается под воздействием насыщенных щелочных растворов, что позволяет использовать его в качестве альтернативного материала поддержки при 3D-печати сложных изделий на принтере, оборудованных двумя экструдерами (печатающими головками).

Технические характеристики:

Плотность: 1,25 г/см³.

Температура стеклования (размягчения): 50 °С.

Температура плавления: ~180 °С.
Твердость (по Роквеллу): 76–88 МПа.
Ударная прочность при 23 °С: 100 кДж/м².
Предел прочности на разрыв: 40 МПа.
Предел прочности на растяжение: 10–60 МПа.
Предел прочности на изгиб: 88–119 МПа.
Модуль упругости на растяжение при 23 °С: 350–2800 МПа.
Относительное удлинение: 1,5–3,8 %.
Усадка (при изготовлении изделий): отсутствует.
Влагопоглощение: 0,5–50 %.

PVA-пластик

PVA-пластик, водный раствор поливинилацетата, известного в быту как клей ПВА, в качестве материала для 3D-печати на российском рынке появился в 2012 г.

Отличительной особенностью этого материала является хорошая растворимость в воде. Его основное предназначение — роль поддержки в процессе создания объектов с уникальным дизайном.

Технические характеристики:

Плотность: 1,25–1,35 г/см³.

Показатель текучести при 190 °С (2,16 кг): 1,5–3,5 г/10 мин.

Температура стеклования (размягчения): 45–55 °С.

Температура плавления: 160–170 °С.

Удельная теплоемкость: 0,4 кал/дс.

Растворимость: растворим в воде.

Фотополимеры

Популярным расходным материалом для современных 3D-принтеров являются **фотополимеры**, меняющие форму под воздействием солнечного света. Они могут быть жидкими или твердыми. Такой расходный материал применяется для печати на принтерах SLA и PJET. Объекты, распечатанные при помощи фотополимеров, обладают высокой прочностью, устойчивостью к солнечному свету и воде.

К фотополимерам относятся и так называемые фотополимерные смолы, общим свойством которых является изменение агрегатного состояния под воздействием ультрафиолетового света.

Модели из таких смол отличаются высокой прочностью, светостойкостью; исходные материалы изначально могут находиться как в жидком, так и в твердом состоянии. Используются в стереолитографических 3D-принтерах.

Фотополимер LS 600 создавался компанией EnvisionTEC специально для 3D-принтеров ZBuilder Ultra.

Полимер LS 600, или желтый полимер, имеет высокую прочность. Уровень детализации и качество отделки поверхности по своим техническим характеристикам не уступает изделиям, изготовленным из пластика ABS.

Полимер LS 600 не подвержен влиянию света, влажности, длительных механических нагрузок. Область применения — медицина (преимущественно стоматология), электроника, машиностроение, аэрокосмическая отрасль, украшения и игрушки.

Технические свойства фотополимера LS 600 приведены в табл. 3. Для сравнения в таблице приведены аналогичные свойства для пластика ABS [5].

Таблица 3

**Характеристики фотополимера LS 600
в сравнении с ABS-пластиком**

Показатель	Фотополимер LS 600	ABS-пластик
Модуль упругости, МПа	1800	1700–2930
Давление, вызывающее разрыв, МПа	60	26–47
Растяжение, вызывающее разрыв, МПа	4,39	6
Твердость по Шору	85 D	65–80 D
Твердость по Изоду, Дж/см ²	0,63	1–4
Температура стеклования (размягчения), °С	61	80–125
Температура изгиба под нагрузкой 0,45 МПа, °С	57	95–99
Температура изгиба под нагрузкой 1,8 МПа, °С	48	74–108
Плотность, г/см ³	1,1	1,02–1,06

Фирма DSM SOMOS выпустила на рынок **новые виды фотополимерных смол**. Смола DMX-SLTM100 обладает свойствами ABS-пластиков и имеет в четыре раза более высокую ударную стойкость. SLA-модели из этого материала обладают прочностными свойствами на уровне SLS-моделей и прототипов, полученных методом вакуумного литья полиуретановых смол в силиконовые формы [9].

Смола Sornos ProtoGenTMO-XT — еще один ABS-подобный материал с более высокой теплостойкостью и с широким спектром применения: от мастер-моделей до функциональных моделей различного назначения. Смола Somos Watershed® 11120 и ее новая модификация ProtoCastTM AF 19120 — идеальный материал для изготовления прозрачных моделей, а также для выжигаемых моделей по технологии Quick-Cast (построение SLA-модели с сотовой структурой для последующего выжигания и литья в оболочковые формы отличается малой зольностью материала).

Не столь давно усилиями компании 3D Systems были созданы **новые акриловые полупрозрачные фотополимеры**: VisiJet, VisiJet X, VisiJet Crystal, VisiJet Hi-Cast, VisiJet Pearlstone, VisiJet Dentcast [15]. Материалы в 2012 г. прошли испытания в лабораторных условиях и были признаны годными к применению в хирургии, протезировании, стоматологии и ряде других областей. Так, например, VisiJet Pearlstone – стоматологический материал, характеризуется высокой точностью и приятным белым цветом.

VisiJet Dentcast специально предназначен для создания моделей стоматологических изделий: челюстей, коронок и их оснований, мостов, зубных протезов, ортодонтических капп, шаблонов для хирургии, медицинских моделей и т. д.

Специфика использования обуславливает повышенную точность и скорость печати, что дает значительное преимущество перед обычным отливочным воском. Материалы серии VisiJet предназначены для 3D-печати методом многоструйного моделирования (Multi-jet Modeling).

В исходном состоянии фотополимеры серии VisiJet являются бесцветной пастой, хранить которую следует вдали от прямых солнечных лучей. При нагреве материала выше 90 °С выделяются токсичные взрывоопасные газы.

Технические характеристики:

Плотность: 1,02–1,10 г/см³.

Температура плавления/деформации: 56 °С.

Предел прочности на разрыв: 42,4 МПа.

Предел прочности на растяжение: 32–49 МПа.

Модуль упругости на растяжение: 1463–1724 МПа.

Относительное удлинение при разрыве: 6,83–12,30 %.

Растворимость: слабо растворим в воде при 20 °С.

Полиэтилен низкого давления

Полиэтилен низкого давления, или полиэтилен высокой плотности (High Density Polyethylene, или HDPE, PE-HD), $[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-]_n$ – термопластичный полимер этилена, один из самых дешевых и распространенных пластиков в мире. Именно из него делают пластиковые бутылки, упаковочные пакеты, емкости, трубы, пленки и т. п. Особенно удобен тем, что физические и химические свойства данного материала позволяют использовать его в любой из технологий 3D-печати.

Технические характеристики:

Плотность: 0,958–0,963 г/см³.

Температура стеклования (размягчения): 120–125 °С.

Температура плавления: 129–135 °С.

Предел прочности на разрыв: 23,5–27,4 МПа.

Предел прочности на растяжение: 25,5 МПа.

Растворимость: растворим в ароматических углеводородах при температурах выше 120 °С.

Полипропилен

Полипропилен (PP), $[-\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)-]_n$, получают полимеризацией мономера пропилена в присутствии металлоорганических катализаторов. Полипропилен — самый легкий пластик из ныне существующих, по свойствам похожий на полиэтилен. Отличается от него высокой чувствительностью к активному кислороду и солнечному свету, а также низкой морозостойкостью (эксплуатация изделий из полипропилена при температуре ниже -5 °С нежелательна). Лучше переносит высокие температуры и более устойчив к истиранию.

Полипропилен растворяется только при повышенных температурах в сильных растворителях: хлорированных, ароматических углеводах, стоек к кислотам и щелочам, отдельные марки допущены к контакту с пищевыми продуктами и для производства изделий медико-биологического назначения.

Технические характеристики:

Плотность: 0,900–0,920 г/см³.

Температура стеклования (размягчения): от -10 до -20 °С.

Температура плавления: 160–176 °С.

Предел текучести: 27–30 МПа.

Предел прочности на растяжение: 30–35 МПа.

Относительное удлинение: 200–800 %.

Полиэтилентерефталат

Полиэтилентерефталат (PETF, ПЭТФ, PET, ПЭТ), бытовое название «лавсан», «полиэстер», — материал, используемый для производства пищевой и медицинской тары.

ПЭТФ отличается высокой износоустойчивостью и работе в диапазоне температур от -40 до $+75$ °С. Материал легко поддается механической обработке. Малое водопоглощение обуславливает высокую стабильность свойств и размеров изделий. Изделия из ПЭТФ устойчивы к удару и растрескиванию, действию разбавленных кислот, масел, спиртов, минеральных солей и большинству органических соединений, за исключением сильных щелочей и некоторых растворителей. ПЭТФ минимально адсорбирует запахи.

Печать с использованием ПЭТФ проблематична из-за сравнительно высокой температуры плавления, достигающей 260 °С, и зна-

чительной усадки при остывании, достигающей 2 %. Использование ПЭТФ в качестве расходного материала требует примерно тех же условий, что и печать ABS-пластиком.

Для достижения прозрачности моделей необходимо быстрое охлаждение при прохождении порога стеклования, составляющего 70–80 °С.

Технические характеристики:

Плотность: 1,335 г/см³ аморфный, 1,420 г/см³ кристаллич.

Температура стеклования (размягчения): 67 °С аморфный, 81 °С кристаллич.

Температура плавления: 250–265 °С.

Температура разложения: 350 °С.

Предел прочности при растяжении: 172 МПа.

Модуль упругости при растяжении: $1,41 \cdot 10^4$ МПа.

Относительное удлинение при разрыве: от 12 до 55 %.

Сжимаемость (расплав): $6,99 \cdot 10^6$ МПа.

Коэффициент теплового расширения (расплав): $6,55 \cdot 10^{-4}$.

Влагопоглощение: 0,3 %.

Морозостойкость: до –50 °С.

Полифенилсульфон

Полифенилсульфон (PPSU) – высокопрочный термопластик, имеет целый комплекс положительных свойств (термостоек, практически негорюч, устойчив к всевозможным химическим и механическим повреждениям), благодаря чему успешно используется в электротехнике, а также в авиационной и космической промышленности при изготовлении теплостойких деталей. Прозрачен, прочен (прочнее латуни), допускает стерилизацию паром, поэтому широко применяется для производства медицинского инструмента и оборудования [16].

Диапазон эксплуатационных температур составляет от –50 до +180 °С. Пластик устойчив к воздействию растворителей и горючесмазочных материалов.

Полифенилсульфон редко используется в 3D-печати ввиду высокой температуры плавления, достигающей 370 °С. Такие температуры экструзии не под силу большинству настольных принтеров, хотя печать и возможна при использовании керамических сопел. Единственным активным пользователем этого материала является компания Stratasys, предлагающая промышленные установки Fortus.

Технические характеристики:

Плотность: 1,29 г/см³.

Предел текучести: 76 МПа.

Влагопоглощение при 23 °С: 1,2 %.

Поликарбонат

Поликарбонаты (PC) — основной полимер полибисфенол-А-карбоната, сложные полиэфиры угольной кислоты и дигидроксисоединений общей формулы $[-ORO-C(O)-]_n$, где R — ароматический или алифатический остаток. Поликарбонат — легкий и прочный прозрачный материал, изделия из которого прекрасно переносят температуры от -40 до $+120$ °С, широко используется при производстве защитного снаряжения (каска, очки) и осветительного оборудования. Несмотря на высокую температуру плавления (около 300 °С), очень удобен для экструзии. Поликарбонат обладает высокой химической устойчивостью к большинству неинертных веществ, что дает возможность применять его в агрессивных средах. Его свойства мало изменяются с ростом температуры.

Поликарбонат весьма восприимчив к действию ультрафиолетовых лучей. По экологическим параметрам поликарбонат не уступает стеклу, а по прочности заметно его превосходит. Поликарбонат биологически инертен и пригоден для изготовления посуды, но процесс производства довольно сложен и происходит с выделением вредных веществ.

Технические характеристики:

Плотность при 25 °С: 1,20 г/см³.

Температура стеклования (размягчения): 150 °С.

Температура размягчения: 220–230 °С.

Предел прочности при растяжении: 65–70 МПа.

Предел прочности при изгибе: 95 МПа.

Коэффициент теплового линейного расширения: $(5-6) \cdot 10^{-5}$.

Влагопоглощение при 25 °С: 0,36 %.

Морозостойкость: до -50 °С.

Поликапролактон

Поликапролактон (PCL, полиморфус, shapelock) — биоразлагаемый полиэфир, обладает уникально низкой температурой плавления ($59-64$ °С) и высокой скоростью застывания, что делает его отличным материалом для быстрой 3D-печати. При охлаждении до комнатной температуры пластик твердеет и приобретает свойства обычной пластмассы: становится твердым, прочным и не ломким. В неокрашенном состоянии при нагревании становится прозрачным. Материал идеально подходит сразу нескольким технологиям 3D-печати (FDM, SLS, ZCorp). Поликапролактон легко разлагается в человеческом организме и абсолютно безвреден для здоровья. Используется в медицине в качестве шовного и имплантируемого биоматериала, а также для изготовления капсул лекарственных препаратов (оболочек контролируемого высвобождения).

Нейлон

Нейлон (Nylon) — общее название материалов и волокон из полиамида (Polyamide). Волокна из полиамидных материалов устойчивы к истиранию и являются одними из самых прочных на разрыв. Нейлон похож на популярный расходный материал ABS- и PLA-пластик. Однако он обладает лучшей сопротивляемостью высокой температуре печати (до 320 °С) и способен хорошо впитывать влагу. Недостатком нейлона является более высокий срок застывания. Нейлон считается токсичным материалом, поэтому требует откачки воздуха из экструдера при печати. Данный вид расходного материала отлично подходит для печати шестерней, рычагов и запчастей для медицинских аппаратов. В последнее время часто используют такой материал, как Nylon 618, который обладает гораздо меньшей токсичностью.

В ортопедической стоматологии нейлон применяют при изготовлении эластичных съемных зубных протезов. Материал обладает высокой стабильностью и эластичностью, редко вызывает аллергические реакции в организме человека. Нейлон не гигроскопичен, не впитывает запахи, поэтому протезы из него не способствуют скоплению и размножению микроорганизмов.

Высокопрочная нейлоновая нить Taulman3D позволяет создавать очень прочные объекты, используемые в том числе для регенерации и замены кости, для создания индивидуальных протезов.

Низкотемпературный и высокопрочный пластик T-Glase специально предназначен для использования в низкотемпературных 3D-принтерах. T-Glase — жесткий и прочный материал прозрачного цвета. Пластик почти не подвержен деформации, что делает возможным печать крупных объектов. T-Glase сертифицирован и одобрен для использования в предметах, контактирующих с едой, в частности тарелках и чашках. Пластик печатает модели с идеальной текстурой поверхности. Хорошая адгезия с платформой без подогревания позволяет использовать его для печати в любом экструдерном принтере.

Технические характеристики:

Плотность при 25 °С: 1,01–1,15 г/см³.

Температура плавления: 178–260 °С.

Предел текучести: 70–87 МПа.

Влагопоглощение при 23 °С: 0,7–6,7 %.

Известны также материалы на основе наполненного полиамида, которые можно с полным основанием отнести к композитным материалам:

PA 3200 GF — стеклонеполненный полиамид, используемый для получения корпусных деталей.

Alumide — алюмин-наполненный полиамид, используется для изготовления функциональных моделей, а также вставок в термопласт-автоматы для последующего литья пластмассовых изделий.

CarbonMide — углеродонаполненный полиамид с повышенной прочностью.

Полиметилметакрилат

Полиметилметакрилат (ПММА), или акрил (acrylic), органическое стекло. Химическая формула $[-\text{CH}_2\text{C}(\text{CH}_3)(\text{COOCH}_3)-]_n$. Материал прочен, влагоустойчив, экологичен, пластичен и устойчив к воздействию прямого солнечного света, легко поддается склеиванию.

Полиметилметакрилат используется в 3D-печати для создания прозрачных моделей. Необходимо учитывать, что для данного материала характерна более высокая температура плавления, чем для АВС-пластика, он очень быстро остывает и твердеет. В разогретом полиметилметакрилате появляется множество мелких воздушных пузырьков, которые могут вызвать визуальные искажения готового изделия.

Полиметилметакрилат в силу многих причин плохо подходит для FDM/FFF-печати. При хранении в виде катушек с нитью он постепенно разрушается. Во избежание образования пузырьков разрешение печати должно быть высоким. Быстрое застывание акрила требует жесткого климатического контроля рабочей камеры и высокой скорости печати.

Наилучшие результаты с полиметилметакрилатом дает другая технология печати — многоструйное моделирование (ММ) от компании 3D Systems. В данном случае применяется фотополимерный вариант акрила. Значительных успехов достигла и компания Stratasys, использующая собственный фотополимерный имитатор акрила VeroClear на принтерах марки Objet Eden.

Технические характеристики:

Плотность при 20 °С: 1,18–1,19 г/см³.

Температура стеклования (размягчения): 95–125 °С.

Температура плавления: 160 °С.

Температура разложения (кипения): 200 °С.

Предел прочности при растяжении: 70 МПа.

Модуль упругости при растяжении: (3,0–3,5)·10³ МПа.

Относительное удлинение при растяжении при 23 °С: 3–5 %.

Металлические порошки и композитные материалы

Металлические порошки и композитные материалы на их основе часто используют в 3D-печати. В качестве исходного материала применяют золото, медь, алюминий или сплавы металлов.

Даже пластик ABS не может имитировать блеск настоящего металла. Данные виды расходных материалов широко применяют в ювелирном деле. Модели из металла обладают более высокой прочностью, чем изготовленные из других видов расходных материалов для 3D-принтеров.

Металлические модели не всегда обладают высокой химической стойкостью, имеют высокую теплопроводность, поэтому в металлический порошок для 3D-печати часто добавляют стекловолоконные и керамические наполнители.

Каркасы зубных протезов и коронок могут быть послойно выращены из порошковых или жидких биосовместимых композитных материалов либо изготовлены из кобальтохромового сплава или оксида алюминия методом лазерного спекания гранул пудры [5]. На готовый каркас напыляется слой металла или керамики, после чего протез готов к использованию.

Нержавеющую сталь StainlessSteel PH1 используют для 3D-печати по технологии Direct Metal Laser Sintering или прямого лазерного спекания металлов (DLMS) как основной и наиболее универсальный материал. В исходном состоянии это мелкий порошок, который под действием излучения мощного лазера превращается в полноценную сталь.

Нержавеющая сталь StainlessSteel PH1 характеризуется высокой коррозионной стойкостью и отличными механическими характеристиками. Материал применяют в медицине, самолетостроении и т. д.

Объекты, изготовленные из нержавеющей стали PH1, могут быть затем обработаны на механических, пескоструйных и электроэрозионных станках, сварены, отполированы или покрыты другим материалом.

Химический состав нержавеющей стали PH1, мас. %:

Железо — ~75 (до 100 %).

Хром — 14,0–15,5.

Никель — 3,5–5,5.

Медь — 2,5–4,5.

Марганец — макс. 1.

Кремний — макс. 1.

Молибден — макс. 0,5.

Ниобий — 0,15–0,45.

Углерод — макс. 0,07.

Фосфор — < 0,04.

Сера — < 0,03.

Механические свойства нержавеющей стали PH1:

Плотность: 7,8 г/см³.

Предел прочности при растяжении : 1380 МПа.

Предельное напряжение сдвига — 1275 МПа.
Модуль упругости — 200 ГПа.
Удлинение на разрыв — 10 %.
Твердость по Викерсу — 445 НВ.
Ударная вязкость по Шарпи — 10 Дж.

Титановый материал Ti6Al4V предназначен для 3D-печати бедренных и зубных имплантов. Деталь получают сплавлением исходного материала электронными пучками мощностью 50—3500 Вт при диаметре лучей 0,2—1,0 мм.

Сплав Ti6Al4V — наиболее распространенный материал, применяемый в ЕВМ-процессе с использованием 3D-принтера Arcam A2. В состав сплава входит 6 % алюминия, 4 % ванадия, остальное — титан. Также могут присутствовать примеси железа до 0,25 % и кислорода до 0,2 %.

Максимальная температура применения сплава составляет 400 °С, плотность — 4,42 г/см³, модуль Юнга — 100 ГПа, предел прочности — 1000 МПа.

Вспомогательные расходные материалы

Спреи для 3D-сканирования

При сканировании предметов важно иметь равномерную и небликующую поверхность. Для этого используют специальные спреи [16, 17]. Спрей пригоден также для выявления скрытых дефектов поверхности. Покрытие получается равномерно-белым, быстро сохнет и легко смывается.

В качестве спрей-аэрозоля используют спрей под названием «Проявитель U89» или D100 для капиллярного контроля серии «НОРД-ТЕСТ» (Nord-Test) или Dudl-Chek (рис. 11, см. цв. вкл.).

Эти виды спреев производят компании Helling GmbH, Германия (U89), и Sherdwin Babb Co, Франция (D100).

В баллончике находится ультрадисперсный белый порошок в спиртосодержащей основе, не содержащей ароматических добавок.

Проявители используют при 3D-лазерном сканировании как антибликовое средство.

Области применения проявителей U89 и D100:

- авиастроение;
- автомобилестроение;
- машиностроение;
- судостроение;
- строительство ядерных реакторов;

- металлургия;
- электротехника;
- медицина;
- котло- и приборостроение;
- литейное производство;
- сварочная техника.

Проверяемые материалы:

— легированные и нелегированные стали, цветные металлы, покрытия;

- изделия порошковой металлургии;
- сварные соединения;
- стеатит;
- пластмасса;
- керамика;
- другие синтетические материалы.

Выявляемые дефекты:

- холодные и тепловые трещины;
- трещины шлифовки;
- трещины с сильным напoлaскиванием;
- поры разного размера и гнезда пор;
- губчатая структура;
- поры с сильным напoлaскиванием;
- коррозионные трещины.

Спреи NORD-TEST применяют для контроля изделий при температурах от -5 до $+50$ °С.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ 3D-МОДЕЛИ ПОЛОСТИ РТА

Чтобы напечатать на 3D-принтере трехмерную модель зуба, необходимо провести сканирование челюсти пациента при помощи стоматологического магнитно-резонансного томографа или компьютерного томографа с конусообразным лучом [5, 6, 18]. Наиболее широкое применение в стоматологии имеют компьютерные томографы, которые безопасны для пациентов и позволяют получить точные результаты. Кроме того, они значительно дешевле установок магнитно-резонансной томографии.

Применение магнитно-резонансных томографов в стоматологии

В современных магнитно-резонансных томографах используют два основных типа магнита [19]:

- постоянные, которые экономичны и просты в эксплуатации, не требуют заправки жидким гелием и затрат на электроэнергию. Магниты устанавливают на магнитно-резонансные томографы с напряженностью поля до 0,35 Тл;

- сверхпроводящие, использующие криогенную гелиевую систему охлаждения. Этим типом магнитов комплектуются высокопольные и ультравысокопольные магнитно-резонансные томографы с напряженностью магнитного поля свыше 1,5 Тл.

Существуют аппараты с так называемыми резистивными электромагнитами, однако их используют крайне редко ввиду высокой стоимости их эксплуатации.

Различают два типа томографов [20]: открытые и закрытые.

Закрытый томограф, или томограф туннельного типа, — устройство, напоминающее огромную трубу. В нем создается магнитное поле, и туда на специальном столе закатывается пациент. В связи с тем, что при определенных видах диагностики пациент находится в томографе довольно долго, он может испытывать дискомфорт от замкнутого пространства.

Открытый томограф — это помещение, наподобие рентгеновского кабинета, в котором находится пациент. К нему в любой момент может подойти медсестра или кто-либо из родных. Это отличное изобретение для пожилых, очень больных пациентов или маленьких детей. К тому же во время выполнения томограммы можно проводить какие-либо лечебные мероприятия.

Магнитно-резонансные томографы по показателю напряженности основного магнитного поля условно делятся на классы [19]:

- низко- и среднепольные;

- высокопольные;
- ультравысокопольные.

Среднепольные магнитно-резонансные томографы

MAGNETOM C — мощный и производительный среднепольный открытый магнитно-резонансный томограф с напряженностью магнитного поля 0,35 Тл, оснащенный самой совершенной в своем классе градиентной системой. На магнитно-резонансном томографе MAGNETOM C реализован ряд новейших технологий, в том числе мультиканальная технология параллельной визуализации, которые ранее были доступны лишь для высокопольных магнитно-резонансных томографов.

Высокопольные магнитно-резонансные томографы

Компания Siemens производит следующие модели высокопольных магнитно-резонансных томографов:

- MAGNETOM Essenza.
- MAGNETOM Avanto.
- MAGNETOM Espree.
- MAGNETOM Symphony.

MAGNETOM Essenza — самый доступный из перечисленных выше, инновационный 1,5 Тл магнитно-резонансный томограф. Это уникальный магнитно-резонансный томограф, сочетающий последние достижения в томографии и доступную цену. Реализованная Tim-технология и технология нулевого испарения гелия делают работу магнитно-резонансного кабинета высокоэффективной и оптимизируют рабочие процессы. Tim — передовая магнитно-резонансная технология организации радиочастотного тракта, повышающая как диагностическое качество изображений, так и клиническую производительность.



Рис. 12. Внешний вид магнитно-резонансного томографа MAGNETOM Essenza

Широкий спектр клинических приложений позиционирует данный магнитно-резонансный томограф универсальным сканером для диагностических задач практически без ограничений (рис. 12) [19].

MAGNETOM Avanto — лидер по клинической производительности. Это самый совершенный и мощный магнитно-резонансный томограф в отрасли в классе 1,5 Тл сканеров с уникальной технологией «нулевого испарения гелия», с периодичностью дозаправки гелия всего лишь 1 раз в 10 лет. Лидер по качеству изображений, клиническим возможностям и скорости магнитно-резонансных исследований.

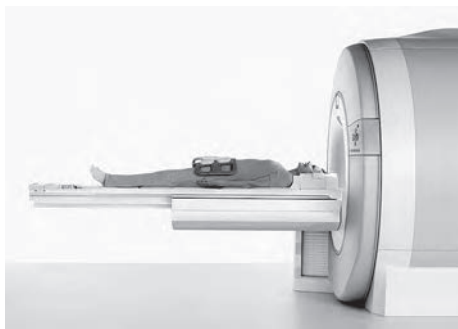
MAGNETOM Avanto допускает возможность технологической модернизации с сохранением имеющегося парка катушек.

MAGNETOM Espree обеспечивает наивысший комфорт пациента. Это первый 1,5 Тл магнитно-резонансный томограф открытого типа с Tim-технологией, обеспечивающий максимальный уровень комфорта пациента в сочетании с широким спектром экспертных клинических приложений.

MAGNETOM Symphony — поддерживает экспертные приложения по доступной цене. Чрезвычайно производительный магнитно-резонансный томограф самого высокого уровня. Оптимальный выбор с точки зрения соотношения цены и клинических возможностей. Данная модель успешно работает во многих ведущих клиниках в России, прекрасно себя зарекомендовала как надежная и высокопроизводительная магнитно-резонансная система. Возможна ее модернизация до Tim-технологии.

Ультравысокопольные магнитно-резонансные томографы

MAGNETOM Trio A Tim System — первый ультравысокопольный магнитно-резонансный томограф с напряженностью магнитного поля 3 Тл, оснащенный Tim-технологией. Является самым совершенным магнитно-резонансным томографом в своем классе по скорости, клинической гибкости и спектру



решаемых диагностических задач. Используется как для научных исследований, так и для специализированных клинических приложений (рис. 13) [19].

MAGNETOM Verio — первый в истории ультравысокопольный открытый магнитно-резонансный томограф с напряженностью магнитного поля 3 Тл. Передовые показатели однородности поля и

Рис. 13. Внешний вид магнитно-резонансного томографа (вид сбоку)

богатый спектр клинических приложений ставят эту систему вне конкуренции в области высокотехнологичных диагностических исследований самого высокого уровня для ведущих клиник и научных центров.

Компьютерные томографы с конусообразным лучом

Двухмерные изображения стали использоваться в стоматологии с 1896 г., когда удалось получить первый внутриротовой рентгеновский снимок. С тех пор в технике получения изображений полости рта достигнут существенный прогресс: появилась панорамная съемка и томография, позволяющие уменьшить дозу облучения и сократить время обработки снимков (табл. 4) [22].

Таблица 4

Сравнение доз рентгеновского облучения при стоматологических исследованиях

Исследование	Особенности съемки	Доза облучения, мкЗв
Внутриротовой снимок	Скорость F, прямоугольный коллиматор	1
Внутриротовой снимок	Скорость E, круглый коллиматор	4
Набор снимков всей полости рта	Скорость E, круглый коллиматор	80
Латеральная цефалограмма	Скорость F, редкоземельный экран	2
Панорамный снимок	Скорость F, редкоземельный экран	15
Конусно-лучевая компьютерная томограмма	Обе челюсти	68
Компьютерная томограмма	Обе челюсти	600

Компьютерный томограф с технологией конусно-лучевой компьютерной томографии (КЛКТ), который изобрели 100 лет спустя, являет собой огромное достижение в получении трехмерных изображений зубов и челюстно-лицевой области.

Компьютерный томограф с технологией конусно-лучевой компьютерной томографии представляет собой оборудование, позволяющее получать объемные изображения при меньшей их себестоимости и меньшем облучении пациента по сравнению с традиционной компьютерной томографией. Метод подразумевает использование

конического рентгеновского луча, направленного на двухмерный детектор, который совершает один оборот вокруг объекта съемки, создавая серию двухмерных изображений. Объемное изображение реконструируется из этих двухмерных изображений по специальному алгоритму.

Такой метод зачастую позволяет получать изображения с большим разрешением, чем это доступно при использовании обычного компьютерного томографа. Новые системы более удобны в работе, поскольку имеют меньшие габариты.

Конусно-лучевой компьютерный 3D-томограф MyRay SkyView 9"

Характеристики компьютерного томографа (рис. 14) [22]:

- универсальный компьютерный томограф для получения четких и качественных 3D-рентгенограмм челюстно-лицевой области со специальной функцией ZOOM (масштаб) имеет жидкокристаллический монитор с диагональю 19";

- позиционирование пациента в лежачем положении при помощи трех специальных лазерных лучей и трех сервомоторов столика (оси X–Y–Z);

- позиционирование пациента может выполняться при помощи специального джойстика на панели управления или непосредственно с рабочего компьютера врача-стоматолога;

- компактный и изящный дизайн позволяет устанавливать данный томограф, как и самый обычный панорамный рентген-аппарат, даже в небольшом помещении врача-стоматолога;

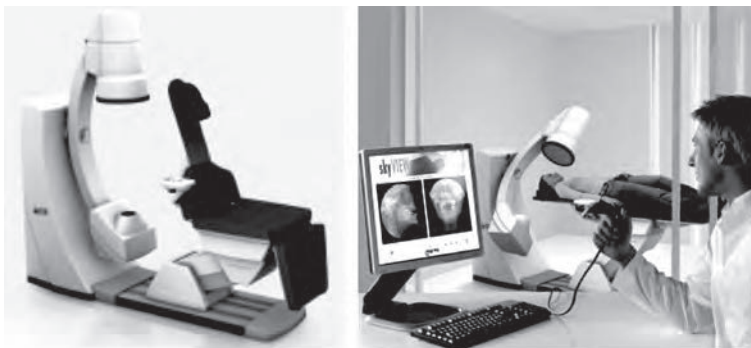


Рис. 14. Внешний вид конусно-лучевого компьютерного 3D-томографа MyRay SkyView 9"

— одной универсальной экспозиции достаточно для дальнейшего получения любой проекции (панорамного снимка, снимка височно-нижнечелюстного сустава, гайморовой пазухи, 3D-изображения, поперечной проекции выбранной области зубного ряда для имплантологов с толщиной среза 0,05 мм).

Технические характеристики томографа 3D-томографа MyRay SkyView 9” отобраны в табл. 5 [22].

Сопоставление свойств и особенностей компьютерной и магнитно-резонансной томографии проведено в табл. 6 [23].

Таблица 5

Технические характеристики 3D-томографа MyRay SkyView 9”

Наименование параметра	Значение параметра
Рентгеновский луч	Конической формы, возможность изменять область просмотра (приближение)
Рентгеновский источник	90 кВ, 10 мА
Общая фильтрация	11,4 мм
Фокальная пляма	0,5–0,6 мм (стандарт IEC)
Детектор изображения	CCD датчик 1000 × 1000, размер пиксела 7,4 мкм
Градация серого цвета	4096 (12 бит)
Диаметр сферической области сканирования	Диаметр 15 см, 7 см приближение (ZOOM)
Режим сканирования: короткое полное	190° 360°
Скорость сканирования	12–18 град/с
Время сканирования, с	10, 15, 20, 30 (стандартный режим – 15)
Размер воксела, мм	0,33 (диаметр FOV 15 см), 0,16 (FOV диаметр 7 см при приближении)
Толщина секций аксиальной томографии, мм	От 0,05
Время обработки снимка после экспозиции, мин	2–2,5
Время обработки снимка для получения обратной проекции, мин	2–3
Габариты, Д × Ш × В, мм	1535 × 2510 × 1720
Масса, кг	360
Питание	230 В, 50 Гц

Сравнение методов компьютерной и магнитно-резонансной томографии

Параметр сравнения	КТ – компьютерная (осевая) томография	МРТ – магнитно-резонансная томография
История создания	Первый коммерческий КТ-сканер был изобретен Годфри Хаунсфилдом в Великобритании. Первое сканирование мозга пациенту было сделано 1 октября 1971 г.	Первый коммерческий МРТ появился в 1981 г., с течением времени значительно увеличилось разрешение МРТ и выбор последовательности изображений
Применение	Подходит для визуализации при повреждениях костей, легких и грудной клетки. Широко используется в травмпунктах	Подходит для оценки мягких тканей, например, при травмах связок и сухожилий, повреждениях спинного мозга, опухолях
Принцип	Затухание рентгеновских лучей обнаруживается детектором и системой хранения данных с прямым подключением, а затем обрабатывается при помощи математической модели (модель обратной проекции), чтобы вычислить, какое значение пикселей затем станет изображением	Метод исследования внутренних органов и тканей с использованием ядерного магнитного резонанса. Основан на измерении электромагнитного отклика ядер атомов водорода на возбуждение их определенной комбинацией электромагнитных волн в постоянном магнитном поле высокой напряженности
Время полного сканирования	Обычно выполняется за 5 мин. Фактическое время сканирования, как правило, составляет менее 30 с. КТ менее чувствителен к движениям пациента, чем МРТ	Сканирование МРТ обычно длится 30 мин
Принцип построения изображения	Используются рентгеновские лучи	Используются внешнее магнитное поле, радиочастотные импульсы и три различных градиентных поля

Воздействие излучения на организм	Эффективная доза излучения КТ колеблется от 2 до 10 мЗв, что соответствует дозе, получаемой человеком от фонового излучения в среднем за 3–5 года. Как правило, КТ не рекомендуется беременным женщинам и детям, если только это не является абсолютно необходимым	Отсутствует. Механизм МРТ контролирует/ограничивает выделение энергии в тело пациента
Информация о костных структурах	Обеспечивает хорошую детальность костных структур	МРТ менее детально по сравнению с КТ
Информация о мягких тканях	Наибольшим преимуществом КТ является возможность получить изображение костей, мягких тканей и кровеносных сосудов в одно и то же время	Гораздо большая детальность мягких тканей, чем при КТ
Область применения	КТ может очень точно выделить кости внутри тела	МРТ является более универсальным, чем рентген
Специфика изображения	Хорошая дифференциация мягких тканей, особенно с внутривенным контрастированием. Более высокое разрешение изображений и меньше помех при движении из-за высокой скорости обработки изображений	Демонстрирует тонкие различия между различными видами мягких тканей
Ограничения в сканировании пациентов	Пациентам с металлическими имплантатами можно делать КТ. Очень крупные пациенты (более 200 кг) могут не поместиться в отверстие обычного сканера КТ или могут превысить весовой предел выдвижного стола	Пациентам с кардиостимуляторами не разрешается проходить МРТ. Тагуировки и металлические имплантаты могут быть противопоказанием для МРТ из-за возможных травм пациента или искажения изображения. Пациенты весом более 160 кг могут превысить весовой предел стола

Параметр сравнения	КТ — компьютерная (осевая) томография	МРТ — магнитно-резонансная томография
Внутривенное контрастное вещество, желательные последствия	Неионный йодированный агент ковалентно связывает йод и имеет меньше побочных эффектов. Аллергическая реакция встречается редко, но она более распространена, чем реакция на контрастное вещество при МРТ. Риск от контрастного вещества включает в себя нефропатию, особенно при почечной недостаточности (скорость клубочковой фильтрации < 60), сахарный диабет и обезвоживание	Аллергические реакции очень редки. Возможен риск фиброза нефрогенной си-стемы при наличии свободной гадолиния в крови и при тяжелой почечной недостаточности. Противопоказан пациентам со скоростью клубочковой фильтрации менее 60 и особенно при 30 мл/мин
Стоимость обследования	В США колеблется от \$ 1200 до \$ 3200, обычно это дешевле, чем МРТ	Варьируется от \$ 1200 до \$ 4000 (с контрастом), что обычно дороже, чем КТ и рентген или большинство других методов обследования

3D-дентальный компьютерный томограф Kodak 9000 3D

Kodak 9000 3D — дентальный компьютерный томограф с функцией панорамной диагностики. Наряду с трехмерными снимками Kodak 9000 3D позволяет производить высококачественные панорамные снимки с малой лучевой нагрузкой [24].

Прибор работает в одной программе с дентальным рентген-аппаратом и радиовизиографом Kodak-Trophy (Carestream Dental), который является эталонным набором для интраоральной диагностики.

Высокие темпы продаж и поддержка завода-изготовителя позволяют формировать привлекательную для покупателя цену на дентальный томограф с функцией панорамной съемки Kodak 9000 3D (Carestream Dental), рис. 15; рис. 16, см. цв. вкл.

Технические характеристики:

Режим работы: напряжение на трубке 60–90 кВ; анодный ток 2–15 мА.

Высокочастотный генератор: 140 кГц.

Фокальное пятно: 0,5 мм СЕI.

Общая фильтрация: эквивалент 2,5 мм Al.

Параметры электропитания: 220–230 В; 50–60 Гц.

Максимальная потребляемая мощность: 2,2 кВА.

Трехмерная компьютерная томография.



Рис. 15. Внешний вид 3D-томографа Kodak 9000 3D

CMOS-сенсор с фиброоптическим фильтром; 16 384 полутона серого цвета: 14-битная технология.

Размер сканируемой области (цилиндр), мм: 50 × 37.

Возможность получения сдвоенного (два пересекающихся цилиндра) и строенного (три пересекающихся цилиндра, перекрывающие челюсть целиком) томографического исследования.

Размер трехмерного элемента (изотропного воксела): 0,076 × 0,076 × 0,076 мм.

Томографическое исследование: вращением на 360 °.

Диагностические программы:

- трехмерная реконструкция сканируемой области;
- стандартная панорамная съемка с увеличением 1,27 мм;
- детская панорамная съемка;
- 2- или 4-секционные снимки височно-нижнечелюстных суставов в боковой проекции с открытым и закрытым ртом;
- снимки гайморовой пазухи;
- сегментные панорамные снимки челюсти (левый фрагмент, правый фрагмент, фронтальная группа).

Особенности программы состоят в следующем:

- есть общая программа ведения картотеки с интраоральными радиовизиографами RVG UI и Kodak RVG5100/6100;
- новая программа позволяет создать из трех томографических снимков цельное трехмерное изображение челюсти пациента;
- система томографического сканирования с дозой облучения меньше, чем при панорамном снимке;
- возможна автоматическая замена сенсора.

3D-дентальный томограф Kodak CS 9300

3D-томограф **Kodak CS 9300** — дентальный томограф с широкой областью применения (рис. 17; рис. 18, 19, см. цв. вкл.), табл. 7.

Основные технические характеристики:

Высокочастотный генератор: 140 кГц.

Напряжение на трубке: 60—90 кВ.

Сила тока на трубке: 2—15 мА.

Томографическое исследование: вращением на 360°.

Характеристики 3D-томографа Kodak CS 9300

Размер сканируемой области (цилиндра), мм	50 × 50 80 × 80 100 × 50 170 × 135 170 × 110 170 × 60 100 × 100
Размер элемента изображения, мм	0,090 × 0,090 × 0,090 0,180 × 0,180 × 0,180 0,200 × 0,200 × 0,200 0,250 × 0,250 × 0,250 0,300 × 0,300 × 0,300
Время исследования: трехмерного, с; панорамного, с	12–20 4–16
Особенности	Простота и удобство работы в программе Kodak 6.X.X.X. Общая программа ведения картотеки с интраоральными радиовизиографами Kodak RVG5100/6100 Максимальное время трехмерной реконструкции сканируемой области 2 мин Возможность дооснащения цефалостатом
Габариты (Ш × Г × В), см	116 × 160 × 238
Вес, кг	160
Программы съемок	Стандартная панорамная; детская панорамная; панорамная сегментарная; панорамная синусов; четырёхсекционная челюстного сустава; двухсекционная челюстного сустава



Рис. 17. Внешний вид 3D-дентального томографа Kodak CS 9300

3D-дентальный цифровой томограф с цефалостатом Kodak CS 9000C 3D

Kodak CS 9000C 3D с функцией «три в одном» сочетает преимущества томографа с небольшой областью трехмерной диагностики с передовыми технологиями панорамного и цефалометрического исследований «коротким импульсом» (рис. 20; рис. 21, см. цв. вкл.).

Особенности и преимущества:

В отличие от модели Kodak CS 9000 3D, цефалометрические снимки (боковые и диагональные проекции) представляют целый спектр новых возможностей.

5 форматов цефалометрических изображений: от целиком черепа (30 × 30 см) до небольшой области изображения (18 × 18 см) с низкой дозой излучения.

Высочайшее качество изображений достигается благодаря эксклюзивной и лучшей в своем классе технологии снимка «коротким импульсом».

Беспрецедентная детализация анатомических изображений получена благодаря трем автоматическим фильтрам обработки изображений. Автоматическая трассировка цефалометрических снимков.

Увеличение: × 1,14.

Габариты, мм: 2150 × 1595 × 2378.



Рис. 20. Внешний вид 3D-дентального цифрового томографа Kodak CS 9000C 3D

3D-стоматологический томограф 3D ACCUITOMO F.P.D. 1610

3D ACCUITOMO F.P.D. 1610 — трехмерный цифровой стоматологический томограф второго поколения (рис. 22).

Технические характеристики:

Напряжение на трубке: 60—80 кВ.

Сила тока на трубке: 1—10 мА.

Фокальное пятно: 0,5 × 0,5 мм.

Томографическое исследование: с вращением на 360° и 180°.

Максимальное время экспозиции при полном исследовании: 18 с.

Максимальное время экспозиции при частичном исследовании: 9,5 с.

Трехмерная реконструкция.

Просмотр трехмерного изображения в реальном времени.

Послойные срезы.

Трехмерное моделирование.

Размер исследуемой области: 40 × 40; 60 × 60; 80 × 80 мм.

Размер вокселя: 0,080 × 0,080 × 0,080; 0,125 × 0,125 × 0,125; 0,160 × 0,160 × 0,160 мм.

Ширина среза: 0,080—2 мм.

Время обработки данных на компьютере: менее 5 мин.
Разрешающая способность: более 2 пар лин./мм.
Питание: 220–240 В.
Градации серого цвета: 4096 оттенков.
3-мерное моделирование твердых и мягких тканей.
Внешние размеры: 1620 × 1200 × 2080 мм (основной блок).
Вес: 400 кг.

Комплектация:

Кресло пациента, позиционируемое дистанционно в трех плоскостях.

Вращающаяся П-образная консоль с генератором и плоским цифровым приемником рентгеновского излучения.

Высокопроизводительная рабочая станция (персональный компьютер).

21" TFT-монитор высокого разрешения DELL.

Программное обеспечение Mediadent.

Примечания:

Область применения: стоматология, ЛОР.

Сетевое программное обеспечение с 3-мерной визуализацией.



*Рис. 22. Внешний вид 3D-стоматологического томографа
3D ACCUITOMO F.P.D. 1610*

3D-томограф Gendex GXCB-500

3D-томограф **Gendex GXCB-500** — итог сотрудничества компаний Gendex и i-CAT, мирового лидера в сегменте конусной 3D-томографии. LFOV-томографы i-CAT широко известны и применяются в основном в челюстно-лицевой хирургии и ортодонтии (рис. 23; рис. 24, см. цв. вкл.) [25]. Общая практика, эндодонтия, пародонтология, а также имплантация и другие процедуры невозможны без более детального исследования и требуют конусного MFOV 3D-томографа, такого как GXCB-500.

Томограф Gendex GXCB-500, разработанный совместно с компанией-производителем томографа i-CAT, позволяет производить немедленную высокоточную диагностику в каждом клиническом случае. Это революционная технология конусно-лучевой компьютерной томографии.

Gendex GXCB-500 для 3D-исследования предоставляет мощные инструменты для диагностики и планирования лечения, которые многократно превышают возможности обычной цифровой панорамной рентгенографии. Можно начать планирование лечения уже через 30 с. Результат — целенаправленное лечение, точное планирование операций, назначение адекватного плана лечения.



Рис. 23. Внешний вид 3D-томографа Gendex GXCB-500

Прибор имеет расширенные возможности 3D-диагностики:

- анатомически точная 3D-визуализация критически важных анатомических структур;
- отсутствие искажения или увеличения;
- возможность получения поперечных срезов любых участков верхней или нижней челюсти;
- маркировка нижнего альвеолярного нерва для упрощения определения точной локализации нервного канала;
- можно получать традиционные цифровые панорамные изображения.

Прибор идеален для имплантологии. Поле обзора 8×8 см позволяет визуализировать обе зубные дуги в стандартном режиме сканирования. Поле обзора 14×8 см позволяет получить изображение верхней челюсти и обоих височно-нижнечелюстных суставов в режиме развернутого сканирования (EDS).

Технические характеристики 3D-томографа GXCB-500:

Фокусное пятно, мм: 0,5.

Размер воксела, мм: 0,4 / 0,3 / 0,25 / 0,2 / 0,125.

Детектор изображения: плоская панель на основе аморфного кремния.

Размер датчика: 13×13 см.

Разрешающая способность: 14 п/см (размер воксела 0,2 мм).

Оттенки серого: 16 384 оттенка серого (14 бит).

Поле обзора, см: 8×8 — стандартный режим (std), 14×8 — режим развернутого сканирования (EDS).

Коллимация: до 4 см.

Время сканирования: 8,9 с (размер воксела 0,3 или 0,4 мм при режимах сканирования std/EDS); 23 с (размер воксела — 0,125; 0,2 или 0,25 мм).

Время реконструкции: до 20 с — стандартный режим, до 95 с — режим EDS.

Размер файла: до 20 Мб — стандартный режим, до 76 Мб — режим EDS.

Программное обеспечение: просмотр и обмен изображениями i-CAT Vision™.

Габариты Ш \times В, м: $1,22 \times 1,17$.

Характеристики программного обеспечения i-CAT Vision™:

Автоматическая реконструкция панорамного изображения.

Оценка локализации канала нижнего альвеолярного нерва.

Система управления стоматологической практикой.

Интерфейс с использованием системы PACS.

Совместимость DICOM 3 со сторонним программным обеспечением.

Стоматологический томограф KaVo 3D eXam

Система конусно-лучевой объемной томографии **KaVo 3D eXam** обеспечивает получение 3D-цифрового изображения высокого разрешения в пределах стоматологической клиники по доступной цене и с меньшей дозой облучения пациента по сравнению с традиционной мультиспиральной компьютерной томографией [25].

Томограф KaVo 3D eXam обеспечивает точное планирование лечения в области имплантологии, хирургии, ортодонтии и консервативной стоматологии. Аппарат идеально соответствует потребностям стоматолога и пациента.

Трехмерные изображения в пределах стоматологической клиники получают быстро, легко и экономически оправданно. Интуитивно понятное программное обеспечение упрощает и ускоряет процесс получения трехмерного изображения. Компактные габариты аппарата и эргономичный дизайн позволяют установить оборудование даже при минимально доступном пространстве.

Дизайн KaVo 3D eXam включает использование технологии современных цифровых изображений при максимальной экономичности аппарата, обеспечивая высокие стандарты визуализации для соответствия требованиям взыскательных клиницистов.

Использование современной плоской панели датчика из аморфного кремния уменьшает габаритные размеры устройства, обеспечивая превосходное качество изображения высокого разрешения.

Предоставляет полный спектр диагностических услуг.

Система конусно-лучевой объемной томографии KaVo 3D eXam предлагает стоматологам общего профиля и узким специалистам визуализацию всех челюстно-лицевых структур, позволяя производить полную диагностику, на основании которой планируется дальнейшее лечение с предсказуемым результатом (рис. 25, 26).



Рис. 25. Внешний вид стоматологического томографа KaVo 3D eXam

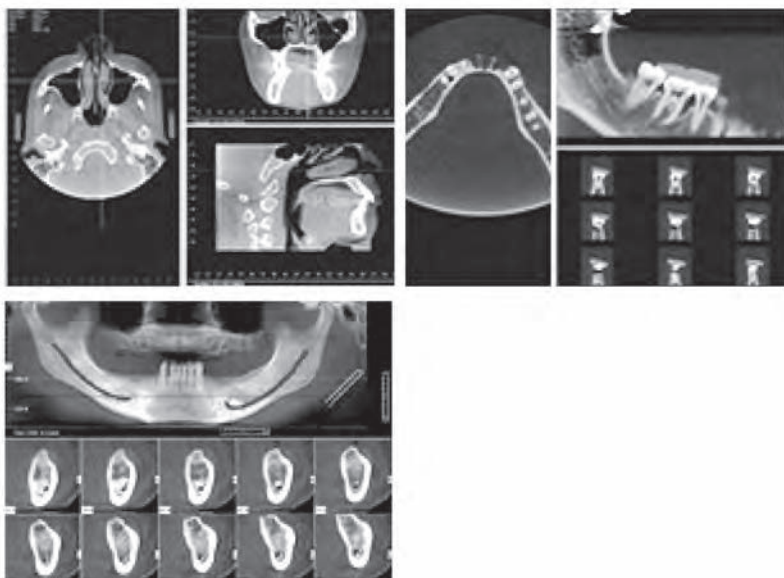


Рис. 26. 3D-технология при использовании стоматологического томографа обеспечивает высокое качество изображения

Основные преимущества KaVo 3D eXam:

- компактный аппарат, обеспечивающий оптимальное качество изображения;
- современная сенсорная технология на основе аморфного кремния;
- максимально быстрое время сканирования (8,5 с);
- изображение большого формата и поле обзора размером до 23×17 см;
- регулируемая коллимация пучка для изображений большого и малого формата;
- высокое разрешение сканирования для четкости изображения;
- быстрая реконструкция изображения менее чем за 1 мин;
- запись снимка в цифровом формате обеспечивает возможность передачи данных изображения с сохранением непревзойденной четкости и точности;
- кресло с электромеханическим приводом;
- прост в эксплуатации, дистанционное управление всеми основными функциями.

Волюметрическая система 3D-визуализации i-CAT FLX

Компания Imaging Sciences International представила систему трехмерной визуализации **i-CAT FLX**, которая помогает врачам диагностировать сложные проблемы при меньшей лучевой нагрузке и легко и точно разрабатывать планы лечения (рис. 27) [26].

Согласно информации производителя, эта новейшая система серии i-CAT оснащена инструментами трехмерного планирования и лечения для применения в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии, а также при лечении синдрома височно-нижнечелюстного сустава и дыхательных расстройств.

Система i-CAT FLX обладает рядом характеристик, обеспечивающих ясность, простоту использования и управления:

- технология визуализации Visual iQuity обеспечивает получение четких двух- и трехмерных изображений;

- QuickScan+ позволяет получить трехмерное изображение зубочелюстной системы с меньшей дозой излучения, чем при панорамных снимках;

- сенсорный экран и встроенная система опознавания SmartScan Studio обеспечивает лучший контроль и гибкость рабочего процесса, позволяя клиницисту легко выбирать соответствующие настройки сканирования для каждого пациента с предельно низкой лучевой нагрузкой;

- эргономичная система стабилизации предоставляет возможность настройки положения сиденья и обеспечивает надежную фиксацию головы, что сводит к минимуму движения пациента, тем самым уменьшая необходимость выполнения повторных снимков. Систему



Рис. 27. Внешний вид системы трехмерной визуализации i-CAT FLX

также можно использовать для пациентов, находящихся в кресле-качалке;

- i-Collimator позволяет локализовать область сканирования, ограничивая облучение только участком, представляющим интерес;

- компактные габариты i-CAT FLX делают возможным использование системы в любой практике;

- i-PAN позволяет получать традиционные двухмерные панорамные снимки.

Программа выбора оптимального плана лечения Tx Studio обеспечивает быстрый доступ к инструментам для планирования имплантации, хирургическим шаблонам и другим приложениям.

3D-сканеры оптического диапазона

3D-сканеры относят к устройствам, которые производят анализ физического объекта и в дальнейшем создают его трехмерную модель. Различают контактный и бесконтактный методы сканирования. При бесконтактном методе применяют пассивные и активные 3D-сканеры. 3D-лазерные сканеры относятся к группе активных сканеров [27].

Лазерные датчики, заменившие контактные сенсоры, и цифровая фототехника позволяют более точно сканировать объекты и получать текстурную модель.

Лазерные 3D-сканеры работают как с мелкими, так и с крупными объектами, что расширяет область их применения в самых различных отраслях.

Технологии 3D-сканирования используют в медицине, музейном деле, промышленном дизайне и т. д. Широкое применение трехмерное сканирование нашло в медицинском протезировании.

Из ряда 3D-сканеров следует выбирать тот, который позволит вам наиболее точно решать поставленные задачи. Речь идет и о высокоточных метрологических системах, и о цветном ручном лазерном сканере, и о 3D-лазерном сканере с функцией фотограмметрии.

3D-сканеры Artec

3D-сканер Artec L

3D-сканер Artec L применяется в таких областях, как медицина, дизайнерское и музейное дело. Он имеет наибольший угол обзора и глубину резкости из всей линейки сканеров Artec. Благодаря этому с его помощью представляется возможным целиком оцифровать крупногабаритный объект всего за несколько секунд или сделать композицию из крупных объектов с помощью программы Artec™ 3D Studio, которая поставляется в комплекте со сканером [28].

Работа со сканером не требует дополнительных навыков. Программное обеспечение Artec™ 3D Studio выполнит свою работу и объединит снятые кадры в единое целое. Программное обеспечение идет в комплекте.

Сканер Artec L обладает высокой скоростью сканирования. Источник света Artec L — вспышка. Это абсолютно безопасный способ сканирования людей.

3D-сканер Artec MHT

3D-сканер **Artec MHT** по своим характеристикам и принципу работы похож на 3D-сканер Artec MH, за исключением того, что при сканировании возможен захват цветовой гаммы до 24 бит на пиксель. 3D-сканеры Artec MHT применяют в таких областях, как дизайн, анимация, музейное дело, медицина, т. е. там, где необходимо получение текстуры и цвета сканируемого объекта.

3D сканер Artec MHT, в отличие от предшественника Artec MH, имеет уникальную возможность захвата цвета. Данная модель получила сразу большое распространение среди аниматоров, кинематографов и для сохранения культурного наследия.

Artec MHT очень прост в работе. Эта простота достигнута во многом благодаря дизайну. Дизайн разработан специально с учетом эргономики человеческой руки. Его очень удобно помещать в руку и производить работы по сканированию. Кроме того, его масса — 1,6 кг, что упрощает работу со сканером.

3D-сканер Artec Eva

3D-сканер **Artec Eva** — продукт компании Artec Group. Самый легкий в своем классе, он не требует для работы сложной калибровки и меток на объекте. Эта система — готовое решение для скоростного высокоточного сканирования объектов средней величины. Информация о цвете и текстуре достигает глубины в 24 бита с разрешением в 1,3 Мп и хранится в файле формата JPEG в виде растрового изображения.

3D-сканирование поверхности происходит с точностью до 0,1 мм. Такая точность отлично подходит для оцифровки объектов среднего размера. Частота кадров съемки достигает 16 кадров в секунду, что позволяет использовать Artec Eva для сканирования даже движущихся объектов. 3D-сканер захватывает 288 тыс. точек в секунду.

На поверхности объекта не нужно наносить специальных меток или маркеров. Это упрощает трехмерное сканирование, делая процесс полностью бесконтактным.

Для работы с 3D-сканером необходимо подключить кабели (USB и питание), установить программное обеспечение и нажать на кнопку

«Пуск». Устройство готово к сканированию сразу после включения. Нет необходимости проводить трудоемкую калибровку.

При весе 850 г 3D-сканер обладает прочным эргономичным корпусом с запоминающимся дизайном. Поставляется в комплекте с программным обеспечением, которое имеет постоянное обновление и делает работу со сканером приятной, простой и быстрой.

Источником света в 3D-сканере Artec Eva является светодиодная лампа-вспышка, а не лазер. Это делает применение сканера безопасным для сканирования биологических объектов (люди, животные, растения).

Области человеческой деятельности, где пригодилось бы 3D-сканирование: автопром, аэрокосмическая промышленность, реверс инжиниринг, музейное дело, компьютерная графика и кинематография, анимация, дизайн, криминалистика, медицина, образование, архитектура, системы контроля (биометрический контроль, контроль качества) и многое другое.

3D-сканер Artec Eva Lite

3D-сканер **Artec Eva Lite** от компании Artec Group самый точный и дешевый трехмерный сканер. Eva Lite не захватывает цвет и текстуру, но быстро и точно сканирует поверхности объектов средней величины. Простой в управлении, легкий и эргономичный Artec Eva Lite – оптимальное решение при ограниченном бюджете.

3D-сканер Artec Spider

3D-сканер **Artec Spider** привлекает внимание высоким разрешением и точным захватом данных. Значения угла обзора и глубины резкости 3D-сканера минимальны для линейки продукции Artec. 3D-сканер Artec Spider оптимален при оцифровке мелких предметов, размеры которых сопоставимы, например, с авторучкой или спичечным коробком. Возможно точное сканирование сложных деталей для больших объектов, комбинирование результата с информацией от «крупного» Artec L и «среднего» Artec M 3D-сканеров. Видеорежим позволяет снимать динамические объекты. Применение 3D-сканера Artec Spider оправдано в таких областях, как медицина, музейное дело, дизайн, производство.

Большое распространение получил Artec Spider в сфере ортодонтии, когда необходимо точное, качественное сканирование объектов небольшого размера.

Во время работы сканер захватывает форму поверхности в видеорежиме. Работа с этим сканером очень проста и понятна даже начинающему пользователю. Для того чтобы получить изображение, необходимо поднести сканер к объекту сканирования на расстояние от

17 до 35 см, запустить режим сканирования и плавно обнести сканер со всех сторон объекта. Далее всю работу выполняет программное обеспечение Artec™ 3D Studio. Оно объединит все снятые трехмерные файлы в единую модель.

На сканируемый объект нет необходимости наносить метки-маркеры. Это особенно удобно при сканировании маленьких объектов. 3D-сканер Artec Spider обладает высокой скоростью сканирования, сохраняя высокое разрешение и точность. Видеорежим дает возможность снимать объекты в движении. Это может быть полезно при сканировании частей человеческого тела.

Сканер Artec Spider безопасен для человека благодаря использованию в качестве источника оптического излучения светодиода синего свечения. В этой связи можно сканировать любые части тела и даже лицо.

Его малый вес и размеры позволяют персоналу легко работать с Artec Spider. Очень удобно использовать сканер с объектами, которые нельзя переносить или трогать. Для сканирования достаточно двигать сам сканер.

3D-сканер Artec Spider идеально подходит для максимально точного сканирования сложных объектов, разработки индивидуальных корсетов для ортопедии и протезирования.





Сравнительные характеристики линейки 3D-сканеров Artec приведены в табл. 8 [28], см. с. 68.

3D-сканеры Breuckmann

3D-сканеры **Breuckmann** превосходят многие популярные устройства подобного назначения благодаря структурированной подсветке, что обеспечивает генерацию 3D-поверхности с повышенной детализацией (табл. 9). Эти сканеры применяют в медицине, ювелирном деле.

3D-сканеры **Breuckmann d-STATION** являются высокоточным оборудованием для сканирования маленьких объектов (монеты, ювелирные украшения, зубные слепки и др.). Особенно развито применение данной системы в области стоматологии.

Сравнительные характеристики 3D-сканеров Artec

Характеристики					
	Artec™ L	Artec™ MHT	Artec™ Eva	Artec™ Eva Lite	Artec™ S
Передача цвета, бит/пиксел	Нет	24	24	24	Нет
Возможность захвата текстуры	Нет	Есть	Есть	Есть	Нет
Текстурное разрешение, Мп	—	1,3	1,3	—	—
3D-разрешение, мм	< 1,0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,2
Точность в точке, мм	< 0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,05
Объемная точность	0,15 % свыше 1000 мм				
Источник света	Фотовспышка (не лазер)				
Рабочая область, В × Ш, ближний диапазон, мм	598 × 459	214 × 148	214 × 148	214 × 148	80 × 56
Рабочая область, В × Ш, дальний диапазон, мм	1196 × 918	536 × 371	536 × 371	536 × 371	134 × 93
Угловое поле зрения камеры, В × Ш	41 × 32°	30 × 21°	30 × 21°	30 × 21°	30 × 21°
Рабочее расстояние, м	0,8—1,6	0,4—1,0	0,4—1,0	0,4—1,0	0,15—0,25

Частота кадров, к/с	< 15	< 15	< 16	< 16	< 15
Выдержка, мс	0,2				
Скорость сбора данных, тыс. точек/с	< 500	< 500	< 288	< 288	< 500
Калибровка	< 1 мин, не требует специального оборудования				
Формат данных	OBJ, STL, PLY, PTX, WRML, ASCII, AOP				
Скорость обработки	40 млн треуг./1 Гб RAM				
Размеры, В × Д × Ш, мм	353 × 114 × 70	266 × 114 × 70	180 × 187 × 260	180 × 187 × 260	125 × 195 × 80
Вес, кг	2,3	1,6	0,85	0,85	1,6
Параметры питания	12 В, 36 Вт	12 В, 40 Вт	12 В, 48 Вт	12 В, 48 Вт	12 В, 36 Вт
Интерфейс	1 × USB 2.0	2 × USB 2.0	1 × USB 2.0	1 × USB 2.0	1 × USB 2.0

Сравнительные характеристики 3D-сканеров Breuckmann

Характеристики				
	Breuckmann smartSCAN	Breuckmann stereoSCAN	Breuckmann d-STATION	Breuckmann faceSCAN-III
Принцип действия сенсора	Технология миниатюрных проекций			
Передача цвета	Есть			
Текстурное разрешение	1384 × 1036 пикселей	1384 × 1036 пикселей	1296 × 964 пикселей	1384 × 1036 пикселей
Точность по оси Z, мкм	От 2	2	От 2	2
Разрешение камеры, Мп	1,6	1,4	1,3	1,4
Количество камер	2	2	1	1
Рабочая область, В × Ш, мм	90 × 65, 27°	100 × 75, 30°	70 × 90, 20°	600 × 460, 160°
Угловое поле зрения, град.				
Источник света	Галогеновая лампа 100 Вт, 150 лм	Галогеновая лампа 100 Вт, 150 лм	Светодиодная лампа 3 Вт	Галогеновая лампа 100 Вт, 150 лм

Рабочее расстояние, м	0,7–1,0	0,38–0,88	1,7	0,4–1,0
Время сбора данных	Менее 1 с	0,98 с	1,3 с, 0,98 с в быстром режиме	Менее 0,8 с
Выходной формат данных	ASCII, BRE, STL, PLY, VRML	ASCII, BRE, STL, PLY, VRML	BRE, STL, PLY, VRML	BRE, STL, PLY, VRML
Интерфейс	IEEE 1394 (FireWire)			
Вес, кг	3	6	14	5

3D-сканеры Creafom (ZScanner)

3D-сканеры **Creafom** — профессиональные системы трехмерного сканирования от компании Creafom. Используя метод лазерной триангуляции и бинокулярную систему технического зрения, такие 3D-сканеры быстро создают трехмерные модели реальных объектов с высокой точностью.

Устройства для трехмерного сканирования компании Creafom просты и надежны в использовании, обладают компактными размерами.

Программное обеспечение VXelements интуитивно понятно и просто в использовании, позволяет быстро сделать необходимые оценки размеров сканируемого объекта.

Ниже приведен внешний вид и основные характеристики 3D-сканеров линейки Creafom (табл. 10).

3D-сканер David Starter-Kit v.2

David Starter-Kit v.2 — простой в эксплуатации и дешевый сканер компании David, который позволяет сканировать объекты размером до 40 см.

Сканирование происходит с помощью лазерного луча, движение которого считывает высокоточная камера с автофокусом. Данные передаются на компьютер, где уже формируется цифровая модель.

Для получения полноценного изображения необходимо отсканировать отдельно каждую сторону объекта, включая верх и низ, а программа потом соединит фрагменты изображения в 3D-модель. Для удобства в комплекте к сканеру идут калибровочные панели со специальными метками.




Программное обеспечение объединяет полученные снимки в полноценную цифровую модель и может сохранить ее в форматах OBJ, PLY и STL. Полученные изображения могут быть сразу отправлены на печать или использованы, например, для презентации.

3D-сканер David Structured Light Scanner SLS-1 (David-SLS-1)

David-SLS-1 — высокоточный 3D-сканер, который использует инновационную технологию структурного света, что делает сканирование невероятно быстрым. В сканере вместо лазера используется видеопроектор, а изображение формируется на основе преломленной полосы света. David-SLS-1 мобилен, его можно поставить непосредственно перед сканируемым объектом (рис. 28, с. 76). Одно нажатие — и благодаря хорошо отлаженному программному обеспечению сканер начинает работу.

**Внешний вид и основные характеристики
3D-сканеров линейки Creaforgn**

<p>HandySCAN 300</p>  <p>205 тыс. измерений/с Площадь сканирования — 225 × 250 мм Источник света — 3 лазера Разрешение — 0,1 мм Точность — до 0,04 мм</p>	<p>HandySCAN 700</p>  <p>480 тыс. измерений/с Площадь сканирования — 275 × 250 мм Источник света — 7 лазеров Разрешение — 0,05 мм Точность — до 0,03 мм</p>	<p>Go!SCAN 20</p>  <p>550 тыс. измерений/с Разрешение — 0,2 мм Точность — 0,1 мм Глубина поля резкости — 100 мм Размер сканируемого объекта — 0,05—0,5 м Источник света — белый светодиод</p>
---	---	---

<p>GoSCAN 50</p> 	<p>UNIScan (ZScanner 600)</p> 	<p>REVscan (ZScanner 700)</p> 
<p>Площадь сканирования – 380 × 380 мм Разрешение – 0,5 мм Точность – 0,1 мм Глубина поля резкости – 250 мм Размер сканируемого объекта – 0,3–3,0 м Источник света – белый светодиод</p>	<p>Реверс-инжиниринг, производство, музейное дело Без передачи цвета С использованием меток лазерным лучом Разрешение – 100 мкм по оси Z, 80 мкм по оси X, Y</p>	<p>Реверс-инжиниринг, трехмерный контроль Без передачи цвета С использованием меток лазерным лучом Разрешение – 100 мкм по оси Z, 50 мкм по оси X, Y</p>

VIUscan (ZScanner 700 CX)



Реверс-инжиниринг, производство, трехмерный контроль, анимация
Цветное сканирование
С использованием меток лазерным лучом
Разрешение — 100 мкм по оси Z, 50 мкм по оси X, Y

EXAscan (ZScanner 800)



Реверс-инжиниринг, трехмерный контроль
Функция мультиразрешения
Без цвета
С использованием меток лазерным лучом
Разрешение — 50 мкм по оси Z и до 40 мкм по оси X, Y

MAXscan (ZScanner 700 PX)



Реверс-инжиниринг, 3D-контроль
Сканирование крупных объектов
Фотограмметрия
Без цвета
С использованием меток лазерным лучом
Разрешение — 100 мкм по оси Z, 50 мкм по оси X, Y



Рис. 28. Внешний вид лазерного 3D-сканера David-SLS-1

При создании нового **3D-сканера DAVID-SLS** использована инновационная технология структурированного света, которая позволяет осуществлять высокоточное 3D-сканирование очень быстро. Несколько секунд — и 3D-модель сканируемого объекта на экране. Таким же образом можно осуществить сканирование всех сторон объекта и, соединив изображения, получить объемную модель с радиусом обзора 360°.

Модульное программное обеспечение позволяет создать объект любого размера. Данные можно экспортировать в один из известных форматов файла (OBJ, STL, PLY) и обработать при помощи других программных приложений.

Технические характеристики 3D-сканера David-SLS-1:

Размеры сканируемого предмета: 10—600 мм.

Точность: ~0,2 % от размеров реального объекта.




Мобильность: есть. Сканер на штативе.

Передача текстуры: есть. Серая шкала.

3D-сканеры серии Dental Wings

Сканеры серии **Dental Wings**, специально предназначенные для использования в стоматологических лабораториях, производятся канадской компанией Dental Wings (табл. 11) [29].

Обобщенные характеристики стоматологических 3D-сканеров серии Dental Wings

Характеристики	Dental Wings 3Series	Dental Wings 7Series	Dental Wings iSeries
Внешний вид			
Системные требования	Windows 7®, 64 бит, Core i5, 8 Гб оперативной памяти, 1 Гб видеокарта		
Время сканирования, с	600	900	н/д
Скорость сканирования	60 с на 1 сканирование		
Калибровка	Откалиброван		
Технология сканера	Бесконтактный		
Тип сканера	Настольный		
Точность, мм	0,02		
Разрешение камеры, Мп	1	2	2
Формат вывода данных	STL, другие		
Программное обеспечение	DWOS		
Интерфейс	USB 2.0		
Размер сканируемого объекта, мм	90 × 90 × 90	140 × 140 × 140	90 × 90 × 90
Питание, В	110/220		
Размеры (Ш × Г × В), мм	330 × 390 × 450	430 × 430 × 450	330 × 390 × 410
Вес, кг	20	22	20

Примечание: н/д – нет данных.

Dental Wings 3Series — компактный 3D-сканер с компьютером, и к нему прилагается базовая конфигурация программного обеспечения DWOS, которую можно расширить различными модулями. 3D-сканер отлично подходит для маленьких и средних стоматологических лабораторий.

Dental Wings 7Series отлично подходит для больших и средних стоматологических лабораторий, где, как правило, важна высокая пропускная способность и универсальность оборудования.

Dental Wings iSeries сконструирован для оцифровывания слепков, а также используется для ортопедии и ортодонтии. Это компактное устройство имеет встроенный компьютер и позволяет стоматологу, а также зубному технику получить цифровой слепок пошагово и работать с ним при помощи фирменного программного обеспечения DWOS connect во время приема пациента.

3D-сканер Faro Focus^{3D}

Faro Focus^{3D} — высокоскоростной лазерный 3D-сканер для детальных измерений удаленных объектов и последующего документирования. Сканер Faro Focus^{3D} использует технологию лазерного замера для оперативного создания детализированных 3D-данных объектов сложной геометрии (рис. 29).



Рис. 29. Внешний вид лазерного 3D-сканера Faro Focus^{3D}

Сканер отличается простотой использования, автоматическая регистрация обеспечивает экономию времени до 50 % в процессе сканирования и обработки в сравнении с обычными лазерными сканерами.

Fago Focus^{3D} создает точные виртуальные копии объектов с миллиметровой точностью и скоростью до 976 тыс. координат в секунду.

Благодаря интуитивному управлению на основе сенсорного дисплея управлять сканером Fago Focus^{3D} так же легко, как цифровой камерой.

В сканере использован инфракрасный лазер мощностью 20 мВт на длину волны 905 нм.

Сканер имеет интуитивно понятный сенсорный дисплей. Удаленное управление сканером через беспроводную сеть WiFi дает возможность дистанционно запускать, останавливать или скачивать снимки.

Данные сканирования сохраняются на SD-, SDHC™-, SDXC™-картах памяти.

Fago Focus^{3D} имеет размеры 240 × 200 × 100 мм и вес 5 кг и является в настоящее время самым маленьким 3D-сканером.

Четырехсекционный литий-ионный аккумулятор напряжением 14,4 В высокой емкости позволяет обеспечить до 5 ч автономной работы. Аккумулятор можно заряжать в ходе сканирования. Для стационарных условий эксплуатации используется сетевой источник питания.

3D-сканер NextEngine 3D Scanner HD

3D-сканер **NextEngine 3D Scanner HD** — компактный и портативный сканер, который подключается через порт USB 2.0 к компьютеру (табл. 12). Он является отличным решением в таких сферах, как дизайн, производство, реверс-инжиниринг.

При высоком качестве работа с устройством проста и не требует дополнительного обучения. Полученные результаты сканирования впечатляют своим качеством, поэтому их можно использовать даже без предварительной обработки.

Отличительная особенность сканера — малые габариты и вес. Он очень компактен и занимает мало места на рабочем столе.

Работа со сканером не предполагает настраивание линз и проведение калибровки. Объект сканирования помещается на вращающуюся подставку.

NextEngine обладает встроенной подсветкой, что позволяет сохранить отличную цветопередачу.

NextEngine ScanStudio — программное обеспечение, с интуитивно понятным интерфейсом, помогает в обработке полученных результатов.

3D-сканер NextEngine может сканировать объекты разного размера с одинаково хорошим качеством. Можно снимать большие объекты по частям и соединять их в программе ScanStudio.

Экспорт файлов возможен в форматах STL, OBJ, VRML и U3D.

Технические характеристики 3D-сканера NextEngine 3D Scanner HD

Система измерения	Технология многополосной лазерной триангуляции
Источник света	2 светодиодных лазера мощностью 10 мВт и длиной волны 650 нм
Устройство считывания	Две CMOS-матрицы разрешением 3,0 Мп
Размеры области сканирования: макрорежим, см широкий режим, см	12,95 × 9,65 34,29 × 25,65
Передача цвета	Точный захват цвета поверхности
Время сканирования одной поверхности	До 2 мин
Захват плотности (на мишени): макрорежим, К/дм ² широкий режим, К/дм ²	160 До 22,5
Точность: макрорежим, мм широкий режим, мм	0,127 0,381
Разрешение, dpi: макрорежим широкий режим	До 400 До 150
Скорость сбора данных, точек/с	50 000
Размер (Д × Ш × В), мм	273 × 220 × 90
Вес, кг	2,5

3D-сканер PicoScan

3D-сканер **PicoScan** — компактный, удобный для пользователя, практичный, доступный по цене 3D-сканер, создающий трехмерные изображения высокого качества (табл. 13). Простая настройка и несколько кликов мышкой достаточны для получения высококачественных трехмерных изображений.

Сканер, управляемый трехмерным движком Mephisto, использует стандартную камеру Canon DSLR и проектор Pico, крепящийся к направляющей рамке. 3D-сканер PicoScan может сканировать сложные поверхности, прекрасно воспроизводя мельчайшие детали поверхности и текстуру.

Технические характеристики 3D-сканера PicoScan

Основная камера	Canon EOS 1000 D/Rebel XS
Разрешение	968 × 644, 8 бит
Крепление объектива	Canon EF
Стандартный объектив	Canon комплект 18–55 мм – зум-объектив
Разрешение текстуры, Мп	2,4
Тип проектора	Pico-проектор
Разрешение проектора (в пикселях)	800 × 600
Яркость проектора (ANSI), лм	40
Рабочий диапазон, близость, м	0,15
Рабочий диапазон, даль, м	0,8
Время забора данных, с	20
Расстояние от точки до точки, мм	0,16
Точность точек, мм	0,1
Глубокое сканирование	Да
Поворотный режим	Обновление до EOS-Scan
Canon сканирование	Да
Компьютер	<p>Минимальные системные требования: Microsoft Windows Vista® или Windows 7® 32- или 64-битных операционных систем. Intel Core Duo 2,4 ГГц. Минимум 2 Гб оперативной памяти. Рекомендуемый объем 4 Гб Nvidia или ATI OpenGL 2.0 / Direct X10 видеокарты. Минимум 512 Мб dual memory с поддержкой двух мониторов. Доступный USB 2.0 порт. Минимум 20 Гб свободного места на диске</p>

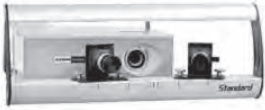



3D-сканеры RangeVision

Компания **RangeVision** — отечественный разработчик недорогих 3D-сканеров RVScanner и программного обеспечения для сканирования (табл. 14). Отличительные черты продукции компании — точность и многофункциональность. 3D-сканеры RangeVision RVScanner могут сканировать как мелкие, так и крупные объекты, что позволяет успешно применять их в самых разных областях.

Ниже приведен внешний вид и основные характеристики 3D-сканеров линейки RangeVision.

Таблица 14

Внешний вид и основные характеристики 3D-сканеров линейки RangeVision

<p>RangeVision Standard</p>  <p>3D-разрешение — 0,05–0,35 мм Камера — 1,3 Мп CMOS матрица / диагональ 1/2" Время сканирования — 7 с Корпус камер — пластик</p>	<p>RangeVision Standard Plus</p>  <p>3D-разрешение — 0,05–0,35 мм Камера — 1,3 Мп CMOS матрица / диагональ 1/1,8" Время сканирования — 7 с Корпус камер — металл</p>
<p>RangeVision Advanced</p>  <p>3D-разрешение — 0,043–0,3 мм Камера — 2 Мп CCD матрица / диагональ 1/1,8" Сканирование черного Время сканирования — 12 с Корпус камер — металл</p>	<p>RangeVision Premium</p>  <p>3D-разрешение — 0,05–0,18 мм Камера — 5 Мп CCD матрица / диагональ 2/3,0" Сканирование черного Время сканирования — 15 с Корпус камер — металл</p>

3D-сканер Sense

Sense — портативный 3D-сканер от компании 3D Systems, разработчиков серии 3D-принтеров Cube, CubeX и др. (табл. 15) [30].

Сканер имеет автоматические настройки для сканирования малых объектов (до 46 см), средних объектов (до 82 см) и больших объектов (до 183 см).

Калибровку сканер производит автоматически, что увеличивает скорость сканирования и делает его эксплуатацию удобнее и проще. Сканирование происходит путем проецирования инфракрасной сетки на объект и обратного считывания информации.

Объем данных сканирования за один прогон от 0,2 до 3,0 Мб. Sense создает от 20 до 400 тыс. треугольников для каждого нового скана.

В сканере используется лазер I класса, созданный по технологии PrimeSense, безопасный для глаз.

Sense обладает интуитивно понятным пользовательским интерфейсом — специальные навыки не требуются. Сканер автоматически распознает объекты на самых сложных фонах, сканируя только то, что вам нужно.

Выходной формат сканера — STL, PBJ и PLY, что позволит использовать полученные изображения как для 3D-печати, так и для других целей. Сканер подключается к USB-порту компьютера.

Используя приложение Cubify Sculpt, можно комбинировать данные различных сканирований.

Таблица 15

Технические характеристики 3D-сканера Sense

Требования к ОС	Windows 7® (32-bit или 64-bit) Windows 8® (32-bit или 64-bit)
Минимальные требования к ПК	Процессор Intel® Core i5™ или аналог, 2 Гб RAM, разрешение дисплея 1280 × 1024, цветность 32 бит, 4 Гб свободного места на диске
Интерфейс	USB 2.0 / USB 3.0
Максимальное энергопотребление, Вт	2,25
Минимальная область сканирования, м	0,2 × 0,2 × 0,2
Максимальная область сканирования, м	3 × 3 × 3

Размеры, см	17,8 × 12,9 × 3,3
Рабочий диапазон, м	0,35–3
Поле зрения	По горизонтали 45° По вертикали 57,5° По диагонали 69°
Размер изображения (Ш × В), пикс	240 × 320
Максимальная пропускная способность, кадров/с	30
Длина кабеля USB, см	213

3D-сканеры Solutionix

Компания Solutionix – ведущий мировой разработчик и производитель систем 3D-сканирования из Южной Кореи. Отличительной особенностью промышленных 3D-сканеров Solutionix является настраиваемая зона трехмерного сканирования, что обеспечивает высокое качество и точность оцифровки поверхности объектов различной сложности и размера.

Ниже приведены внешний вид и основные характеристики 3D-сканеров линейки Solutionix (табл. 16).

Таблица 16

Внешний вид и основные характеристики 3D-сканеров линейки Solutionix

Solutionix Rexscan 320	Solutionix Rexscan 414
	
<p>Контроль качества, обратное проектирование Разрешение: до 2,0 Мп Угол триангуляции: 10 и 25° Точность: от 0,04 до 0,48 мм Зона сканирования: 45–912 мм Галогенная лампа Бесцветное сканирование Бесконтактный метод</p>	<p>Контроль качества, обратное проектирование Разрешение: 1,4 Мп Угол триангуляции: 10 и 25° Точность: от 0,04 до 0,75 мм Зона сканирования: 50–1175 мм Светодиодная лампа Бесцветное сканирование Бесконтактный метод</p>

<p align="center">Solutionix Rexcan 420</p>  <p>Контроль качества, обратное проектирование Разрешение: до 2,0 Мп Угол триангуляции: 10 и 25° Точность: от 0,04 до 0,71 мм Зона сканирования: 55–1335 мм Светодиодная лампа Бесцветное сканирование Бесконтактный метод</p>	<p align="center">Solutionix Rexcan 450</p>  <p>Контроль качества, обратное проектирование Разрешение: до 5,0 Мп Угол триангуляции: 10 и 25° Точность: от 0,03 до 0,350 мм Зона сканирования: 100–1330 мм Светодиодная лампа Бесцветное сканирование Бесконтактный метод</p>
<p align="center">Solutionix Rexcan 480</p>  <p>Контроль качества, обратное проектирование Разрешение: до 8,0 Мп Угол триангуляции: 10 и 25° Точность: от 0,025 до 0,350 мм Зона сканирования: 100–1330 мм Светодиодная лампа Бесцветное сканирование Бесконтактный метод</p>	<p align="center">Solutionix Rexcan DS2</p>  <p>Стоматология, ювелирное производство Разрешение: 1,3 Мп Угол триангуляции: 15° Точность: 0,05/0,065 мм Две зоны сканирования Светодиодная лампа Бесцветное сканирование Бесконтактный метод</p>
<p align="center">Solutionix Rexcan CS+</p> <p>Стоматология, ювелирное производство Разрешение фотокамеры: 2 Мп 3 зоны сканирования Голубой светодиод Бесцветное сканирование Бесконтактный метод Встроенная рабочая площадка</p>	

3D-сканеры Surphaser

Surphaser — серия лазерных 3D-сканеров от компании Basis Software Inc. (табл. 17). Их отличительными особенностями является беспрецедентно высокая скорость захвата координат точек поверхности (до 1,2 млн т/с), широкий рабочий диапазон (до 50 м) и высокая точность сканирования крупногабаритных объектов.

Таблица 17

Внешний вид и основные характеристики 3D-сканеров линейки Surphaser

<p style="text-align: center;">Surphaser 25HSX SR</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p>Архитектура, промышленность, трехмерный контроль Лазер класса 3R Рабочий диапазон: 0,2–5,0 м Неоднозначность по дальности: 46 м Уровень шума: 0,07 мм на 2 м Зона неопределенности: < 0,3 мм на 3 м Бесконтактный метод</p>	<p style="text-align: center;">Surphaser 25HSX MR_X</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p>Строительство, геодезия, промышленность Лазер класса 3R Рабочий диапазон: 1–30 м Неоднозначность по дальности: 46 м Уровень шума: 0,25 мм на 5 м Зона неопределенности: < 0,7 мм на 15 м Бесконтактный метод</p>
<p style="text-align: center;">Surphaser 25HSX ER XQ</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p>Строительство, геодезия, промышленность Лазер класса 3R Рабочий диапазон: 1,5–50 м Неоднозначность по дальности: 70 м Уровень шума: 0,35 мм на 8 м Зона неопределенности: < 1 мм на 15 м Бесконтактный метод</p>	<p style="text-align: center;">Surphaser 25HSX IR_X</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p>Архитектура, промышленность, трехмерный контроль Лазер класса 3R Рабочий диапазон: 0,4–19 м Неоднозначность по дальности: 46 м Уровень шума: 0,12 мм на 3 м Зона неопределенности: < 0,5 мм на 5 м Бесконтактный метод</p>

3D-сканер Wieland S50

3D-сканер **Wieland S50** — компактный лазерный сканер с широкими возможностями. Сканер идет в 4 вариантах поставки программного обеспечения для любых потребностей и на любой бюджет (рис. 30; 31, см. цв. вкл.) [31].

Сканер позволяет изготавливать изделия из циркония, не имея цельной CAD/CAM системы. На выходе получается STL-файл общепринятого стандарта, который легко можно отправить по электронной почте в ближайшую лабораторию.



Рис. 30. Внешний вид 3D-сканера Wieland S50

Каждый сканер Wieland подвергается строгому контролю качества и проходит полный цикл тестирования, включающего все метрологические проверки, проводимые на реальных случаях из стоматологической практики. Это дает гарантию, что сканеры оцифровывают изображение модели с точностью до 15 мкм.

Сканеры имеют функцию автоматической конфигурации, за счет чего инсталляция проходит по принципу «включай и работай». Встроенный компьютер и предварительно установленные модули DWOS позволяют пользователю начать сканирование менее чем через 30 мин после доставки сканера.

Программа DWOS имеет легкий и удобный в использовании интерфейс, что в сочетании с продвинутыми технологиями сканирования делает сканеры интуитивно понятными и простыми в работе.

Все модели сканеров Wieland имеют встроенную платформу DWOS, которая обеспечивает пользователя прямым доступом ко всем модулям программного обеспечения.

Сканер поставляется с DHS-настройками, которые могут быть использованы для интеграции в рабочую сеть, обеспечивая тем самым эффективную коммуникацию между клиниками, лабораториями, а также внешними приборами.

3D-сканер Zenotec s107

3D-сканер **Zenotec s107** — современный сканер стоматологического назначения, имеет встроенный компьютер с 64-разрядной операционной системой Windows 7, пять осей сканирования, два высокоскоростных датчика для сбора данных и видеокамеру для предварительного просмотра результатов сканирования (рис. 32) [32].

Сканер обеспечивает сканирование моделей и антагонистов, альгинатных и силиконовых оттисков, дизайн индивидуальных абатментов и имплантов.

Технические характеристики:

Программное обеспечение: в комплекте.

Скорость сканирования одного штампика: 35—40 с.

Скорость сканирования: моста из 3 ед. — 120—130 с, Multi die — 30 с.

Камеры: 2 измерительных и 1 видеокамера 1,3 Мп.



Рис. 32. Внешний вид 3D-сканера Zenotec s107

Число точек: 100 000.

Погрешность: 15 мкм.

Число треугольников представления поверхности: 20 000.

Размер области сканирования: 140 × 140 × 140 мм.

Размеры (Ш × Г × В), мм: 430 × 430 × 450.
Вес: 32 кг.

Ассортимент промышленно выпускаемых моделей 3D-сканеров постоянно пополняется. Помимо рассмотренных выше, существуют и иные модели сканеров (табл. 18).

Таблица 18

Перечень основных фирм, производящих 3D-сканеры

3D Systems	MakerBot Industries, LLC
4DDynamics Bvba	NextEngine, Inc.
Aicon	Open Technologies Srl
Artec Group	PicoScan
Basis Software, Inc.	RangeVision
Breuckmann	Roland DGA Corporation
Creaform Inc.	Rubicon Technologies
David 3D Solutions GbR	Sense
Dental Wings inc.	Shining 3D Tech
DotProduct LLC	Smart Optics Sensortechnik GmbH
Faro Technologies UK Ltd	Solutionix Corp.
Fuel 3D Technologies Limited	Surphaser
GOM mbH	Trimble Navigation Limited
Leica Geosystems	ZBot
I Technologies Inc.	

ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ 3D-ОБЪЕКТОВ

Фрезеровально-станочные технологии 3D-печати

Фрезерная резка на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) — это механическая обработка поверхности материала фрезой, используется для изготовления изделий от несложных плоскостных до объемных форм. Фрезерные станки с ЧПУ широко применяют для работы с заготовками из древесины, полимеров, алюминия и его сплавов, меди и др.

Можно выделить следующие виды фрезерных станков с ЧПУ:

— настольные — имеют малые габариты, выполняют широкий спектр операций;

— стационарные — отличаются высокой производительностью и ресурсом. Оборудование рассчитано на длительную интенсивную эксплуатацию, неприхотливо в обслуживании. Предназначено для обработки пластика, дерева и других материалов.

У фрезеровки есть ряд очевидных преимуществ перед лазерной резкой:

— при помощи профильных фрез и граверов можно придавать кромке изделий различные формы и углы наклона;

— фреза не оставляет на кромке обрабатываемых материалов следов нагара, а при финишной обработке способна сделать срез глянцевым и даже зеркальным;

— возможно создание двухмерных и трехмерных объектов.

В настоящее время известно и доступно множество моделей фрезерных станков с ЧПУ [33]. Это станки Rabbit, EXT SGH, Kamach Stone&Metall и др.

Ниже в качестве примера приведено сравнение настольных фрезерных станков с ЧПУ серии Opti BF Vario (табл. 19, с. 92–94) [34].

3D-фрезерная машина Zenotec mini

Ультеракомпактная фрезерная система **Zenotec mini** обеспечивает работу с высокой степенью точности, в том числе при выполнении анатомических реставраций.

В сочетании со сканером и компьютером лаборатория может уместиться на стандартном рабочем столе (рис. 33) [35]. Использование 4-осевой системы, высокоскоростного шпинделя, интегрированной электронной системы управления и программного обеспечения делают систему Zenotec mini идеальной для выполнения многих видов работ. Заготовки из диоксида циркония, пластмассы и воска фрезеруются чисто и с высокой степенью точности.

Систему Zenotec mini отличают возможность работы фрез в шести положениях, а также наличие автоматической системы измерения фрез и определения дефектов. Точность направления оси шпинделя обеспечивает первоклассное качество обрабатываемой поверхности.

Для работы с аппаратом Zenotec mini подходит весь ассортимент материалов Zenotec.

К цифровой системе управления аппаратом прилагается комплект программного обеспечения ZENOTEC mini, включающий профессиональную версию программы Zenotec CAM 3.2 Advance, что позволяет экономить материалы и время.







Рис. 33. Внешний вид 3D-фрезерной машины Zenotec mini

3D-фрезерная установка Zenotec Select

Zenotec Select объединяет фрезерную систему с современной 5-осевой обработкой с преимуществами автоматизированного производства и очень компактными размерами (рис. 34; рис. 35, см. цв. вкл.). Благодаря загрузчику на 8 заготовок обработка различных материалов не представляет собой проблему.

При использовании дополнительной функции мокрого фрезерования можно производить обработку стеклокерамики и кобальт-хромовых сплавов.

Сравнительная таблица настольных фрезерных станков с ЧПУ серии Opti BF Vario

Наименование	Opti BF20 Vario	Opti BF20L Vario	Opti BF30 Vario	Opti BF46 Vario
Внешний вид				
Особенности	<p>Управление по трем или четырем осям одновременно.</p> <p>Шариковые ходовые винты HIWIN по всем трем осям.</p> <p>Точность позиционирования 0,05 мм с винтами скольжения / 0,02 мм с шариковыми винтами.</p> <p>Управление от ПЭВМ.</p> <p>Программирование по стандарту DIN</p> <p>Защита направляющих на всех трех осях.</p> <p>Автоматическое выполнение управляющих программ в G-кодах</p>	<p>Управление по трем или четырем осям одновременно.</p> <p>Точность позиционирования 0,05 мм с винтами скольжения / 0,02 мм с шариковыми винтами.</p> <p>Управление от ПЭВМ.</p> <p>Программирование по стандарту DIN 66 025.</p> <p>Поддержка циклов комплексной обработки</p>	<p>Управление по трем или четырем осям одновременно.</p> <p>Точность позиционирования 0,05 мм с винтами скольжения / 0,02 мм с шариковыми винтами.</p> <p>Управление от ПЭВМ.</p> <p>Программирование по стандарту DIN 66 025</p>	<p>Управление по трем или четырем осям одновременно.</p> <p>Фрезерование карманов и пазов, сверление, зенкование.</p> <p>Входящее в комплект поставки ПО NCDrive XT позволяет исполнять управляющие программы в G-кодах.</p> <p>Автоматическое выполнение управляющих программ в G-кодах.</p> <p>Скорость подачи по осям 700 мм/мин, в модификации PRO с шариковыми ходовыми винтами HIWIN — 1200 мм/мин.</p> <p>Перемещение по оси X — 500 мм, по оси Y — 250 мм, по оси Z — 540 мм</p>

Технические характеристики

Поставщик	Optimum Maschinen		
Фирма-производитель	Германия		
Страна-производитель	КНР		
Тип привода	Электрический		
Исполнение	—	—	Настольный
Скорость вращения, об/мин	90–3000	90–3000	200–3100
Количество скоростей	2 диапазона	2 диапазона	3 диапазона
Макс. \varnothing сверления, мм	16	16	30
Макс. \varnothing фрезерования, мм	63	63	75
Вылет оси шпинделя, мм	185	185	200
Конец шпинделя	МК2	МК2/М10	МК3/М12 (ISO 30 под заказ)
Размер стола, мм	500 × 180	700 × 180	750 × 210
Т-образные пазы на столе: количество/размер/дистанция	2/12/63	2/12/63	2/12/63
			ISO 40 / М16
			850 × 240
			200–3100
			3 диапазона
			24
			80
			260
			850 × 240
			3/18/80

Наименование	Орті ВР20 Vario	Орті ВР20L Vario	Орті ВР30 Vario	Орті ВР46 Vario
Технические характеристики				
Макс. расстояние от шпинделя до стола, мм	н/д	н/д	80—470	80—570
Перемещение фрезерного стола по осям X и Y, мм	280 × 175	480 × 175	450 × 200	500 × 250
Длина, мм	950	1150	1350	1450
Ширина, мм	750	750	1050	1100
Высота, мм	1150	1150	1500	1650
Вес, кг	112	125	290	510
Электропитание, В/Гц	2 × 220/50	220/50	3 × 380/50	220/50
Потребляемая мощность, кВт	1,1	1,1	3,7	3,7
Мощность двигателя, кВт	0,85	0,85	2,2	2,2

Примечание: н/д — нет данных.



Рис. 34. Внешний вид 3D-фрезерной машины Zenotec Select

Состав CAD/CAM-системы на основе Zenotec Select:

- фрезерная установка Zenotec Select;
- единовременное пятиосевое фрезерование;
- автоматизированная система с интегрированным загрузчиком на 8 заготовок (опция);
- высокоскоростной шпиндель с максимальной скоростью в 60 тыс. об/мин на четырех гибридных подшипниках;
- держатель на 16 фрез с автоматической системой измерения износа и замены фрезы;
- мокрое фрезерование;
- настольное размещение аппарата.

Технические характеристики:

Количество фрезеровальных станций: 1 (сухое/мокрое).

Тип шпинделя: высокоскоростной шпиндель на четырех гибридных подшипниках, максимальная скорость вращения 60 тыс. об/мин.

Держатель фрезы: пневматический патрон для держания фрез с хвостовиком в 3 мм.

Гнезда для фрез: 16, автоматическая система контроля замены фрез.

Удаленное техническое обслуживание: есть.

Производительность работы: приблизительно 2 диска в день.

Используемые материалы: диоксид циркония, диоксид алюминия, стеклокерамика, металл (кобальт-хром сплавы).

Показания: изготовление мостов длиной до 14 ед. в зависимости от материала.

Угол наклона оси вращения: $\pm 180^\circ$ (оси А) и $\pm 30^\circ$ (оси В).

Стабильность позиционирования: $\pm 0,003$ мм.

Настройка с помощью удаленного доступа: есть.

Требуемое давление сжатого воздуха: > 7 атм.

Автоматическая замена фрезы / контроль поломок: есть.

Напряжение, частота: 230 В, 50 Гц.

Вес: 75 кг (без загрузчика), 95 кг (с загрузчиком).

Габариты (Ш \times В \times Г), см: 49 \times 54 \times 44,5 (без загрузчика); 69,2 \times 54 \times 44,5 (с загрузчиком).

Установки газовой и плазменной резки с числовым программным управлением

Способ обработки металлических изделий основан на свойстве металлов, нагретых до температуры воспламенения, гореть в технически чистом кислороде [36]. При *кислородной резке* на нагретый до температуры 1200–1300 °С металл направляется струя кислорода, прожигающая и разрезающая металл. Образующиеся оксиды железа в расплавленном состоянии вытекают и выдуваются из полости реза.

Технология *плазменной резки* основана на использовании воздушно-плазменной дуги [36]. Процесс резки состоит в расплавлении и выдувании расплавленного металла с образованием полости реза, получаемой при перемещении плазменного резака относительно разрезаемого материала (металла). Температура плазмы в дуге составляет от 5 000 до 30 000 °С.

Плазменная резка использует сжатую электрическую дугу, которую обдувает газ. Обдувая дугу, газ нагревается и ионизируется. Заряженные частицы преобразуются в плотный поток плазмы с температурой до 15000 °С.

Резка может осуществляться плазменной дугой и плазменной струей. Плазменная резка более производительная и более качественная, чем газокислородная. Если речь идет о резке металлов большой толщины или о резке титана, плазменная резка уступает кислородной. Если надо резать цветные металлы (особенно алюминий), то без плазменной резки не обойтись.

В плазменной резке применяют активные и неактивные газы. Активные — это кислород и воздух, а неактивные — азот, аргон, водород. Применение активных газов требуется при резке черных металлов, а неактивные газы (и их смеси) используются при резке цветных металлов и сплавов.

Польско-германская компания ESKERT больше 20 лет выпускает установки с ЧПУ, предназначенные для плазменной, газовой, лазерной и гидроабразивной резки.

Основные характеристики установок ESKERT [36]:

- управление плазмогенератором и газовой консолью осуществляется через систему ЧПУ;
- ведется статистика и расчет работы расходных материалов. Виден оставшийся рабочий ресурс расходных материалов;
- можно изменять ширину реза в зависимости от износа расходных материалов.

Установки гидроабразивной резки с числовым программным управлением

Гидроабразивная резка — универсальный способ раскроя материалов, с помощью которого могут обрабатываться любые виды материалов, в том числе черные и цветные металлы и сплавы толщиной до 300 мм [36]. Принцип работы гидроабразивной резки состоит в разделении материала при помощи водяной струи высокого давления с абразивом.

Вода, сжатая насосом-мультипликатором до давления 4150 атм, проходит через водяное сопло, попадает в смесительную камеру, куда через абразивное сопло подается абразив: гранатовый песок с частицами размером около 0,4 мм. Далее смесь воды и абразива проходит через твердосплавное сопло с внутренним диаметром 1 мм и со скоростью около 1200 м/с попадает на поверхность разрезаемого материала.

После резки остаточная энергия струи гасится водяной ловушкой. Координатный стол позволяет перемещать режущую головку с высокой точностью в трех координатах.

Резка экологически чистая и экономичная. Основные расходные материалы — вода, электроэнергия, абразив.

Преимущества гидроабразивной резки:

- отсутствие теплового воздействия на материал в зоне пропила — тепло в процессе резки уносится водой, нет оксидов, окалины, деформирования краев заготовки;
- способность воспроизводить сложные контуры и профили — программное обеспечение, поставляемое со станком, работает с форматами файлов основных инженерных программ (AutoCAD, CorelDraw и т. д.);
- высокое качество реза — финишную поверхность можно получить с шероховатостью Ra 0,5—1,5 мкм, поэтому зачастую дополнительная обработка не требуется;

— технологичность процесса — инструмент резки (струя воды) не нуждается в переточке. Возможна резка от одного насоса высокого давления одновременно двумя и более режущими головками на одном столе или несколькими головками на разных столах;

— экономичность процесса — относительно высокая скорость резания. Малая ширина реза позволяет экономить дефицитные материалы;

— безопасность — процесс резки взрыво- и пожаробезопасен. Отсутствие радиационного или иного излучения, токсичных газов, вредных отходов. Уровень шума колеблется в пределах 85—95 дБ.

Лазерно-станочные технологии 3D-печати

К настоящему времени сформировались такие направления лазерных технологий, как 3D-формообразование, лазерная наплавка, лазерная очистка поверхностей, лазерная закалка и отжиг, лазерное текстурирование поверхностей и др.

Процесс обработки материалов лазерным излучением обусловлен преобразованием энергии оптического излучения в тепловую, что приводит к плавлению материала и выбрасыванию его с поверхности мишени в виде частиц расплава или испарению и выносу из зоны облучения в виде пара (так называемая абляция) [37].

Лазерное воздействие является точечным и бесконтактным. Отсутствуют силы отдачи, характерные для механической обработки. Это позволяет обрабатывать миниатюрные детали с высокой точностью без приложения механических сил. Значительно упрощается система крепления детали.

Термическое воздействие на материал вне зоны лазерной обработки сосредоточено в узком слое микронных размеров. При механической обработке столь малое влияние недостижимо.

Степень воздействия лазерного излучения на материал зависит от его способности поглощать излучение на длине волны лазера. При механической обработке необходимо подбирать инструмент в зависимости от твердости и вязкости обрабатываемого материала. Поэтому традиционными методами трудно обрабатывать твердые и хрупкие материалы, такие как керамика.

С помощью лазерной обработки, в отличие от традиционной, можно достигнуть высокого качества обработки всего за один проход. Кромка лазерного реза может быть гладкой и чистой, последующей обработки не требуется.

Несмотря на то что механические методы обработки дают поверхность обработки очень высокого качества, с помощью лазера можно достигнуть шероховатости поверхности в десятки нанометров.

Лазерные технологии могут осуществлять трехмерную обработку деталей. Комбинация волоконной передачи лазерного излучения и технологий робототехники позволяет создавать технологические системы с большим количеством степеней свободы.

Лазерные методы обработки чувствительны к фокусировке лазерного луча. Размер лазерного пятна в фокусе объектива для газовых CO_2 -лазеров с длиной волны 10,6 мкм составляет десятки микрометров при фокусном расстоянии объектива около 100 мм, а плотность мощности при мощности излучения 1 кВт и диаметре пятна в фокусе 100 мкм достигает 30 МВт/см². После фокуса лазерный луч расходится, плотность мощности резко снижается, поэтому глубина реза ограничена областью фокусировки луча.

Лазерные технологии быстро прогрессируют. Новые технологические установки оснащаются лазерами с перестраиваемой длиной волны и изменяемой в широких пределах длительностью импульсов, что делает их универсальными для решения различных технологических задач и позволяет обрабатывать широкий спектр материалов.

Наиболее распространенные технологические процессы с использованием лазеров можно разделить на пять категорий, существенно различающихся по физике процесса и требованиям к источнику лазерного излучения:

- резка неметаллов и металлов;
- сварка;
- сверление отверстий;
- маркировка и гравировка;
- микрообработка.

УСТРОЙСТВА ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ПЕЧАТИ 3D-ОБЪЕКТОВ

3D-мониторы

Стереодисплей — устройство визуального отображения информации, позволяющее за счет стереоскопического эффекта создавать у зрителя иллюзию наличия реального объема у демонстрируемых объектов [42].

Стереоскопия — один из способов формирования объемного изображения, поэтому не следует отождествлять понятия «стереодисплей» и «трехмерный дисплей». Стереодисплей является трехмерным дисплеем, но не всякий трехмерный дисплей является стереоскопическим (определение «трехмерный» в отношении средств вывода графической информации связано с употреблением термина «3D» в отношении как стереоскопических технологий, так и псевдотрехмерной компьютерной графики, несмотря на различие сути терминов «объемность» и «стереоскопичность»).

Единственным методом для демонстрации полноценного 3D-изображения является **голограмма** (от греч. ὅλος — «целый, полный, весь» и γράφω — «пишу»). Голограмму можно получить с использованием лазерных технологий. Преимущества голограммы в том, что даже малый ее фрагмент несет информацию обо всем объекте, хотя и с потерей качества. Недостаток голограмм в том, что пока их трудно масштабировать или переводить в электронный формат.

Стереоскопические 3D-дисплеи формируют отдельные изображения для каждого глаза. Такой принцип используется в стереоскопах, известных еще с начала XIX в.

Объемные дисплеи используют различные физические механизмы для показа светящихся точек в пределах некоторого объема.

Стереоскопические дисплеи делятся на два типа.

Автостереоскопические дисплеи — дисплеи, не нуждающиеся в дополнительных аксессуарах для головы или глаз (таких, как стереочки или шлемы виртуальной реальности) и способные самостоятельно формировать стереоэффект путем направления нужного пучка света в нужный глаз. Как правило, для этого применяются микролинзы Френеля, выполняющие роль светоделителей, и специальные барьерные сетки, чтобы каждый глаз зрителя видел только тот столбец пикселей, который предназначен для него.

У данного метода имеется множество недостатков. В числе прочих стоит отметить выход зрителя из нужного ракурса или выход из ограниченной «зоны безопасного просмотра», что приводит к разрушению эффекта стерео, а разрешение изображения по горизонтали значительно уменьшается. Компенсировать эти потери четкости можно избыточ-

ной детализацией, например, в телевизорах UHD TV зона комфортного просмотра значительно шире, правда качество 3D-картинки падает до 720p, лишь телевизоры с матрицей 8K дают в 3D-картинке FullHD.

Производители стереодисплеев продолжают разрабатывать технологии, позволяющие уменьшить эти недостатки. Philips и NewSight разработали свои технологии многоакурсных дисплеев: WOWvx и MultiView. Компания SeeReal Technologies, в свою очередь, встраивает в дисплеи подвижный светоделитель и детектор положения головы зрителя, перестраивая изображение под нужный угол зрения.

В табл. 20 проведено сравнение характеристик современных 3D-мониторов [39, 42].

Второй тип стереоскопических дисплеев — это дисплеи, требующие использования вспомогательных устройств (очков) для создания зрительного стереоэффекта.

Вспомогательные очки подразделяются на пассивные и активные.

В отличие от активной системы, пассивные очки не требуют управляющего сигнала и элементов питания. Для разделения ракурсов используется поляризованный свет. Подобные устройства делятся на поляризационные очки с линейной и круговой поляризацией.

Поляризационные очки с линейной поляризацией применяются также в кинотеатрах IMAX. На специальном экране формируются одновременно оба изображения для левого и правого глаза. Очки пропускают разные изображения для разных глаз (вертикальная и горизонтальная поляризация). Недостатком поляризационных очков с линейной поляризацией является то, что даже при незначительном наклоне головы зрителя качество (яркость) воспринимаемого изображения резко снижается. Снижение яркости изображения для поляризационных очков составляет примерно 24 %, разрешение остается тем же (для систем с двумя ЖК-панелями: Planar, StereoPixel) или снижается вдвое (Zalman).

Поляризационная система (экран + очки) с круговой поляризацией. На экране монитора каждая строка изображения поляризуется проходящий свет по часовой стрелке или против (циркулярная или круговая поляризация). Очки имеют такой же круговой поляризатор на каждом стекле. Таким образом создается чересстрочное изображение для каждого глаза отдельно. Снижения яркости нет даже при сильных наклонах головы. Главный разработчик технологии – компания LG. Недостаток таких очков — высокая стоимость.

Очки с окрашенными стеклами. Для восприятия объемных изображений используют очки, каждое из стекол которых пропускает световой поток в определенной неперекрывающейся (в идеале) полосе спектра. Соответственно, монитор должен раздельно воспроизводить на экране окрашенные участки изображения, одно из которых соответствует восприятию картины правым глазом, а дру-

гое — левым. Мозг человека суммирует оба изображения и воспринимает его как объемное. В последнее время такой способ восприятия 3D-изображения потерял актуальность. Его единственное преимущество заключается в том, что очки стоят очень дешево.

Активные очки — затворные очки (жидкокристаллические или поляризационные) с линейной поляризацией, синхронизированные с дисплеем и поочередно затемняющиеся с той же частотой, с которой дисплей выводит изображения (кадры) для каждого глаза.

За счет эффекта инерции зрения в мозгу зрителя формируется цельное изображение (необходимо иметь дисплей с удвоенной частотой кадровой развертки 120 или даже 200 Гц, чтобы для каждого глаза частота обновления изображения составляла 60 или 100 Гц). В свою очередь, повышение частоты кадровой развертки требует использования более дорогих высокочастотных технологий, что ощутимо сказывается на стоимости монитора.

Снижение яркости изображения для очков затворного типа составляет примерно 80 % (наклон головы 30°), перекрестные искажения больше, чем у пассивной системы. Разрешение для каждого глаза остается неизменным. Недостаток использования такого рода очков — значительное повышение потребления электроэнергии. Главной разработчик технологии — компания Samsung.





Термин «3D-дисплей» употребляется и в отношении так называемых **объемных или воксельных дисплеев**, где объемное изображение формируется (при помощи различных физических механизмов) из светящихся точек в пределах некоторого объема.

Такие дисплеи вместо пикселей оперируют **вокселями**. Объемные дисплеи строятся на разных принципах. Например, могут состоять из множества плоскостей, формирующих изображение, которые расположены одна над другой; одной качающейся плоскости; вращающихся плоских или криволинейных панелей.

Дисплеи на основе качающихся плоскостей и вращающихся панелей используют эффект зрительной инерции для достижения 3D-эффекта. За счет этого зритель воспринимает все положения поверхности как одновременно и в результате видит вместо одной поверхности сплошное тело.

Трехмерный куб на основе светодиодов для демонстрации динамических объемных картин создан китайской компанией Seekway. Такой куб способен демонстрировать 3D-изображения на скорости 30 fps. Куб представляет собой трехмерную матрицу 16 × 16 × 16 из 4096 разноцветных RGB-светодиодов. Поскольку количество отображаемых точек ничтожно мало, подобное средство отображения информации нельзя воспринимать всерьез. Однако в перспективе, с появлением и совершенствованием субминиатюрных светодиодных излучателей на органических или неорганических полупроводниках, могут появиться более продвинутые модели.

Сравнительные характеристики некоторых 3D-мониторов*





Наименование	27" ЖК-монитор ASUS VG278HE BK	27" ЖК-монитор AOC D2769VH	24" ЖК-монитор BenQ XL2411Z с поворотом экрана	24" ЖК-монитор Acer × UM. FG6EE.B07× GN246HL Bbid
Внешний вид 3D-монитора				
Основные характеристики				
Производитель	ASUS	AOC	BenQ	Acer
Модель	VG278HE	D2769VH	XL2411Z	GN246HLBbid
Комплект поставки и опции				
Комплект поставки	Кабель Dual Link DVI, кабель VGA, аудиокабель, кабель питания, CD-диск	3D-очки, CD-диск, аудиокабель, кабель питания, кабель VGA HDMI, кабель VGA	Кабель Dual Link DVI, кабель VGA, кабель пи- тания, CD-диск	Кабель питания, кабель VGA, кабель Dual Link DVI, CD-диск
ПО в комплекте	—	Стереодрайверы TriDef 3D	—	—
Аудио				
Колонки	Встроенные; 2 × 3 Вт	Встроенные	—	—

* " — дюймы; 1 дюйм — 25,2 мм.

Наименование	27" ЖК-монитор ASUS VG278HE BK	27" ЖК-монитор AOC D2769VH	24" ЖК-монитор ViewQ XL2411Z с поворотом экрана	24" ЖК-монитор Acer × UM. FG6EE.B07× GN246HL Bbid
	Матрица			
Глубина цвета матрицы	6 бит/цвет + Hi-FRC (16,7 млн цветов)	—	—	—
Яркость матрицы	300 кд/м ²	250 кд/м ²	350 кд/м ²	350 кд/м ²
Контрастность LCD-матрицы	50M : 1 – ASCR (ASUS Smart Contrast Ratio)	1000 : 1 – статическая, 20M : 1 – динамическая (DCR)	1000 : 1 – статическая, 12M : 1 – динамическая	100M : 1 (ACM – adaptive contrast management)
Профили коррекции изображения	Режим динамической контрастности, SPLENDID, sRGB, 3 предустановленных оттенка цвета кожи	Режим динамической контрастности	Режим динамической контрастности, Senseye 3	Режим динамической контрастности, динамической цветокоррекции
Время отклика	2 мс GtG	5 мс GtG	1 мс GtG	1 мс
Формат матрицы	16 : 9	16 : 9	16 : 9	16 : 9
Разрешение экрана	1920 × 1080	1920 × 1080	1920 × 1080	1920 × 1080
Угол обзора LCD-матрицы	170° по горизонтали, 160° по вертикали при CR >10	178° по горизонтали, 178° по вертикали при CR >10. В 3D-режиме 24° по вертикали при CR >10	170° по горизонтали, 160° по вертикали при CR >10	170° по горизонтали, 160° по вертикали
Цветовой охват	—	—	72 %	—

Экран			
Диагональ	27" (68,6 см)	27" (68,6 см)	24" (61 см)
Тип LCD-матрицы	TN	AH-IPS	TN
Подсветка LCD-матрицы	Светодиодная подсветка		
Поверхность экрана	Матовая	Глянцевая (полуглянцевая)	Матовая
Интерфейс, разъемы и выходы			
Интерфейс монитора	HDMI, VGA (D-sub), Dual Link DVI, аудиовход 3,5 мм, разъем 3,5 мм для наушников	2×HDMI, VGA (D-sub), аудиовход 3,5 мм, разъем 3,5 мм для наушников	Dual Link DVI, HDMI, VGA (D-sub), разъем 3,5 мм для наушников (только для HDMI)
Поддержка HDCP	Есть	Есть	–
Управление	Механические кнопки		
Корпус и подставка			
Блок питания	Встроенный	Встроенный	Внешний
Крепление к стене	VESA 100 × 100 мм	VESA 75 × 75 мм	VESA 100 × 100 мм
Питание			
Потребление энергии	65 Вт; в режиме ожидания 1 Вт	35 Вт; в режиме ожидания 0,5 Вт	36 Вт; в режиме ожидания 0,5 Вт

Наименование	27" ЖК-монитор ASUS VG278HE BK	27" ЖК-монитор AOC D2769VH	24" ЖК-монитор BenQ XL2411Z с поворотом экрана	24" ЖК-монитор Acer × UM.FG6EE.B07× GN246HL Bbid
Совместимость				
3D	Активное (затворные очки, NVIDIA GeForce 3D Vision 2). Поддержка 144 Гц, NVIDIA 3D LightBoost	Пассивное (поляризационные очки)	Активное (затворные очки, NVIDIA GeForce 3D Vision 2)	Активное (затворные очки, NVIDIA GeForce 3D Vision 2). Поддержка 144 Гц, NVIDIA 3D LightBoost
Поддержка HDMI 1.4	Есть	—	—	—
Прочие характеристики				
Размеры (Ш × В × Г), мм	643 × 438 × 250 — с подставкой, 643 × 386 × 59,5 — без подставки	622 × 449 × 130	570 × 431 × 223 — с подставкой; 570 × 347 × 63 — без подставки	565 × 401 × 179
Вес, кг	8	5	6	3,8 с подставкой

Наименование	29,8" ЖК-монитор NEC SVREF301 Spectra View Reference 301 с пов. экрана	30" ЖК-монитор DELL U3014 <347735>	27" ЖК-монитор PHILIPS 278G4DHSD/00/01	29,8" ЖК-монитор NEC PA302W-BK с поворотом экрана
Внешний вид 3D-монитора				
Основные характеристики				
Производитель	NEC	DELL	Philips	NEC
Модель	Reference 301	U3014	278G4DHSD	PA302W-BK
Описание	Широкоформатный ЖК-дисплей	–	Дисплей с подсветкой Ambilight	–
Комплект поставки и опции				
Комплект поставки	Козырек, кабели DVI, питания, DisplayPort, USB, CD-диск	Кабели питания, DVI, кабель DisplayPort, USB 3.0, CD-диск	3D-очки, кабель HDMI, CD-диск	Кабели DisplayPort, Dual Link DVI, питание, USB
ПО в комплекте	SpectraView Profiler	Dell Display Manager	Стереодрайверы TriDef 3D	–
Матрица				
Глубина цвета матрицы	8 бит/цвет + FRC (1,07 млрд цветов)	10 бит/цвет (1,07 млрд цветов)	6 бит/цвет + A-FRC (16,7 млн цветов)	–

Наименование	29,8" ЖК-монитор NEC SVREF301 SpectraView Reference 301 с пов. экрана	30" ЖК-монитор DELL U3014 <347735>	27" ЖК-монитор PHILIPS 278C4HSD/00/01	29,8" ЖК-монитор NEC RA302W-BK с поворотом экрана
Цветопередача	—	Delta E <2	—	—
Яркость матрицы	350 кд/м ²	350 кд/м ² номин., 50 кд/м ² мин	250 кд/м ²	340 кд/м ²
Контрастность LCD-матрицы	1000 : 1 — статическая	1000 : 1 статическая, 2M : 1 динамическая	1000 : 1 статическая, 20M : 1 динамическая (SmartContrast)	1000 : 1 статическая
Профили коррекции изображения	ПО SpectraView Profiler для калибровки монитора	Режим динамической контрастности	Режим динамической контрастности	ПО MultiProfiler
Время отклика	6 мс GtG, 12 мс — полное (6 мс white/black; 6 мс black/white)	6 мс GtG	14 мс — типичное; 7 мс — SmartResponse в режиме 2D	6 мс
Формат матрицы	16 : 10	16 : 10	16 : 9	16 : 10
Разрешение экрана	2560 × 1600	2560 × 1600	1920 × 1080	2560 × 1600
Угол обзора LCD-матрицы	178° по горизонтали, 178° по вертикали при CR >10	178° по горизонтали, 178° по вертикали, 178° по вертикали при CR >10	178° по горизонтали, 178° по вертикали при CR >10. Просмотр 3D 60° при 3D CT <10	178° по горизонтали, 178° по вертикали при CR >10
Цветовой охват	106,6 % AdobeRGB	99 % AdobeRGB, 100 % sRGB	—	99,3 % Adobe RGB; 94,8 % NTSC; 146,4 % sRGB
Таблица пересчета цветов (LUT)	14-bit 3D LUT	14-bit 3D LUT	—	14-bit 3D LUT

Экран				
Диагональ	29,8" (75,7 см)	30" (76,2 см)	27" (68,6 см)	29,8" (75,7 см)
Тип LCD-матрицы	P-IPS	АН-IPS	АН-IPS	АН-IPS
Подсветка матрицы	Традиционная (CCFL)	Светодиодная (GB-R LED)	Белые светодиоды (WLED)	Светодиодная (GB-R LED)
Поверхность экрана	Матовая	Матовая	Глянцевая	Матовая
Интерфейсы, разъемы и выходы				
Интерфейс монитора	2×DisplayPort, 2×DVI	DisplayPort, Dual Link DVI, HDMI, Mini DisplayPort, Выход DisplayPort, разъем 3,5 мм для наушников	3×HDMI, VGA (D-sub), разъем 3,5 мм для наушников (только для HDMI)	DisplayPort, Dual Link DVI, HDMI, Mini DisplayPort
Подключение нескольких мониторов через порт видеокарты	–	DisplayPort 1.2 MST (Multi-stream transport), выход DisplayPort	–	–
Слоты для карт памяти	–	SD, MiniSD, MS, MS PRO, MMC	–	–
Поддержка HDCP	–	Есть	–	Есть
USB-концентратор	3-портовый	4 порта USB 3.0	4 порта USB 3.0	3 порта USB 2.0
Управление	Механические кнопки	Сенсорные кнопки	Механические кнопки	Механические кнопки

Наименование	29,8" ЖК-монитор NEC SV/REF301 Spectra View Reference 301 с пов. экрана	30" ЖК-монитор DELL U3014 <347735>	27" ЖК-монитор PHILIPS 278G4HSD/00/01	29,8" ЖК-монитор NEC PA302W-BK с поворотом экрана
«Картинка-в-картинке»	Есть	—	—	Есть
Корпус и подставка				
Блок питания	Встроенный	Встроенный	Внешний	Встроенный
Крепление к стене	VESA 100, VESA 200×100 мм	VESA 100 × 100 мм	Нет	VESA 100, VESA 200 × 100 мм
Питание				
Потребление энергии, Вт	155 максимальное; 1 в режиме ожидания	120 максимальное; 60 номинальное; 0,5 в режиме ожидания	26; в режиме ожидания — 0,5	87; 1,4 в режиме ожидания
Прочие характеристики				
Прочее	—	—	На стену за дисплеем проецируется изображение экрана	—
Размеры (Ш × В × Г), мм	688 × 466 × 302; 688 × 616 × 302	690 × 483 × 201; 690 × 573 × 201	623 × 471 × 197 – с подставкой; 623 × 376 × 44 – без подставки	688 × 466 × 302 и 688 × 616 × 302 – с подставкой; 688 × 447 × 82 – без подставки
Вес, кг	18,8	7,35 без подставки	5,44 с подставкой; 5 без подставки	17 с подставкой; 10,7 без подставки

27" ЖК-монитор ASUS VG278HE BK (LCD, Wide, 1920 x 1080, D-Sub, DL DVI, HDMI, 2D/3D)

3D-монитор **ASUS VG278HE** благодаря очкам затворного типа позволит наблюдать на экране монитора трехмерную графику Full HD качества на большом 27-дюймовом экране [39]. LCD монитор ASUS VG278HE создан на базе TN матрицы формата 16 : 9 с разрешением 1920 × 1080 пикселей и малым временем отклика в 2 мс GtG. В мониторе предусмотрена подставка, позволяющая регулировать положение экрана по трем направлениям: наклонять его в диапазоне углов от 5° до 15°, вращать на 150°, поднимать и опускать на 100 мм. Цифровой HDMI интерфейс позволит подключать к монитору внешние устройства и передавать видеосигнал высокого качества вместе со звуком по одному кабелю.

27" ЖК-монитор PHILIPS 278G4DHSD / 00 / 01 (LCD, Wide, 1920 x 1080, D-Sub, HDMI, 2D/3D, USB 3.0 Hub)

ЖК монитор **Philips 278G4DHSD** создан на базе AH-IPS матрицы со временем отклика 14 мс, обеспечивающей широкие углы обзора и превосходную цветопередачу [39]. Большой 27-дюймовый WLED-экран формата 16 : 9 с разрешением 1920 × 1080 пикселей и подсветкой Ambiglow позволяет просматривать изображения высокой детализации.

За таким экраном удобно редактировать фото- и видеоматериалы благодаря входящим в комплект поставки поляризационным 3D-очкам. В арсенале монитора имеется 4-портовый концентратор USB 3.0 и три цифровых HDMI коннектора. Эргономичная подставка позволяет выбрать оптимальное для глаз положение экрана, наклоня экран в диапазоне от -5° до +20°.

3D-монитор Samsung 2233RZ

3D-монитор **Samsung 2233RZ** с диагональю 22". Частота развертки максимальная 120 Гц. Высокая четкость и контрастность картинки позволяют ощутить реалистичность объектов на экране [39].

Основные характеристики:

Диагональ монитора: 22"

Соотношение сторон: 16 : 10.

Разрешение: 1680 × 1050.

Частота кадров: 56—75, 120 Гц.

Динамический контраст: 20 000 : 1.

Количество цветов: 16,7 млн.

Размер видимой области экрана, мм: 473,76 × 296.

Видеовходы: DVI-D (Digital Interface).

Размер без подставки (Ш × Г × В), см: 52 × 37,3 × 7,11.

Размер с подставкой (Ш × Г × В), см: 52 × 42,1 × 21.

Разработками стереодисплеев разных типов на сегодняшний день занимаются множество компаний: Acer, Alioscopy, AOC, Apple, Asus, BenQ, 3D Icon, DEL, Dimension Technologies Inc., Fraunhofer HHI, Holografika, i-Art, Magnetic3D, NEC, NewSight, Philips, Samsung, Sharp, StereoPixel, DDD, SeeFront, SeeReal Technologies, Spatial View Inc., Tridality, Viewsonic, VisuMotion, Zero Creative (xyZ) и др.

Отметим, что в качестве 3D-мониторов также могут быть использованы 3D-телевизоры, изложение свойств которых здесь не предусмотрено.

3D-принтеры

Чтобы удовлетворить требования пациентов и увеличить скорость потокового обслуживания, клиники эстетической стоматологии активно внедряют в процесс изготовления зубных протезов 3D-принтеры [5]. Такие принтеры эффективнее и производительнее традиционных стоматологических фрезерных станков, они быстро и точно изготавливают формы для отливки зубов, а также сами зубы и коронки с учетом всех анатомических особенностей ротовой полости пациента.

Все операции, связанные с печатью протезов, происходят в 3D-принтере автоматически. В результате лаборант получает готовый каркас с отличным прилеганием, не используя электрошпатель или другие инструменты, так как всю работу за него выполняет 3D-принтер.

Виды 3D-принтеров

Широко распространены 3D-принтеры, формирующие объект из расплавленного ABS-пластика [38]. Существуют и другие виды 3D-принтеров, например принтеры, формирующие предмет из гипса или печатающие предмет экструдером послойно. Есть системы, работающие на специальном полимере и формирующие предмет лазером.

3D-принтеры, работающие с ABS-пластиком, развиваются наиболее динамично и могут быть использованы как настольные устройства для производства. Такие принтеры состоят из следующих основных узлов:

- корпус;
- направляющие;
- шаговые двигатели;

- печатающая головка;
- блок питания;
- контроллеры.

За исключением печатающей головки основные узлы конструкции напоминают классическую схему станка с частотно-программным управлением для гравировки или фрезеровки.

От работы направляющих элементов зависит точность печати на принтере. Печатающая головка, экструдер, подает расплав из ABS-пластика. В ней есть шаговый электродвигатель, нагревательный элемент, датчик температуры, вентилятор и сопло.

Контроллеры управляют шаговыми электродвигателями, нагревательными элементами, подачей ABS-пластика.

В России широкое распространение получили 3D-принтеры компаний Fortus, Connex, Eden, Dimension, uPrint, Mojo и др.

Ниже приведены характеристики некоторых персональных и профессиональных 3D-принтеров (табл. 21), а на рис. 36 (см. цв. вкл.) представлены наиболее доступные модели 3D-принтеров [38]:

Персональные 3D-принтеры:

PICASO 3D Designer
 LeapFrog Creatr 2head
 MakerBot Replicator 2
 Felix 2.0
 CubeX & Cube 3D
 MakerBot Replicator 2X
 Rostock MAX
 Solidoodle 2
 Solidoodle 3

Профессиональные 3D-принтеры ProJet:

ProJet 1000
 ProJet 1500
 ProJet 5000
 ProJet CP 3500
 ProJet SD 3500
 ProJet CPX 3500

Профессиональные 3D-принтеры Zprinter:

ZPrinter 150
 ZPrinter 250
 Zprinter 450 Цветной
 Zprinter 650 Цветной
 Zprinter 850 Цветной

Сравнительная таблица характеристик 3D-принтеров *

Производитель	Проект RepRap	Solidoodle	3D Systems	PP3DP Company	Ultimaking Ltd.	MakerBot Industries
Модель	Mendel (второе поколение)	SD1001-A	Cube	UP1 Personal Portable 3D Printer	Ultimaker	Replicator
Технология	Термопластическая экструзия					
Размеры и вес	20 × 16 × 14", 16 фунтов	11,75×11,5×11,75", 17 фунтов	14 × 14 × 18", 9 фунтов	9,5×10,5×14", 11 фунтов	14 × 14 × 15,3", 18 фунтов	18,4×15 ×12,6", 30 фунтов
Рабочая площадь	8 × 8 × 5,5"	6 × 6 × 6"	5,5 × 5,5 × 5,5"	5,5 × 5,5 × 5,3"	8,25×8,25×8,25"	8,9 × 5,7 × 5,9"
Материалы	PLA, HDPE, ABS и др.; диаметр нити 0,125"	ABS, PLA и другие виды пластиков	10 цветов ABS; по \$ 49 за картридж	ABS	PLA и ABS. Также HDPE, PP, PMMA	ABS, PLA, другие виды пластика
Стоимость материалов	\$ 7 – \$ 14 за фунт	Низкая, в том числе \$ 22 за фунт ABS	По \$ 49 за картридж ABS	\$ 22/фунт	Фирменный PLA по \$ 14 за фунт; подходит любой материал	PLA/ABS: \$ 22/\$ 25 за фунт; водорастворимый PVA: \$ 40 за фунт
Скорость печати	Медленная, до 0,92" в час	Медленная	Медленная (неизвестно)	Медленная	150 мм/с (в 5 раз быстрее аналогов конкурентов)	40 мм/с; примерно 24 см/ч

Точность	Сопло 0,020"; миним. размер элемента 0,080"; точность позиционирования 0,004"; толщина слоя 0,012"	Сопло 0,014"; толщина слоя 0,012"; (опция 0,004"); точность позиционирования X-Y $\pm 0,004$ "	Толщина слоя 0,010" (неизвестно)	Толщина слоя от 0,010 до 0,014"; точность позиционирования $\pm 0,008$ "	По осям X-Y $\pm 0,002$ "; толщина слоя 0,0004" (10 мкм)	2,5 мкм по оси Z; 11 мкм по осям X-Y; средняя толщина слоя 0,008 — 0,012"
Качество поверхности	Среднее или низкое	Среднее или низкое	Среднее или низкое	Среднее или низкое	Среднее или хорошее	Среднее или плохое
Преимущества	Дешевый принтер, простая модификация	Дешевый принтер, дешевые материалы и дополнительные модули (например, подогрев рабочей зоны за \$ 50, прочный корпус, освещение и т. д.)	Дешевый принтер, различные цвета материала, удобные картриджи, общество Cubify	Дешевый принтер, дешевые материалы, малозащумный	Большой рабочий объем, замена материала при печати, низкая цена, возможность модификации, хороший выбор дешевых материалов, малозащумный	Дешевые принтер и материалы, печать двумя материалами, возможность модификации, подогрев рабочего объема
Недостатки	Медленный, собирается пользователем, низкое качество печати	Медленный, только один экструдер (печать одним материалом), сложная модификация	Медленный, низкое разрешение, только один экструдер, нельзя модифицировать, дорогие материалы	Медленный	Медленный, самостоятельная сборка, нет подогрева рабочего объема, ручная постобработка изделия, один экструдер	Медленный, нет дешевого набора «сделай сам»

* " — дюймы; 1 дюйм — 25,2 мм, 1 фунт — 0,454 кг.

Производитель	Asiga	Stratasys	Beijing TierTime Technology Co. Ltd.	3D Systems	3D Systems	Dimension
Модель	Freeform Pico	Mojo	Inspire S200	V-Flash	ProJet 1000 и ProJet 1500	uPrint™ SE
Технология	Деформируемые зеркала (DMD)	Термопластическая экструзия (FDM)	MEM (Melted and Extrusion Modeling)	Перенос фотополимерной пленки	Перенос фотополимерной пленки	Термопластическая экструзия (FDM)
Размеры и вес	8,6 × 8,9 × 20", 22 фунта	25×21×18", 60 фунтов	24,8 × 26 × 37,8", 140 фунтов	31 × 27 × 26", 45 фунтов	22 × 36 × 29", 122 фунтов	26 × 26 × 30", 132 фунта
Рабочая площадка	30 × 40 × 100 мм	5 × 5 × 5"	5,91 × 7,87 × 7,87"	7 × 9 × 8"	ProJet 1000: 6,75 × 8 × 7"; ProJet 1500: 6,75 × 9 × 8"	8 × 6 × 6"
Материалы	2 фотополимера	Один сорт ABS	ABS	Фотополимер	Фотополимер	ABS-пластик с растворимой поддержкой
Стоимость материалов	\$ 350 за 500 мл или около \$ 320 за фунт	\$ 399 за картридж с 80 см материала, эквивалентно \$ 133 за фунт	\$ 79 за фунт	\$ 850 за картридж с 104 см материала, ~\$ 9 за см ³ или \$ 214 за фунт	Примерно \$ 120 за фунт или \$ 4–\$ 5 за дюйм	От \$ 115 до \$ 185 за фунт
Скорость печати	Высокая	Низкая	Низкая	0,4" в час по оси Z	0,5" в час; 0,8" в час для ProJet 1500	Низкая

Точность	±50 мкм; размер пиксела 38 мкм; по оси Z – инкремент в 1 мкм	Толщина слоя 0,007"; точность позиционирования неизвестна	Толщина слоя регулируемая, от 0,010 до 0,014"; точность 0,008" на 4", миним. размер элемента 0,040"	Толщина слоя 0,004"; разрешение: 768 × 1024 × 2000 DPI (±0,009"), миним. толщина стенки 0,64мм	Толщина слоя 0,004"; 0,008" для ProJet 1500; разрешение 1024 × 768 DPI (X – Y); миним. толщина стенки 0,64 мм; миним. размер элемента 0,254 мм	Толщина слоя 0,010"
Качество поверхности	Отличное	Среднее	Среднее	Хорошее	Отличное	Среднее
Преимущества	Дешевый принтер высокого разрешения, быстрая работа, малозумный	Дешевый «профессиональный» принтер «под ключ»	Прочные изделия, надежная технология, малозумный, двойной экструдер (для подерживающего материала)	Дешевый принтер, точность, разрешение и скорость, сменные компоненты в картридже	Дешевый принтер, точность, разрешение и постобработка, скорость, цветные материалы	Прочные изделия, надежная технология, малозумный
Недостатки	Очень маленький рабочий объем, дорогие материалы	Медленный, только один материал	Медленный, ограниченный выбор материала, довольно дорогой материал	Ограниченный выбор материалов, их механические свойства и высокая стойкость	Ограниченный выбор материалов, их механические свойства и высокая стойкость	Медленный, сравнительно высокая стойкость материала

Производитель	MakerBot Industries	MaukCC	Bits From Bytes	LeapFrog	LeapFrog	Bits From Bytes	LeapFrog	Bits From Bytes
Модель	Replicator	Cartesio M	3D Touch	Xeed	Creatr	RapMan 3.2		
Технология	Термопластическая экструзия							
Размеры и вес	18,4×15×12,6", 30 фунтов	20×16,1×14,6", 26 фунтов	20×20×23", 79 фунтов	31,5×23,6×19,7"	1575×23,6×19,7"	21×22×20", 40 фунтов		
Рабочая площадка	8,9×5,7×5,9"	7,9×7,9×7,9"	10,8×10,8×8,3", уменьшается при наращивании количества экструдеров	14,6×13,4×11,4"	11,8×9,8×10,2"	10,8×8×8,3"		
Материалы	ABS, PLA; другие виды пластика	PLA, HDPE, ABS и другие виды пластика	ABS, HDPE, LDPE, PP, UPVC, PLA	ABS, PLA, PVA	ABS, PLA, PVA	ABS, HDPE, LDPE, PP, UPVC, PLA		
Стоимость материалов	PLA/ABS \$ 22/\$ 25 за фунт; PVA \$ 40 за фунт	Около \$ 17 за фунт, любые поставщики	От \$ 20 за фунт	ABS по \$ 14 за фунт	ABS по \$ 14 за фунт	От \$ 20 за фунт		
Скорость печати	40 мм/с; примерно 24 см/ч	X/Y 71"/с, Z 47"/с	Максимальная 15 мм ³ /с; зависит от изделия и полимера	По X и Y до 1,0 м/с; экструзия: 200 мм/мин	Скорость X—Y до 0,35 м/с; скорость экструзии 200 мм/мин	Максимальная 15 мм ³ /с; средняя 7 мм ³ /с		

Точность	2,5 мкм по оси Z; 11 мкм по осям X – Y; средняя толщина слоя 0,008 – 0,012"	X/Y/Z 0,004"; толщина слоя от 0,004 до 0,016"	По осям X – Y ±1 % размера объекта, минимум ±0,008"; по оси Z ±половина разрешения по оси (миним. разрешение по оси Z – 0,005")	Толщина слоя 0,004"; точность позиционирования 0,0005"; сопло 0,008"	Толщина слоя 0,008"; точность позиционирования 0,002"; сопло 0,014"	По осям X – Y ±1 % размера объекта, минимум ±0,2 мм; по оси Z ±половина разрешения печати; толщина слоя 0,005"
Качество поверхности	Среднее или плохое	Среднее или хорошее	Среднее или плохое	Среднее или плохое	Среднее или низкое	Среднее или низкое
Преимущества	Дешевый принтер и материалы, печать двумя материалами, возможность модификации, подогрев рабочего объема	Несколько насадок, малошумный, платформа с подогревом, дешевый, возможность модификации, дешевые материалы	До трех печатающих головок (\$ 385 каждая), дешевый принтер, хороший выбор материалов, малошумный	Дешевые материалы, самый большой рабочий объем в своем классе, подогрев рабочего объема, высокое разрешение	Дешевый принтер, дешевые материалы, дополнительный экструдер, большой подогреваемый рабочий объем	Дешевый принтер, большие возможности для модификации, хороший выбор материалов, дешевые материалы, малошумный
Недостатки	Медленный, нет дешевого набора «следуй сам»	Медленный, не-обходима ручная постобработка, нет второго экструдера	Медленный, нет подогрева рабочего объема	Медленный, нельзя модифицировать	Медленный, довольно низкое разрешение, не модифицируется	Медленный, самостоятельная сборка

Производитель	Dimension	Dimension	Hewlett Packard	Hewlett Packard	Hewlett Packard	Z Corporation	Objet Ltd.
Модель	uPrint™ SE	uPrint™ Plus SE	Designjet 3D Printer	Designjet 3D Printer	Designjet 3D Color Printer	ZPrinter 150	Objet24 /Objet30
Технология	Термопластическая экструзия (FDM)	Термопластическая экструзия (FDM)	Термопластическая экструзия (FDM)	Термопластическая экструзия (FDM)	Термопластическая экструзия (FDM)	Струйная трехмерная печать (3DP)	Экструзия фотополимеров
Размеры и вес	26 × 26 × 30", 132 фунта	26 × 26 × 30", 132 фунта	26 × 26 × 30", 132 фунта	26 × 26 × 30", 132 фунта	26 × 26 × 30", 132 фунта	29 × 31 × 55", 365 фунтов	32 × 24 × 23", 205 фунтов
Рабочая площадка	8 × 6 × 6"	8 × 6 × 6"	8 × 6 × 6"	8 × 6 × 6"	8 × 6 × 6"	9,3 × 7,3 × 5"	9,22 × 7,58 × 5,85" (Objet24), 11,58 × 7,58 × 5,85" (Objet30)
Материалы	ABS-пластик с растворимой поддержкой	ABS-пластик нескольких цветов с растворимой поддержкой	ABS-пластик с растворимой поддержкой	ABS-пластик нескольких цветов с растворимой поддержкой	ABS-пластик нескольких цветов с растворимой поддержкой	Композит (гипс), эластомер, формы для литья	VeroWhitePlus Oraque (Objet24); Blue, Black Grey и PLP-like (Objet30)
Стоимость материалов	От \$ 115 до \$ 185 за фунт	От \$ 115 до \$ 185 за фунт	От \$ 115 до \$ 185 за фунт	От \$ 115 до \$ 185 за фунт	От \$ 115 до \$ 185 за фунт	Композит (гипс): \$ 0,60 за см	От \$ 130 до \$ 175 за фунт; поддержка по \$ 57 за фунт
Скорость печати	Низкая	Низкая	Низкая	Низкая	Низкая	Отличная, 0,8" в час	Хорошая

Точность	Толщина слоя 0,010"	Толщина слоя 0,010"	Толщина слоя 0,010"	Толщина слоя 0,010 или 0,013"	Толщина слоя 0,010 или 0,013"	300 × 450 dpi; толщина слоя 0,004"	600 × 600 × 900 dpi; толщина слоя 0,0011"; средняя точность позиционирования: ±0,0039"
Качество поверхности	Среднее	Среднее	Среднее	Среднее	Среднее	Среднее	Отличное
Преимущества	Прочные изделия, надежная технология, малошумный	Прочные изделия, надежная технология, малошумный	Прочные изделия, надежная технология, малошумный	Прочные изделия, надежная технология, малошумный	Прочные изделия, надежная технология, малошумный	Самая быстрая технология, довольно широкий выбор материалов, дешевые материалы	Дешевый принтер с качеством, сравнимым с SPT-машинами, хорошая точность, разрешение и постобработка, скорость
Недостатки	Медленный, сравнительно высокая стоимость материала	Медленный, сравнительно высокая стоимость материала	Медленный, сравнительно высокая стоимость материала	Медленный, сравнительно высокая стоимость материала	Медленный, сравнительно высокая стоимость материала	Сложная постобработка, плохое качество постобработки, плохие характеристики материала	Ограниченный выбор материалов, механические свойства материала, высокая стоимость материала, несколько стадий постобработки

PICASO 3D Designer

Настольный 3D-принтер **PICASO 3D Designer** на основе виртуальной 3D-модели быстро и легко создает реальные объекты из обычного ABS-пластика и экологически чистого PLA-пластика.

Для создания виртуальной модели следует использовать 3D-редактор (Компас 3D, AutoCad, SolidWorks, Blender, 3ds Max, Google SketchUp и др.) (табл. 22) [39].

Таблица 22

Основные характеристики 3D-принтера PICASO 3D Designer

Производитель	Picaso 3D
Модель	Designer
Тип оборудования	3D-принтер
Описание	Настольный 3D-принтер. Готовые 3D-модели можно найти в сети Интернет (например, на ресурсах Thingiverse и GrabCAD)
Технология печати	Послойное выращивание 3D-модели
Цвета, использованные в оформлении	Красный
Комплект поставки и опции	
Интерфейсный USB-кабель	Входит в комплект поставки
Программное обеспечение в комплекте	PICASO Polygon (на русском языке; для подготовки моделей в формате STL к печати)
Экран	
ЖК-дисплей	Есть, позволяет следить за ходом печати и управлять работой и сервисным обслуживанием принтера без использования компьютера
Интерфейс, разъемы и выходы	
Слоты для карт памяти	microSD
Интерфейс	USB 2.0
Порты	USB 2.0 Type B
Параметры/функции печати	
Кол-во цветов	Picaso 3D Builder одновременно может использовать только один вид пластика. Готовое изделие может быть окрашено акриловыми красками

Область печати, мм	200 × 200 × 210
Скорость печати, см ³ /ч	30
Минимальная толщина слоя, мм	0,05
Расходные материалы/заменяемые компоненты	
Картридж цветной	ABS Black, ABS Natural, PLA Blue, PLA Grey, PLA Light Blue, PLA Natural, PLA Orange, PLA Peak Green, PLA Silver, PLA White
Питание	
Потребление энергии	450 Вт – максимальное
Совместимость	
Поддержка ОС	Windows 8, Windows 7, Windows XP
Прочие характеристики	
Прочее	Благодаря внутренней подсветке области печати можно следить за созданием изделия даже в условиях плохого освещения
Размеры (Ш × В × Г), мм	365 × 452 × 386
Вес, кг	11
Рабочая температура, °С	10–40

3D-принтер UP! Plus 2

3D-принтер **UP! Plus 2** предназначен для быстрой профессиональной печати. Оснащен полностью автоматизированной системой калибровки платформы, способной регулировать наклон, высоту и даже расстояние между платформой и соплом (табл. 23) [39].

Таблица 23

Основные характеристики 3D-принтера UP! Plus 2

Производитель	PP3DP
Модель	UP! Plus 2
Тип оборудования	3D-принтер
Технология печати	Послойное выращивание 3D-модели
Комплект поставки и опции	
Интерфейсный USB-кабель	Входит в комплект поставки
Интерфейс, разъемы и выходы	
Интерфейс	USB
Порты	USB Type B

Параметры/функции печати	
Кол-во цветов	Одновременно может использоваться только один вид пластика
Область печати (максимальный размер изделия), мм	140 × 135 × 140
Скорость печати, см ³ /ч	10–100
Минимальная толщина слоя	0,15 мм (150 мкм)
Расходные материалы/заменяемые компоненты	
Картридж цветной	ABS Black, ABS Natural, PLA Blue, PLA Grey, PLA Light Blue, PLA Natural, PLA Orange, PLA Peak Green, PLA Silver, PLA White
Питание	
Параметры	100–240 В, 50–60 Гц, 220 Вт
Блок питания	Внешний, входит в комплект поставки
Совместимость	
Поддержка ОС	Windows 8, Windows 7, Windows Vista, Windows XP, MAC OS X
Прочие характеристики	
Размеры (Ш × В × Г), мм	245 × 350 × 260
Вес, кг	5

3D-принтер UP! Mini

3D-принтер **UP! Mini** представляет собой упрощенный бюджетный вариант 3D-принтеров серии UP! (табл. 24) [39].

Таблица 24

Основные характеристики 3D-принтера UP! Mini

Производитель	PP3DP
Модель	UP! Mini
Тип оборудования	3D-принтер
Технология печати	Послойное выращивание 3D-модели
Цвета, использованные в оформлении	Черный глянцевый, черный
Комплект поставки и опции	
Интерфейсный USB-кабель	Входит в комплект поставки
Интерфейс, разъемы и выходы	
Интерфейс	USB 2.0

Порты	USB 2.0 Type B
Параметры/функции печати	
Кол-во цветов	Одновременно может использоваться только один вид пластика
Область печати, мм	120 × 120 × 120
Скорость печати, см ³ /ч	10–100
Минимальная толщина слоя, мм	0,2
Расходные материалы/заменяемые компоненты	
Картридж цветной	ABS Black, ABS Natural, PLA Blue, PLA Grey, PLA Light Blue, PLA Natural, PLA Orange, PLA Peak Green, PLA Silver, PLA White
Питание	
Блок питания	Внешний, входит в комплект поставки
Совместимость	
Поддержка ОС	Windows 8, Windows 7, Windows Vista, Windows XP, MAC OS X
Прочие характеристики	
Размеры (Ш × В × Г), мм	240 × 355 × 340
Вес, кг	6
Рабочая температура, °С	15–30

Ирбис – 3D-принтер, сканер и экструдер

3D-принтер, сканер и экструдер **Ирбис** (все в одном корпусе) включает в себя 3D-принтер высокого разрешения и с большой областью печати, автоматический 3D-сканер высокого разрешения с поворотным столом и экструдер (рис. 37) [40, 41].

Ирбис – высокоточный быстрый и малошумный инструмент для создания 3D-изделий из ABS-пластика.

3D-копировальная техника «все-в-одном» Zeus

3D-копировальная техника, созданная по принципу «все-в-одном», представлена также аппаратом **Zeus** (рис. 38) [40, 41]. Модель выполнена по принципу «четыре в одном»: 3D-принтер + 3D-сканер + 3D-копир + факс. Безусловно, это удобно, экономит время, устройство меньше стоит, меньше весит, занимает меньше места, чем комплект четырех отдельных устройств. На практике же, судя по эк-

сплутации подобных устройств 2D-назначения, 3D-модель наследует недостатки его прародителей: низкую надежность, ограниченность выполняемых функций, сложность обслуживания, ремонта и поиска расходных материалов.

Устройство оснащено интерфейсом plug-and-play («включи и работай»), считается, что это одно из самых простых в использовании 3D-устройств в мире.

Дисплей диагональю 7" помогает управлять отсканированным изображением, а также самим процессом печати.



Рис. 37. Внешний вид 3D-принтера, сканера и экструдера Ирбис



Рис. 38. Внешний вид 3D-копировального аппарата Zeus

Перечень основных фирм, производящих 3D-принтеры

2PrintBeta	Choc Edge Ltd.
3D Kits	CMET Inc.
3D Systems	Code-P
3dBotic	Concept Laser GmbH
3dBotZ	Coombes Solutions Ltd.
3DD Plas	Crew Ltd.
3Dfactories	
3DJoy	Dawson Distributions
3DMonstr	Deezmaker
3FX	Delta Micro Factory Corporation
3Geometry Manufacturing Systems Pvt Ltd.	Delta Tower
3ntr	DeltaMaker
Ac123Dc	Deltaprintr
Active 3D	D-MEC Ltd.
Acuity Design	DWS Lab
Afinia	DWS s.r.l.
Airwolf 3D	
Aleph Objects, Inc.	E3D-Online
ALT Design	Eckertech Inc.
Arcam AB	Electro Optical Systems
Asiga	eMotion Tech
Azuma Engineering Machinery Inc.	ENNOVA
Be3D	EnvisionTEC
BeAM	Essential Dynamics
Beethefirst	ExOne Company, LLC
Beijing TierTime Technology Co., Ltd.	Ez3D
Blue Eagle Labs	F & B rapid production
Blueprinter ApS	Fabmaker
Bonsai Lab	Fabrisonic LLC
Boots Industries	FELIXrobotics
botObjects	Fochif Mechatronics Technology Co., Ltd.
bq	Formlabs
Brahma3	Full Spectrum Laser LLC
	Futura Elettronica
Cablysa Sistemas, S.L.	
Carima	Gaminu
CB-Printer	German RepRap GmbH
CEL	gMax
	Gubbels Engineering

Heacent
Hot Proceed
Hydraraptor
Hyrel 3D

i3Dbot Co., Ltd.
IC3D, LLC.
Idea Lab 3d
Imec Proto
inDimension3
Iniciativas 3D
Instrument Tech Co., Ltd.
Intelligent Machine Inc.
IonCoreLtd.
Iprint Technologies Pty Ltd.
iRapid
Ironvault
Isis3D
It is 3D

Jelwek
JER Education Technology Co.,
Ltd.
Jinhua Flashforge Technology Co.,
Ltd.

Kentstrapper
Kevvox Pte Ltd.
Keyence Corporation
Kikai Labs
KL Services Group Inc
Kuhling&Kuhling

Leapfrog BV
Lithoz GmbH
Lunavast

Makealo
MakeMendel
MakerBot Industries, LLC
MakerDreams
MakerFarm
MakerGear, LLC

Maker's Tool Works, LLC
Makible Ltd.
Makism 3D Corp.
Mankati
MarkForged
Matsuura Machinery Corporation
MaukCC
MBot3D
Mcor Technologies Ltd.
Metamaquina
MiiCraft
MindKits
MiniFactory Oy Ltd.
Mixshop Inc
MostFun
Multec GmbH
mUVE 3D LLC
Myriwell

Natural Machines
Nova 3D
NWRepRap

Old World Laboratories
Omni3D
Open cube
Optomec Inc.
ORD Solutions

Panowin Technologies Co., Ltd.
Peerbhai Robotic
Picaso 3D
PieceMaker Technologies
Pirate 3D
Portabee 3D Printer
PrintBox3D
Printed Worlds
Printers3d.ru
Printmate 3D
Printrbot, Inc.

QSQM International Co.
Qualup SAS
QU-BD Inc.

Rapid Shape GmbH
Rapide 3D
RDMCU
re:3D
ReaLizer GmbH
Renishaw plc
Replicator Warehouse
Reprap Austria
RepRap BCN
RepRap Diffusion
RepRapPro
Reprapsource
RoBo 3D Printer
Robot Co., Ltd.
Robot Factory
Rokit
Romsraj
Ruian Maitian Network Technology Co.

Sedgwick
SeeMeCNC
Shaanxi Hengtong Intelligent Mashine Co., Ltd.
Shanghai Union Technology Co., Ltd.
Sharebot
SHARK Limited Partnership
Shenzhen Mootoo Engineering Co., Ltd.
Shenzhen WeisTek Co., Ltd.
Sintermask GmbH
SLM Solutions GmbH
Smartfriendz
Solido Ltd.
Solidoodle
Solidscape, Inc.
Space Monkey
Stellamove, Inc.

Stratasys Ltd.
Sumpod Ltd.
SYS+ENG
Tangible Engineering USA Corporation
Tantillus
Tegelbeckers Ltd.
Teil3
Terawatt Industries
THY3D
Tinkerine Studio Ltd.
Trimaker
Trinitylabs
Trump Precision Machinery Co., Ltd.
Tumaker
Twelvepro Co.
Type A Machines

Ultibots, LLC.
Ultimaker B.V.
Unique Design

Velleman

WANHAO
WASP
Wuhan Binhu Mechanical & Electrical Co., Ltd.

XYZprinting

York3dPrinters

ZBot
Zeepro
ZMorph 3d
Zortrax

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ 3D-ТЕХНОЛОГИЙ

После получения сканов ротовой полости данные передаются в специальную программу для работы с изображениями, которая выстраивает виртуальную модель будущего протеза. Задача оператора — тщательно проконтролировать изготовление виртуальных каркасов и в случае необходимости провести их компьютерную корректировку [5].

После того как виртуальная модель протеза готова, программа формирует задание печати для 3D-принтера и отправляет модель на печать.

Для создания 3D-моделей требуются следующие виды программного обеспечения [43]:

- системы автоматизированного проектирования (САПР) для моделирования физических объектов и создания формы объекта;
- системы автоматизированного производства (СAМ), преобразующие модель в задание для 3D-принтера;
- программное обеспечение для управления принтером.

Системы автоматизированного проектирования

Программы твердого моделирования используют метод, называемый «конструктивная блочная геометрия» (СSG), или аналогичные технологии, что позволяет создавать сложные 3D-формы. Популярны программы этого вида: SketchUp, Autodesk 123D и Tinkercad. В твердотельном моделировании простые формы — коробки, цилиндры и пирамиды — используют для создания более сложных форм, зачастую с применением логических операций.

У программ твердотельного моделирования есть три основных преимущества. Во-первых, сам процесс моделирования более интуитивен. Во-вторых, интерфейс позволяет легко установить точные измерения между объектами, что удобно для создания механических частей. В-третьих, программное обеспечение обрабатывает большинство вопросов, связанных с обеспечением целостности («герметичности»), несмотря на множество операций, которые осуществляются для создания сложных форм.

Скульптурные программы моделирования — ZBrush, Sculptris и Mudbox — больше подходят для формирования таких поверхностей, как лица и фигуры, но менее пригодны для точных деталей и плоских поверхностей.

Параметрические программы моделирования OpenSCAD уникальны, поскольку вместо рисования фигур мышью используют простые подпрограммы, описывающие фигуры и их различные комбинации. Такой способ идеально подходит для создания технических моделей, таких как корпуса, механизмы, позволяя точно задавать их габариты.

Программы моделирования Marius Watz's ModelBuilder и Grasshopper ориентированы на абстрактные формы, созданные из численных данных или математических формул.

Полигональные программы моделирования представляют собой объекты, созданные при помощи тысячи мелких треугольников, объединенных вместе по всей модели поверхности. Примеры таких программ: Blender, 3ds Max, Maya и Modo. Они отлично подходят для создания 3D-графики и анимации, но требуют особого подхода при 3D-печати.

САПР-программа создает 3D-модели обычно в формате STL. Некоторые САМ, например такие как Slic3r, включают возможность корректировки файла, что позволит исправить простые ошибки. Модели можно откорректировать и вручную, с помощью полигонального модельера. Другим вариантом является MeshLab. Это мощное решение с открытым исходным кодом, но может оказаться сложным для малоопытных пользователей.

Системы автоматизированного производства

Если имеется безошибочная 3D-модель, то она должна быть преобразована в понятные для принтера инструкции ToolPath, которые контролируют перемещения печатающей головки, а также процесс выдавливания горячего пластика по заданному пути. Этот процесс называется нарезкой. Стандартный формат таких инструкций – программа, называемая G-Код.

Большинство принтеров используют программное обеспечение с открытым исходным кодом на движке Skeinforge или Slic3r для подготовки G-кода из файлов модели.

Утилита с закрытым исходным кодом KiSSlicer использует такие уникальные особенности, как адаптированное заполнение (используя больше материалов вблизи края отпечатка и меньше – в центре) и поддержку нескольких прутков (для использования различных материалов, структур поддержки и заполнения).

Новый движок с открытым исходным кодом от MakerBot – Miracle-Grue.

САМ обеспечивает возможность настройки параметров, связанных со скоростью, качеством, высотой слоя, скоростью печатающей головки, плотностью заполнителя, количеством «оболочек», окружающих заполнение в каждом слое.

Управление принтером

Программный интерфейс позволяет начать, остановить или приостановить процесс печати, установить при необходимости температуру сопла и нагревателя каретки.

Большинство машин для аппаратного управления используют программы ReplicatorG, The Printron suite (с участием Pronterface) и Repetier-Host. Некоторые принтеры с закрытым исходным кодом, такие как PP3DP, поставляются с особым клиентским программным обеспечением, однако включают в себя аналогичный набор функций.

Связь клиента с принтером происходит через USB или беспроводную сеть WiFi. Ряд принтеров может работать, считывая информацию с SD-карты или USB накопителя.

Пакеты программ для создания 3D-графики

3Dtin

3DTin — самый простой программный онлайн-редактор 3D [44]. 3DTin имеет лишь базовый набор функций для трехмерного моделирования (примитивные трехмерные формы, инструменты трансформации, объемный текст). Можно рисовать модели прямо из браузера Google Chrome или Firefox (с поддержкой WebGL).

Предусмотрен экспорт в стандартные форматы файлов: STL, OBJ, DAE, которые могут быть импортированы в другие программы моделирования. Готовую модель можно сразу отправить на печать в любой 3D-принтер.

Autodesk 3ds Max

Autodesk® 3ds Max® 2015 (ранее Discreet 3dsmax, затем Autodesk 3D Studio MAX) — полнофункциональная профессиональная программная система для создания и редактирования 3D-графики и анимации (табл. 25).

Таблица 25

Требования к компьютеру и программному обеспечению для работы Autodesk® 3ds Max® 2015

Программное обеспечение	
Операционная система	Microsoft® Windows® 7 (SP1), Windows® 8, Windows® 8.1 Professional operating system (32- и 64-бит)
Браузер	Apple® Safari® Google Chrome™ Microsoft® Internet Explorer® Mozilla® Firefox®

Требования к ПЭВМ	
CPU	64-бит Intel® или AMD® много-ядерный процессор
Графическая карта и драйвера	Выбор для конкретных условий использования программы на сайте http://usa.autodesk.com/adsk/servlet
RAM	4 Гб (8 Гб — рекомендуемое значение)
Дисковое пространство	Не менее 4,5 Гб
Управление	3-кнопочная мышь

Blender 3D

Blender — бесплатное приложение для создания 3D-контента, включающее средства трехмерного моделирования, анимации, рендеринга, постобработки видео, а также создания интерактивных игр. Blender доступен для операционных систем под лицензией GNU General Public License (табл. 26). В настоящее время пользуется наибольшей популярностью среди бесплатных 3D-редакторов в связи с быстрым и стабильным развитием.

Таблица 26

Системные требования к компьютеру для использования Blender 2.7x

Системные требования	Минимальные	Рекомендуемые	Оптимальные
Центральный процессор	2 ГГц, двухядерный процессор с SSE2, 32 бит	Четырехядерный процессор, 64 бит	Восьмиядерный процессор, 64 бит
Объем RAM, Гб	2	8	16
Видеокарта	Графическая карта с поддержкой OpenGL с 256 Мб RAM	Графическая карта с поддержкой OpenGL с 1 Гб RAM	Графическая карта с поддержкой Dual OpenGL с 3 Гб RAM
Дисплей	Монитор с разрешением 1280 × 768, 24 бит	Full HD-монитор, 24 бит	Два Full HD-монитора, 24 бит
Устройства ввода	Клавиатура, мышь или тачпад	Клавиатура, 3-кнопочная мышь	Клавиатура, 3-кнопочная мышь и графический планшет
Операционная система	Windows, Mac OS X, Linux, FreeBSD, Irix, Solaris		

Google SketchUp

Google SketchUp — легкая в использовании программа для 3D-моделирования. Создавая модель в Google SketchUp, можно рисовать ребра и грани, используя несколько простых инструментов. Можете вытянуть любую плоскую поверхность в 3D-форму.

Программа работает совместно с Google Earth, поэтому заготовку можно импортировать непосредственно из Google Earth.

Основные характеристики:

Наименование программы: Google SketchUp 8 PRO ENG 8.0.3117

Год выпуска: 2011

Версия: 8.0.3117

Разработчик: Google

Сайт разработчика: <http://sketchup.google.com/>

Совместимость с Vista: неизвестно

Совместимость с Windows 7: полная

Язык интерфейса: английский + русский

Системные требования, операционная среда: Microsoft Windows® 2000, XP, Vista/Windows 7

Дополнительные требования:

NET framework;

CPU: процессор Pentium® 4 с частотой 1 ГГц или выше;

RAM: не менее 512 Мб;

3-кнопочная мышь с колесом прокрутки;

видеокарта с поддержкой 3D-графики и 256 Мб встроенной памяти.

Google SketchUp Pro 8 — простой и удобный инструмент для создания, обработки и презентации 3-мерных моделей. Позволяет быстро и качественно создавать практически любые построения различного уровня подачи: от предварительного драфт-эскиза до готового проекта. Хорошо работает в связке с 3ds max, Cinema 4d, Vue xStream, Piranesi, Archicad. Объекты проектируются за считанные минуты.

Google SketchUP предоставляет возможность создавать многостраничные документы и презентации; раскладывать и аннотировать множество масштабированных моделей на одной странице; создавать, документировать и делать презентацию проекта, используя один-единственный чертеж.

Программа Google SketchUp — это очень простое в использовании приложение для создания 3D-моделей. Благодаря Google SketchUp можно добавлять разнообразные детали, изменять текстуру, размеры моделей с очень высокой точностью.

Уже готовые модели можно разместить на сервисе Google Earth, переслать их коллегам, распечатать копии или разместить их на сайте.

Google SketchUp имеет такие полезные в работе инструменты, как:

- геометрическое моделирование и рисование, которое включает в себя множество функций;
- конструирование, также представленное разнообразными возможностями.

При помощи данной программы можно:

- редактировать, рисовать, вращать, измерять, а также масштабировать разнообразные геометрические фигуры;
- смягчать и ретушировать дефекты рисунка;
- 3D-модель разделить на секции, для того чтобы просмотреть отдельные детали и обработать их;
- применять к моделям уже имеющиеся текстуры или создать абсолютно новые;
- имитировать размещение видеокамер;
- распечатать изображения моделей;
- использовать ряд других полезных в работе функций.

OpenSCAD

OpenSCAD — программа для создания 3D-CAD объектов, проектирования и 3D-моделирования. Программа предназначена для тех пользователей, которым нужна мощная платформа с расширенным функционалом систем автоматизированного проектирования. Это бесплатное программное обеспечение доступно для Linux/UNIX, MS Windows и Mac OS X операционных систем.

SolidWorks

SolidWorks 2013 SP3.0 — система автоматизированного проектирования, инженерного анализа и подготовки производства изделий любой сложности и назначения.

SolidWorks является ядром интегрированного комплекса автоматизации предприятия, с помощью которого осуществляется поддержка жизненного цикла изделия в соответствии с концепцией CALS-технологий, включая двунаправленный обмен данными с другими Windows-приложениями и создание интерактивной документации.

SolidWorks обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения. Работает в среде Windows XP x86/x64, Windows Vista x86/x64, Windows 7 x86/x64.

Tinkercad

Tinkercad — программа, позволяющая создать модель для 3D-принтера в короткие сроки. Она позволяет изменять размеры объектов, перемещать их или удалять. Tinkercad создана с использованием технологии WebGL, которая делает возможным отображение трехмерной графики в браузере.

Для работы с сервисом не требуется устанавливать дополнительные приложения, достаточно иметь браузер, поддерживающий WebGL (Chrome, Firefox или Opera 12 Alpha). Пользователи могут создавать трехмерные модели в окне браузера, сохранять проекты на сервере или загружать их на жесткий диск в виде файлов формата STL.

Tinkercad работает с несколькими сервисами трехмерной печати (Ponoko, Shapeways и i.Materialise) и принтерами MakerBot.

Компас-3D

САПР Компас — продукт российской компании «АСКОН», поставляется в нескольких вариантах: Компас-3D, Компас-ГРАФИК, Компас-СПДС, Компас-3D LT и Компас-3D Home, которые предназначены для 3-мерного проектирования и/или плоского черчения.

Система **Компас-3D** предназначена для создания 3-мерных ассоциативных моделей отдельных деталей и сборочных единиц, содержащих как оригинальные, так и стандартизованные конструктивные элементы. Параметрическая технология позволяет получать модели типовых изделий на основе ранее спроектированного прототипа. Сервисные функции облегчают решение вспомогательных задач проектирования и обслуживания производства.

Основные компоненты Компас-3D:

- система 3D-твердотельного моделирования;
- универсальная система автоматизированного 2D-проектирования «Компас-График»;
- модуль проектирования спецификаций;
- текстовый редактор.

Компас-3D поддерживает экспорт/импорт большинства популярных форматов моделей, что обеспечивает его интеграцию с различными CAD/CAM/CAE пакетами.

Минимальные системные требования для Компас-3D v13:

- операционная система: Windows XP/Vista/7 x86-x64;
- процессор: Pentium 3 и выше, с тактовой частотой не менее 800 МГц;
- ОЗУ: не менее 512 Мб;
- винчестер: не менее 3 Гб свободного пространства.

Кроме рассмотренных выше, для обработки 3D-изображений и вывода их на печать предназначены следующие пакеты программ: AutoCad, Autodesk Mechanical Desktop, Bacad-3D, SDRC I-DEAS, Pro/ENGINEER, QForm 2D/3D и ряд других.

CAD/CAM-системы стоматологического применения

CAD (Computer-Aided Design) определяет область геометрического моделирования объектов с использованием компьютерных технологий.

CAM (Computer-Aided Manufacturing) обеспечивает автоматизацию решения геометрических задач в технологии производства, расчет траектории движения обрабатывающего инструмента [45, 46].

CAD/CAM в стоматологии — это современная технология производства каркасов зубных протезов с помощью компьютерного моделирования и 3D-печати или фрезерования на станках с числовым программным обеспечением.

Перечень и сравнительная таблица (табл. 27, с. 140—141) основных CAD/CAM-систем стоматологического применения [47]:

1. **Bego Medifabricating** Bego Medical (Bremen, D).
<http://www.bego.com>
2. **Cad.esthetics** Cad.esthetics AB (Skelleftea, Sweden).
<http://www.cadesthetics.com>
3. **CELAY MIKRONA TECHNOLOGIE AG** (Spreitenbach, CH).
<http://www.mikrona.com>
4. **ce.novation** ce.novation (Hermsdorf, D). <http://www.cenovation.de>
5. **Cercon® smart ceramics** DeguDent GmbH (Hanau, D).
<http://www.degudent.com>
6. **CEREC** (CEramic REConstruction) Sirona Dental Systems GmbH (Bensheim, D). <http://www.sirona.de>
7. **CICERO®** (Computer Integrated Ceramic Reconstruction) Cicero Dental Systems B.V. (Hoorn, NL). <http://www.cicerodental.com/index.php.htm>
8. **DCS-Dental** DCS Dental AG (Allschwil, CH). <http://www.dcs-dental.com>
9. **DENTAL CAD/CAM GN-1** GC Corporation (Tokyo, J) GC Europe.
<http://www.gcdental.co.jp/index.html>
10. **DigiDent** (Hint-Els) Girrbaach Dental GmbH (Pforzheim, D).
<http://www.girrbaach.de/index.php> <http://www.hintel.com>
11. **EDC** Wieland Dental (Pforzheim, D). <http://www.wieland-dental.de>
12. **Etkon** etkon AG (Grafelfing, D). <http://www.etkon.de>
13. **Everest** KaVo Elektrotechnisches Werk GmbH (Leutkirch, D).
<http://www.kavo-everest.com>
14. **Lava®** 3M ESPE Dental AG (Seefeld, D). <http://www.3m.com/espe/>
15. **Pro 50, WaxPro** CYNOVADSM (Montreal, Canada).
<http://www.cynovad.com>
16. **Procera®** Nobel Biocare Deutschland GmbH (Koln, D/USA).
<http://www.nobelbiocare.com>
17. **Triclone 90** Renishaw GmbH (Gloucestershire, GB).
<http://www.renishaw.de>
18. **WOL-CERAM-EPC-CAM** Wol-Dent GmbH (Ludwigshafen, D).
<http://www.wolceram.de>
19. **ZFN-Verfahren**, Xawex Dentalsystem I-Mes (Eiterfeld, D).
<http://www.isel.com>

Технологии CAD/CAM стоматологического применения развивались в двух направлениях [45]:

— индивидуальные CAD/CAM-системы, позволяющие выполнять реставрацию в пределах одного учреждения, в стоматологическом кабинете и в присутствии пациента (CEREC 3, Sirona Dental Systems GmbH, Germany);

— централизованные системы, предусматривающие наличие общего производственного высокотехнологичного центра, изготавливающего на заказ большой ассортимент конструкций, и целой сети удаленных от него периферических рабочих станций (например, ProCERA, Nobel Biocare, Sweden).

Порядок работ стоматологических CAD/CAM-систем включает этапы [45]:

1. Сбор данных о рельефе поверхности протезного ложа специальным устройством и преобразование полученной информации в цифровой формат. На этом этапе системы CAD/CAM значительно отличаются между собой, используя оптические (устройство для получения оптического образа-слепок, преобразующего отраженный от объекта свет в поток электрических импульсов) или механические цифровые преобразователи (сканирующие системы считывают информацию с рельефа контактным зондом, который передвигается по поверхности согласно заданной траектории).

2. Построение виртуальной модели будущей конструкции протеза с помощью компьютера и с учетом пожеланий врача (этап CAD). Система, получив со сканера оцифрованную информацию о рельефе поверхности протезного ложа, приступает к построению его изображения на экране монитора.

3. Непосредственное изготовление самого зубного протеза на основе полученных данных (этап CAM). Ранние автоматизированные системы изготавливали зубную реставрацию путем «метода вычитания (удаления)» (англ. subtractive) и «метода сложения (добавления)» (англ. additive). Некоторые системы CAD/CAM комбинируют оба подхода, например Procera (Nobel Biocare, Sweden), другие используют метод избирательного лазерного спекания (Medifactory (Bego Medical AG, Germany)).

Различные стоматологические CAD/CAM-системы в основном отличаются лишь технологическими решениями для выполнения этих этапов.

На современном стоматологическом рынке доступно большое количество CAD/CAM-систем [47–49]. В настоящее время в России применяются лишь четыре из них: Cerec inLab (Sirona, Германия), Everest (KAVO, Германия), Hint-Els (прежнее название — DigiDent, Германия), DCS Precident (Швейцария).

Первые две компании давно известны на нашем рынке как производители широкого спектра стоматологического оборудования, две другие занимаются только разработкой и изготовлением CAD/CAM-систем и расходных материалов для этих систем. Они отличаются между собой как функциональными возможностями, так и ценой.

В перспективе стоматологические системы CAD/CAM будут иметь ощутимое преимущество перед традиционными методами протезирования.

Сравнение CAD/CAM-систем стоматологического применения

CAD/CAM	Сфера применения						Материал										Фиксация		
	Имлей	Винир	Коронка на передний зуб	Коронка на боковой зуб	Мост из 3 ед. в переднем отделе	Мост из 3 ед. в боковом отделе	Многосвязевой мост	Пластмасса	Титан	Золото	Стеклокерамика	Инфильтруемая керамика	Плотносоединенный оксид циркония	Al ₂ O ₃ -порошок-шликер	Частичносоединенный ZrO ₂	Частичносоединенный ZrO ₂ стабил-зировавший Y-порошок	ZrO ₂ стабилизированный Y-порошок	Адгезивная	Цементная
Bego Manufacturing	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cad.esthetics	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ce.novation	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CELAY	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cercon® smart ceramics	✓	✓	✓	✓	✓	✓	До 38 МКМ	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CEREC 3 (Ceramic REConstruction)	✓	✓	✓	✓	inLab	inLab	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DCS-Dental	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ 3D-ОРТОПЕДИЧЕСКОЙ СТОМАТОЛОГИИ

Предвидение роста требований пациентов к повышению стандартов качества стоматологического лечения требует постоянного внедрения цифровых технологий диагностики, лечения и производства зубных протезов [50]. Сейчас это возможно путем 3D-визуализации, цифровой записи артикуляционных движений нижней челюсти, виртуальной симуляции жевательных движений, САД-планирования имплантации, зубного протезирования и ортодонтического лечения, а также САМ-производства терапевтических приспособлений, временных и постоянных зубных протезов.

Пошаговый алгоритм практического использования современных цифровых 3D-технологий в ортопедической стоматологии [50]:

Шаг 1. В современной диагностике развернутый анамнез и получение первичных данных очень важны для начала любого исследования.

Шаг 2. Конусная компьютерная томография представляет огромное количество информации с большим потенциалом. Высокая точность и сниженный уровень облучения выдвигает этот метод на первое место среди прочих рентгенологических методик.

Шаг 3. Оклюзионный анализ с помощью T-Scan позволяет определить локализацию и плотность окклюзионных контактов, измерить, в какой степени окклюзия является сбалансированной. Пациент прикусывает ультратонкий тензодатчик, и компьютер анализирует данные. Оклюзионные супраконтакты, вызывающие травму височно-нижнечелюстных суставов, легко и просто выявляются с помощью этого прибора.

Шаг 4. Запись движений нижней челюсти важна для диагностики состояния сустава и проектирования индивидуальной окклюзии. Для этого применяется электронный аксиограф CADIAХ.

Шаг 5. Обратное планирование. Ортопедическое лечение начинается с предварительного виртуального планирования функционального и эстетического результата на основе 3D-моделирования формы будущих искусственных зубов. Для этого применяется 3D-сканирование лица и зубных рядов пациента. На основе последующего виртуального моделирования могут быть изготовлены как временные, так и постоянные конструкции, удовлетворяющие самым взыскательным требованиям.

Шаг 6. Планирование имплантации. На основе проведенного 3D моделирования положения и формы будущих искусственных зубов проводится планирование положения и размеров имплантатов. С помощью такого планирования формируется правильное решение

с учетом оптимального использования ресурсов окружающей кости, защиты нервов и сосудов от повреждения.

Шаг 7. Навигационная имплантация. По результатам планирования положения имплантатов, на основе CAD/CAM-технологий изготавливаются хирургические направляющие шаблоны, обеспечивающие точное позиционирование имплантатов.

Шаг 8. Исправление зубов с помощью прозрачных ортодонтических капп осуществляется после предварительного CAD-планирования положения зубов. С помощью методов быстрого прототипирования готовится серия прозрачных и практически невидимых капп, с последовательной заменой которых обеспечивается требуемое перемещение зубов.

Шаг 9. САМ-изготовление зубных протезов. Используя современные цифровые технологии (стереолитография, избирательное лазерное спекание, компьютерное фрезерование), с высочайшей точностью изготавливаются зубные протезы либо их детали из биологически инертных и эстетичных материалов.

Схема автоматизированной организации работ для изготовления зубных протезов

Традиционная технология изготовления зубных протезов (коронки, мосты) базируется на технологии литья [51]. В основе протезов лежит литой металл, который может покрываться керамикой. В последнее время во всем мире все большее распространение получают протезы из (ди)оксида циркония (ZrO_2). Практически это разновидность керамики. Преимуществом циркониевых протезов является их эстетический вид и прочность. Не имея металлического каркаса, протез имеет более естественный вид и цвет. Инертность оксида циркония предопределяет отсутствие аллергических реакций, которые могут наблюдаться при изготовлении протезов из металла. Но оксид циркония не может быть получен литьем. В сыром виде брусок оксида циркония представляет собой легкообрабатываемый материал, напоминающий мел. После спекания в печи при температуре около 1350 °С материал приобретает высокую прочность и твердость, характерную для керамики. При спекании материал имеет усадку, из-за чего исходные размеры коронки уменьшаются, т. е. традиционные способы ручного изготовления циркониевых протезов не пригодны. Изготовление таких протезов стало возможным с внедрением компьютерных технологий CAD/CAM.

Компанией Delcam предложено специализированное решение для стоматологов. Это решение базируется на открытой CAD/CAM-системе, которая состоит из двух основных модулей.

Delcam DentCAD — специализированная система моделирования зубных мостов и коронок. Delcam DentMILL — специализированная система для подготовки управляющей программы для изготовления зубных мостов и коронок на станках с ЧПУ. Это решение успешно используется во многих стоматологических клиниках и лабораториях по всему миру и конкурирует с так называемыми закрытыми системами, ранее доминировавшими в этой сфере, давая пользователям возможность сэкономить значительные средства на выборе поставщиков оборудования (3D-сканеров, фрезерных станков) и расходных материалов. А это, в свою очередь, делает CAD/CAM-решения от компании Delcam более доступными для клиник, а значит, и для пациентов.

Преимущества автоматизации зуботехнической лаборатории по технологии CAD/CAM заключаются в следующем:

- применяя современные CAD/CAM-технологии, вы значительно сокращаете сроки изготовления коронок. Моделирование протеза в CAD-системе занимает всего несколько минут. Автоматическое создание траектории обработки в CAM-системе также экономит время работы зубных техников;

- максимально сокращены подгонка и доработка коронок при применении CAD/CAM-технологии, в том числе за счет предварительного учета усадки материала при спекании (получаем готовую коронку, абсолютно точно соответствующую сканированному оттиску);

- оптимизация рабочего времени специалистов: сокращение их рутинной работы, высвобождение рабочего времени для решения других задач;

- отказ от привлечения сторонних организаций для изготовления коронок;

- обработка коронок не только из оксида циркония (ZrO_2), но и из других материалов (оксида алюминия, титана). Выбор станка с ЧПУ определяет перечень материалов, которые будут доступны вам для изготовления протезов по технологии CAD/CAM. Обработку оксида циркония поддерживают все специализированные станки для стоматологии.

Рассмотрим ниже один из многих приемов выполнения работ по изготовлению зубных протезов (рис. 39, см. цв. вкл.) [51]. Отметим, что на практике технологические особенности выполнения отдельных процедур, обусловленные индивидуальностью технического оснащения зуботехнических лабораторий, могут заметно различаться. Неизменной остается последовательность выполнения процедур для получения конечного результата.

Цель — получить электронные данные для моделирования изделия в CAD-системе DentCAD.

1. **Слепок.** Получение слепка полости рта выполняется точно так же, как и при традиционных методиках зубопротезирования.

2. **Гипсовая модель.** С полученного слепка изготавливается гипсовая модель челюсти пациента.

3. **Сканирование модели.** Главной целью этого шага является получение цифровых данных, на основе которых будут построены электронные трехмерные модели требуемых изделий (коронки, протезов, мостов и т. д.), рис. 40 (см. цв. вкл.). Оцифрованные данные сохраняют в формате STL.

Для сканирования модели используется специальный лазерный сканер для стоматологии Iscan_D102i фирмы Imetric (Швейцария). Это простой прибор, не требующий дополнительной квалификации.

Основные характеристики сканера Iscan_D102i:

Габариты: 500 × 540 × 520 мм.

Вес: 15 кг.

Время сканирования: около 2 с (зависит от производительности компьютера и настроек качества сканирования).

Питание: 110–230 В, 50/60 Гц.

Потребляемая мощность: 50 Вт.

Сканер D62i представляет собой облегченный вариант сканера Iscan_D102i. Сканирует до пяти элементов за один скан.

Функциональности сканера D62i достаточно для работы в DentCAD и DentCAD Plus.

Сканер Iscan_D102i может сканировать 16 элементов (полная челюсть), а также импланты. Его отличия и особенности:

- добавляется другая калибровочная пластина;
- меняются крепления и держатели для сканируемого объекта;
- программное обеспечение сканера поддерживает сканирование полной челюсти.

Iscan_D102i обладает достаточной функциональностью для сканирования с целью последующей работы в DentCAD PRO.

Результатом сканирования и основной работы для DentCAD является трехмерная компьютерная геометрическая модель (в виде STL-файла) участка полости рта, на котором планируется установить зубной протез (рис. 41, см. цв. вкл.).

4. **Моделирование в системе DentCAD.** Полученный ранее STL-файл импортируют в CAD-систему DentCAD. Она предназначена для создания компьютерных моделей коронок, протезов, мостов и т. д. с последующей их передачей в CAM-систему DentMILL для программирования обработки заготовки на станке с ЧПУ.

Система **DentCAD** была разработана специально для стоматологов, в ней используется соответствующая терминология и удобный интуитивный интерфейс. Программа ориентирована на неопытного в использовании CAD-систем пользователя.

На этом шаге стоматолог должен выбрать из базы данных DentCAD наиболее подходящий по форме зуб и доработать его средствами DentCAD до нужной формы. Поставляемая с DentCAD база данных содержит модели коронок под каждый зуб (см. рис. 42, см. цв. вкл.).

Для редактирования геометрии используются интуитивно понятные функции скульптурного моделирования. В процессе моделирования можно масштабировать компьютерную модель, чтобы в процессе спекания компенсировать усадку и получить коронку максимально точных размеров.

Система DentCAD состоит из нескольких функциональных разделов:

DentMAN: управление проектом. Постановка задания и импорт данных извне. Гибкая в конфигурировании система управления данными предназначена для контроля над ходом выполнения заказа на всех этапах, включая 3D-сканирование, моделирование и производство.

DentSCAN: интерфейс для получения данных с 3D-сканера. На данный момент поддерживаются сканеры Imetric (Швейцария). Программа для управления специализированным бесконтактным 3D-сканером и первичной обработки отсканированных данных.

DentCAD: собственно, проектирование зубных замещений. Специализированная CAD-система, предназначенная для быстрого и точного 3D-моделирования всех типов зубных протезов.

DentCHECK: проверка полученной модели на соответствие заданным производственным стандартам (допуски, поднутрения и т. д.).

Компания Delcam предлагает различные версии программы DentCAD, которые отличаются по функциональному набору инструментов:

DentCAD: создание простых и анатомических коронок и мостов, восковых моделей и язычных дуг ортодонтических протезов.

DentCAD Plus: расширенная версия. Добавлены отдельные (спрессовываемые) коронки, анатомические и частичные вкладки и накладки.

DentCAD Pro: версия с самым полным набором инструментов: помимо всех вышеперечисленных функций, также возможно проектировать абатменты индивидуальной формы и балочные конструкции.

5. Подготовка управляющей программы в системе DentMill.

После проработки геометрии изделий в системе DentCAD полученные данные передаются в САМ-систему DentMILL. Она предназначена для программирования обработки изделий на станках с ЧПУ (см. рис. 43, см. цв. вкл.).

В САМ-системе **DentMILL** генерируются траектории обработки, которые посредством постпроцессора переводятся на понятный станку «язык» — в управляющую программу.

Эта программа, как и DentCAD, ориентирована на неопытных пользователей, не имеющих опыта работы с САМ-системами и программирования станков с ЧПУ.

С точки зрения пользователя, DentMILL — очень простой в освоении и эксплуатации продукт, обладающий интуитивным интерфейсом.

На основе заложенных в него методик DentMILL автоматически назначит наиболее подходящие стратегии и режимы обработки, поэтому даже неопытный пользователь может быть уверен в хорошем и стабильном результате.

DentMILL позволяет изготавливать на фрезерном станке с ЧПУ зубные протезы с очень высокой точностью и хорошим качеством внешней поверхности. Необходимо задать размеры и тип заготовки, а затем рационально разместить на ней обрабатываемые изделия.

Все остальные действия по подготовке управляющей программы DentMILL выполнит в автоматическом режиме. Таким образом, DentMILL может с успехом эксплуатироваться персоналом без глубоких специальных познаний в области механообработки и опыта работы со станками с ЧПУ.

6. Вытачивание протезов на станке с ЧПУ. Полученные из DentMILL управляющие программы отправляют на станок с ЧПУ (см. рис. 44, см. цв. вкл.).

В комплексе CAD/CAM применяется вертикально-фрезерный 4-координатный станок с числовым программным управлением Roland (Япония), специально ориентированный на использование в зубопротезных лабораториях.

Для решения задач стоматологического кабинета на станок устанавливается автоматическая смена инструмента и поворотная ось, что позволяет выполнять в автоматическом режиме четырехосевую обработку.

Основные характеристики станка САММ-3 MDX-540A:

Обрабатываемые материалы: пластмассы, дерево, цветные металлы.

Габариты: 745 × 995 × 858 мм.

Вес: 102 кг.

Питание: 230 В, 50 Гц.

Потребляемая мощность: до 1 кВт.

Шпиндель: 12 000; 60 000 об/мин (при установке высокоскоростного шпинделя).

Интерфейс: USB.

Размеры обрабатываемой детали: 15–100 мм.

Для вытачивания протезов не только из оксида циркония, но и из спеченного циркония (с целью минимизации неточности протеза в связи с усадкой материала в процессе термической обработки),

а также из титана используют более мощные фрезерные станки, на пример Rodes (рис. 45, см. цв. вкл.).

7. Спекание. В специальной печи производят термическую обработку изделий до получения готового продукта — зубных протезов (см. рис. 39, цв. вкл.).

8. Готовое изделие. Полученные зубные протезы при необходимости обрабатывают для сглаживания микронеровностей и придания им эстетически приемлемого вида (см. рис. 39, цв. вкл.).

Компьютерная технология CEREC

Применение передовых CAD/CAM-достижений нашло отражение в технологии моделирования экономичных функциональных и эстетических керамических реставраций CEREC (от англ. Chairside Economical Restorations of Esthetic Ceramic или CEramic REConstruction).

CEREC — это возможность изготовления цельнокерамических вкладок («инлей», «онлей»), частичных коронок, виниров, коронок на фронтальную и жевательную группу зубов, эндокоронок, а также временных мостовидных протезов до четырех единиц. CEREC объединяет в себе преимущества большого спектра эстетических реставраций, а также предлагает пациенту комфортное лечение за одно посещение без традиционных слепков и временных реставраций [48, 52–57].

Компьютерная технология CEREC позволяет сделать цельнокерамическую реставрацию в одно посещение от начала и до конца. Врач препарирует зуб под необходимую конструкцию: вкладку, коронку или винир. При помощи 3D-камеры делается объемный оптический снимок зуба, который обрабатывается компьютером. В итоге получается точная 3D-модель зуба на экране монитора.

Врач приступает к компьютерному моделированию будущей реставрации, придавая ей индивидуальные анатомические особенности. Пациент может участвовать в этом процессе, высказывая свои пожелания. Процесс моделировки занимает от 5 до 15 мин на один зуб.

После окончания моделировки данные отправляют на шлифовальный модуль, в котором из заранее подобранного по размеру и цвету керамического блока вытачивается реставрация. Этот процесс занимает от 10 до 30 мин в зависимости от размера реставрации. Конструкция примеряется во рту, окончательно подгоняется по прикусу и цвету. Реставрация фиксируется на зуб с помощью сверхпрочного адгезивного цемента.

Протезирование с изготовлением вкладок и коронок на CEREC применяется в основном для замещения одиночных дефектов зубов.

При обширном плане ортопедического лечения с изготовлением множества коронок используют традиционную технику снятия оттисков.

Технология CEREC имеет ряд неоспоримых преимуществ:

— Экономия времени — в течение одного посещения пациента выполняется вся работа от начала препарирования до фиксации. В зависимости от сложности полученной вкладки врач тратит 1–2 ч рабочего времени. При стандартном, непрямом, методе реставрации зубов, данный процесс может занять 2–3 дня или более.

— Универсальность — применяется как при восстановлении зуба, так и для изготовления пломб, мостиков, виниров.

— Моделирование выполняется при увеличении $\times 12$, поэтому резко повышается качество конструирования. Это позволяет исключительно точно изготовить вкладку — расстояние между вкладкой и стенкой зуба составляет 25–60 мкм. Чтобы зафиксировать реставрацию, необходим минимум адгезионного материала. Обеспечивается максимальное соответствие поверхностей протеза окружающим его тканям и зубам.

— Поскольку зафиксировать конструкцию можно в течение короткого времени после препарирования, полностью исключена возможность повредить дентин и зубную эмаль под внешним воздействием. Это способствует хорошей «прилипаемости» материала к зубным тканям, защищает полость рта от вторичного инфицирования и, как следствие, вторичного кариеса, что весьма актуально при изготовлении и фиксации виниров.

— Сама вкладка вытачивается из произведенного промышленным путем и имеющего однородную структуру фарфора высокого качества, что дает возможность сохранить оптимальную прочность и твердость полученной вкладки, близкую к зубной эмали. Такой фарфор отлично полируется, его можно также глазировать и подкрашивать в печи для обжига керамики.

На сегодня это самая современная технология производства карасов зубных протезов.

Практические приемы применения технологии CEREC

Рассмотрим далее практические методы и приемы, используемые при изготовлении зубных протезов по технологии CEREC [54].

Технология CEREC 3 позволяет за одно посещение пациента без установки временных протезов конструировать и изготавливать биосовместимые, имеющие вид естественных зубов реставрации (коронки, виниры, вкладки и пр.) из высококачественной и стойкой безметалловой керамики. Этот материал абсолютно гипоаллергенен, не впитывает влагу и со временем не меняет цвет, по прочности в несколько раз превосходит эмаль натурального зуба.

Область, где будет проводиться реставрация, для повышения светоотражательной способности покрывают тонким слоем белого порошка (рис. 46, см. цв. вкл.). При помощи 3D-сканера CEREC 3D изображение выводится на экран монитора, после чего стоматолог приступает к построению реставрации.

Персональный компьютер с платой для захвата 3D-изображений оснащен специальной программой **CEREC inLab 3D**. Программа распознает трехмерные изображения препарированных зубов, соседних зубов и антагонистов (противоположных зубов) и моделирует системные предложения по конструированию реставрации из банка данных, составленного из нескольких тысяч оптических слепков естественных зубов (рис. 47, см. цв. вкл.).

При необходимости врач может внести изменения в предложенную программой реставрацию. В отличие от ручной работы техника, врач на экране монитора моделирует недостающую часть зуба, тщательно обрисовывая ее границы. Изображение увеличено в 12 раз, что позволяет значительно повысить точность конструирования. После прорисовки всех линий компьютер вычисляет объем вкладки и передает эти данные в шлифовальный блок.

Безметалловая керамика CEREC надежна и неотличима от собственных зубов пациента. Использование прошедших термическую обработку и поэтому не имеющих усадки керамических блоков с гомогенной структурой материала позволяет значительно улучшить процесс изготовления реставраций (рис. 48, 49, см. цв. вкл.).

Врач-стоматолог полностью контролирует процесс реставрации зуба до получения конечного результата (см. рис. 49). При использовании технологии CEREC не требуются услуги зубного техника и стоматологической лаборатории и соответственно исключается ряд этапов (снятие оттиска, изготовление слепка и модели). Каждый из этих этапов работы вносил свои погрешности в конфигурацию зубного протеза за счет особенностей материала и квалификации зубного техника, который даже и не видел пациента.

Коронки из оксида циркония химически и биологически индифферентны, поэтому не вызывают раздражения тканей полости рта. У них однородная структура и прозрачность, соответствующая тканям зуба. За счет использования керамической коронки или винира с более тонкой стенкой удастся сохранить больший объем естественных тканей реставрируемого зуба. Керамика обладает высокой прочностью и термоизоляцией, предохраняя культю зуба от механических и температурных раздражителей. Современные блоки-заготовки, из которых изготавливают коронки, имеют по всей массе блока градиент окраски, соответствующий естественному распределению цвета зуба пациента.

Все процедуры, требующие анестезии при реставрации зуба, могут быть осуществлены в минимальные сроки (в пределах часа). Дополнительных инъекций для снятия болевого синдрома не требуется. Снижается риск вторичного кариеса и проведения повторных манипуляций в отсроченный период. Долгосрочный прогноз продолжительности эксплуатации реставрации зависит от вероятности развития вторичного кариеса тканей зуба в месте установки реставрационного элемента.

Металлокерамика или композитные виниры состоят из нескольких материалов (металл, керамика, полимер), каждый из которых существенно отличается по характеристикам не только от тканей зуба, но и друг от друга. У каждого из материалов свои индивидуальные физико-химические показатели: объемного и линейного теплового расширения, упругости, химической и коррозионной устойчивости и т. д. В итоге каждый компонент такой коронки и самого зуба по-разному откликается на внешние воздействия при циклах горячее/холодное, жевательных нагрузках, приеме агрессивных жидкостей. Это ведет к возникновению микроразрывов напряжения и их концентрации в коронке, разрушению связующего компонента с тканью зуба, образованию микротрещин и зазоров, в которых абсорбируется и размножается патогенная микрофлора. В результате развивается вторичный кариес.

Преимущество безметалловой керамики в том, что она имеет гомогенную структуру на всю толщину изготовленного реставрационного элемента и поэтому равномерно воспринимает и распределяет все нагрузки, аналогично тканям зуба. Она не поддается окислению и коррозии даже при контакте с агрессивной средой (кислой или щелочной), приеме напитков и продуктов. Быстрота проведения реставрации не дает возможности патогенной микрофлоре обосноваться в тканях зуба, подготовленных для реставрации, как это происходит, когда пациенту приходится ходить с обточенными зубами и ждать несколько дней или недель при изготовлении коронок обычным способом.

Практические способы применения 3D-печати в ортопедической стоматологии

Для печати 3D-модели зуба вначале производят сканирование полости рта пациента с использованием стоматологического 3D-сканера (рис. 50, см. цв. вкл.).

После того как получен скан полости рта, данные вводятся в компьютер (рис. 51, см. цв. вкл.). Далее специальная программа, осуществляющая работу с изображениями, выстраивает виртуальную модель будущего зубного протеза. Затем оператор производит

компьютерную корректировку модели и контролирует процесс изготовления виртуального каркаса (рис. 52, 53, см. цв. вкл.).

После того как виртуальная модель зубного протеза будет готова, компьютерная программа сформирует задание для печати на 3D-принтере и пошлет его на печать (рис. 54, см. цв. вкл.).

Процесс печати каркасов коронок и зубных протезов на 3D-принтере (см. рис. 53, цв. вкл.) выполняется послойно из биосовместимых материалов. Исходя из местных условий работы, в зуботехнической лаборатории могут быть использованы и иные технологии трехмерной печати, рассмотренные ранее.

На рис. 55 и 56 (см. цв. вкл.) [5, 6] показаны готовые изделия, выполненные методом послойной печати. Слой керамики или металла напыляют на готовый каркас, после чего протез становится пригодным для эксплуатации.

Заключительный этап — установка зубного протеза пациенту и проведение инструктажа по его правильной эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из анализа хода развития исторического процесса уже в самом недалеком будущем следует ожидать появления новых методов 4D-технологии. Что представляет собой новая ось развития? В физике под четырехмерным миром понимают пространство — время. На практике появление таких технологий может означать появление печатных моделей, которые могут адаптироваться по желанию пользователя под изменяющиеся условия окружающего мира, приспособившись к ним.

Следующим этапом можно ожидать наделение неживой материи свойствами живой, т. е. разумом. Уже сейчас существуют самообучающиеся и самосовершенствующиеся нейросетевые технологии — предтеча искусственного, хотя и примитивного, разума. Уже сейчас существуют полупроводниковые структуры на основе полимерных и биополимерных композиций, на базе которых в перспективе будут созданы электронные вычислительные машины — биокомпьютеры, позволяющие полноценно заменять тот или иной утраченный или поврежденный орган или функцию человека или животного.

В 2013 г. в сфере 3D-печати произошло сразу несколько революционных событий:

- в операционной системе Microsoft Windows начиная с версии 8.1 появилось приложение 3D Builder для 3D-печати;
- на 3D-принтерах начали печатать качественные челюстно-лицевые протезы, появился медицинский 3D-принтер BioPen для замены во время операции поврежденной костной ткани пациента;
- американские ученые напечатали бионическое ухо, способное улавливать радиоволны;
- британские ученые напечатали на 3D-принтере глазную сетчатку крысы;
- появились 4D-материалы, способные менять форму под действием давления, температуры.

К настоящему времени для медицинского и биологического применения изобрели специализированные 3D-биопринтеры, которые печатают не фотополимерами, а живыми клетками, в том числе стволовыми. С помощью таких принтеров в ближайшие десятилетия начнут выращивать органы и ткани для пересадки в организм человека.

Появление таких технологий сейчас представляется фантастикой, но кто из нас еще несколько десятилетий назад мог предвидеть появление и широкое распространение сотовой связи, компьютеров, многого того, что теперь окружает нас, без чего мы уже не можем обойтись и что мы воспринимаем без малейшего сомнения в их необходимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Напечатанное здоровье: 3D-принтеры в медицине. URL: <http://www.sharovalov.org/news/2012-11-13-2107> (дата обращения: 20.10.2014).

2. Принтер 3D — город своими руками. URL: <http://www.max-park.com/community/3652/content/1902594> (дата обращения: 20.10.2014).

3. 3DCORP — центр 3D технологий. URL: <http://www.3dcorp.ru/> (дата обращения: 20.10.2014).

4. 3D-принтер. URL: <http://www.ratsuha.com/viewtopic.php?f=30&p=20207> (дата обращения: 20.10.2014).

5. Обзор технологий 3D-печати. URL: <http://www.orgprint.com/wiki/3d-pechat/obzor-tehnologij-3d-pechati> (дата обращения: 20.10.2014).

6. Технология, история и основные тенденции 3D-печати. URL: <http://www.orgprint.com/novosti/Vsjo-o-3D-pechati-tehnologija-istorija-realii-i-osnovnye-tendencii> (дата обращения: 20.10.2014).

7. Технологии, используемые в 3D-печати. URL: <http://www.3dcorp.ru/tehnology-3dprint.html> (дата обращения: 20.10.2014).

8. Виды 3D-принтеров и 3D-печати. URL: <http://www.3dtool.ru/vidy-3d-pechati/> (дата обращения: 20.10.2014).

9. Прототипирование. URL: <http://www.cad.dp.ua/obzors/prototip.php> (дата обращения: 20.10.2014).

10. Обзор технологий 3D-печати. URL: <http://www.itemprint.ru/news/240-obzor-tehnologiy-3d-pechati.html> (дата обращения: 20.10.2014).

11. Вихров С. П., Холомина Т. А., Бегун П. И., Афонин П. Н. Биомедицинское материаловедение. — М.: Горячая линия — Телеком, 2006. — 384 с.

12. Биосовместимые материалы / под ред. В. И. Севастьянова, М. П. Кирпичникова. — М.: Медицинское информационное агентство, 2011. — 544 с.

13. Штильман М. И. Полимеры медико-биологического назначения. — М.: ИКЦ Академкнига, 2006. — 400 с.

14. Обзор расходных материалов для 3D-принтеров. URL: <http://www.itemprint.ru/spend/251-obzor-rashodnyh-materialov-dlya-3d-printerov.html> (дата обращения: 20.10.2014).

15. Материалы, которые мы используем для 3D-печати на профессиональных 3D-принтерах. URL: <http://www.materiallab.ru/> (дата обращения: 20.10.2014).

16. Семь типичных ошибок при выборе 3D-принтера. URL: <http://www.3dtoday.ru/> (дата обращения: 20.10.2014).

17. Спрей для 3D-сканирования. URL: <http://www.3dcorp.ru/U89.html> (дата обращения: 20.10.2014).

18. Материалы для 3d-принтера: PLA и ABS-пластик, а также ПВА-пластик и нейлон. URL: <http://www.koloro.com.ua/blog/3d-modelirovanie-i-3d-pechat/materialy-dlya-3d-printera-pla-i-abs-plastik-a-takzhe-pva-plastik-i-nejlon.html> (дата обращения: 20.10.2014).

19. МРТ — магнитно-резонансный томограф. URL: <http://www.stomaks.ru/content/view/58/66> (дата обращения: 20.10.2014).

20. Все о магнитно-резонансной томографии (МРТ). URL: <http://www.tiensmed.ru/news/mrt1.html> (дата обращения: 20.10.2014).

21. *Альшери М. А., Алябри Х. М., Альшалхуб М. А.* Применение компьютерного томографа — конусно-лучевая компьютерная томография в стоматологии : обзор литературы // Dental Tribune. Russian Edition. — 2011. — № 2. — С. 2—6.

22. 3D компьютерный томограф SkyView 9". URL: <http://www.ukrmed-dental.com/3-D-TOMOGRAFY/50-3D-komp-yuternyy-tomograf-SkyView-9.html> (дата обращения: 20.10.2014).

23. КТ и МРТ — что лучше, компьютерная или магнитно-резонансная томография. URL: <http://www.nazdor.ru/topics/improvement/devices/current/470395/#Продолжение> (дата обращения: 20.10.2014).

24. UNA. Оборудование и материалы для стоматологии. URL: <http://www.una-nsk.ru/product/46/20/> (дата обращения: 20.10.2014).

25. Стоматологический томограф KaVo-3D-eXam. URL: <http://www.kavodental.ru/RU/Продукты/Рентгеновское-оборудование/KaVo-3D-eXam.aspx> (дата обращения: 20.10.2014).

26. Imaging Sciences выпустила новую систему трехмерной визуализации. URL: <http://www.alliance-stom.kz/2014/06/17/imaging-sciences-выпустила-новую-систему-трехмерно/> (дата обращения: 20.10.2014).

27. 3D-сканеры. URL: <http://www.scan-pro.ru/catalog.php?id=325> (дата обращения: 20.10.2014).

28. ГЛОБАТЕК.3D. Профессиональное 3D-оборудование: продажа, сервис, услуги. URL: <http://www.3d.globatek.ru/> (дата обращения: 20.10.2014).

29. 3D-оборудование. URL: <http://www.top3dshop.ru/> (дата обращения: 20.10.2014).

30. IT SHOP. URL: <http://www.itshop.ru/> (дата обращения: 20.10.2014).

31. UNA. Каталог оборудования и материалов. Сканер S50. URL: <http://www.una-nsk.ru/product/88/191/> (дата обращения: 20.10.2014).

32. UNA. Каталог оборудования и материалов. Сканер Zenotec s107. URL: <http://www.una-nsk.ru/product/88/194/> (дата обращения: 20.10.2014).

33. Фрезерные станки с ЧПУ. URL: <http://www.yusto.ru/katalog/frezernye-stanki/> (дата обращения: 20.10.2014).

34. URL: http://www.moccklad.ru/_COMPAREPAGE (дата обращения: 20.10.2014).

35. Моссклад. Металлообрабатывающие станки со склада. URL: <http://www.una-nsk.ru/product/88/190/> (дата обращения: 20.10.2014).

36. Компания Нео Вейтус. Установки газовой и плазменной резки с ЧПУ. URL: <http://xn--b1afbqqhyhj.xn--p1ai/catalog/ustanovki-gazovoy-i-plazmennoy-rezki-s-chpu-eckert-polsha/> (дата обращения: 20.10.2014).

37. ЗАО «Научно-внедренческое предприятие «Топаз.»» Технологии лазерной обработки материалов. URL: http://topaz.tomsk.ru/tehnologii_lazernoi_obrabotki_materialov.html (дата обращения: 20.10.2014).

38. Jetcom. Профессиональные и офисные 3D-принтеры Stratasys. URL: <http://stratasys.com.ru> (дата обращения: 20.10.2014).

39. НИКС — компьютерный супермаркет. URL: <http://www.nix.ru/> (дата обращения: 20.10.2014).

40. ItemPrint — 3D печать предметов. Создан 3-D принтер, сканер, экструдер в одном корпусе. URL: <http://www.itemprint.ru/news/> (дата обращения: 20.10.2014).

41. ItemPrint — 3D печать предметов. Picaso 3D-Builder — сделано в России. URL: <http://www.itemprint.ru/model3dprinters/> (дата обращения: 20.10.2014).

42. URL: <http://www.trikvetra.ru/> (дата обращения: 20.10.2014).

43. «Трикветра» — интернет-магазин любой офисной техники. URL: <http://www.losprinters.ru/news/obzor-osnovnyh-programm-dlya-3d-modelirovaniya/> (дата обращения: 20.10.2014).

44. 3DTin. URL: <http://www.3dtin.com/> (дата обращения: 20.10.2014).

45. Агасарян А. С., Дроздков М. Ю. Современные технологии изготовления зубных протезов по системе CAD/CAM. URL: <http://www.vol-gostom.ru/stati-nauchnie-terapevticheskaya-stomatologiya/sovremennie-technologii-izgotovleniya-zubnich-protetov-po-sisteme-cad-cam> (дата обращения: 20.10.2014).

46. *Вольваг С. И.* Обзор новых разработок и модификаций известных технологий CAD/CAM стоматологического назначения. Ч. 3 : Технологии изготовления цельнокерамических реставраций из «мягкой» керамики // Новое в стоматологии для зубных техников. — 2004. — № 2. — С. 98–102.

47. *Щербаков А. С., Уханов М. М., Иванова С. Б., Гришин А. А.* CAD/CAM система digiDent — просторы для творчества. URL: <http://www.dental-revue.ru/index.php?page=03&subPage=01&artId=18> (дата обращения: 20.10.2014).

48. *Ряховский А. Н., Карапетян А. А., Трифонов Б. В.* Сравнение четырех CAD/CAM-систем (Cerec inLab, Everest, DCS и Hint-Els) для изготовления зубных протезов // Панорама ортопедической стоматологии. — 2006. — № 3 (Ноябрь). — С. 8–19.

49. *Ряховский А. Н., Карапетян А. А., Аваков Г. С.* Сравнительное исследование различных CAD/CAM-систем для изготовления каркасов несъемных зубных протезов // Стоматология. — 2011. — № 2. — С. 57–61.

50. *Ряховский А. Н., Полякова М. В.* Компьютерное проектирование зубных рядов полных съемных протезов // Стоматология. — 2011. — № 2. — С. 65–70.

51. CADPROFY. CAD/CAM-системы для стоматологии. URL: <http://www.cadprofy.com/Otrasleyve-resheniya/CAD-CAM-Stomatologiya> (дата обращения: 20.10.2014).

52. *Шагидуллин М. Т., Хафизов И. Р.* Применение современных компьютерных технологий в ортопедической стоматологии. URL: http://grani3.kznscience.ru/data/documents/6_Shagidullin.pdf (дата обращения: 20.10.2014).

53. NSELLA. CAD/CAM-системы. URL: http://www.nsella.ru/categories/CAD_CAM/ (дата обращения: 20.10.2014).

54. Клиника лазерной стоматологии «Дента Люкс». Эстетические реставрации CEREC. URL: <http://www.dentaluxe.me/orto/restavratsii-CERE/> (дата обращения: 20.10.2014).

55. *Ряховский А. Н.* Цифровая стоматология. — М.: ООО «Авантис», 2010. — 282 с.

56. Протетическая реставрация зубов. Система CEREC / под ред. В. Н. Трезубова, С. Д. Арутюнова. — СПб.: СпецЛит, 2003. — 64 с.

57. *Alan D.* Cerec inLab: the CAD/CAM system with a difference // Acta Med. Dent. Helv. — 2003. — № 5. — P. 131–139.

58. Интернет-магазин 3D принтеров и сканеров. FAQ. URL: http://www.cube-3d.ru/index.php?route=information/information&information_id=17 (дата обращения: 20.10.2014).

Дополнительная литература

1. <http://www.3d.globatek.ru>
2. <http://www.abs3d.ru>
3. <http://www.cube-3d.ru>
4. <http://www.top3dshop.ru>
5. *Henkel S.* Качество с самого начала. Использование технологии цифровых оттисков для изготовления качественных реставраций // LAB журнал для ортопедов и зубных техников. – 2007. – № 4. – С. 54–56.
6. *Вольваг С. И.* Обзор новых разработок и модификаций известных технологий CAD/CAM стоматологического назначения // Новое в стоматологии для зубных техников. – 2003. – № 7. – С. 75.
7. *Грезко А. М.* Технологии быстрого прототипирования – от детской игрушки до мирового господства // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2013. – № 65 (1038). – С. 14–36.
8. *Ряховский А. Н.* 3D-технологии в стоматологии // Стоматология. – 2011. – № 2. – С. 85–88.
9. *Ряховский А. Н.* Применение компьютерных 3D-технологий на этапе планирования и проведения дентальной имплантации // Стоматология. – 2011. – № 2. – С. 85–88.
10. *Ряховский А. Н., Левицкий В. В.* Система 3D-визуализации лица и зубных рядов // Панорама ортопедической стоматологии. – 2008. – № 1. – С. 2–4.
11. *Ряховский А. Н., Левицкий В. В., Мурадов М. А., Карапетян А. А., Юмашев А. В.* Сравнительная оценка методов трехмерного сканирования лица // Панорама ортопедической стоматологии. – 2007. – № 4. – С. 10–13.
12. *Тарнопольский К. Б.* 3D-технологии сегодня открывают новые возможности развития стоматологии // Стоматологический бизнес. – 2010. – № 6 (39). – С. 33.

Ссылки на видеофайлы, в которых демонстрируется процесс создания зубных протезов с применением 3D-технологий

1. <http://www.youtube.com/watch?v=SHM7DzjXyy8>
2. <http://www.youtube.com/watch?v=C8pN4oYWB2Q>
3. <http://www.youtube.com/watch?v=TUFlZAu83As>
4. <http://www.youtube.com/watch?v=lKfbJAUEX0c>
5. <http://www.youtube.com/watch?v=M4gMBVtgpPU>
6. http://www.youtube.com/watch?v=96Er-JSSf_Y

7. <http://www.youtube.com/watch?v=J7tXu-X-wZ8>
8. <http://www.youtube.com/watch?v=4EIUhq-n92c>
9. http://www.youtube.com/watch?v=sn9Cm-_GwBU
10. <http://www.youtube.com/watch?v=n-jUHAjweDc>
11. <http://www.youtube.com/watch?v=laLmwt2963M>
12. <http://www.youtube.com/watch?v=Am7t3DtU0xE>
13. <http://www.youtube.com/watch?v=hWxYpDQjHbo>
14. <http://www.youtube.com/watch?v=eOAFcFgMZ-8>
15. <http://www.youtube.com/watch?v=h31PYAR6RnM>
16. <http://www.youtube.com/watch?v=weiVuCcXbzk>
17. <http://www.youtube.com/watch?v=LRU0dk0KBJQ>
18. <http://www.youtube.com/watch?v=1WFB9LLRLT8>
19. <http://www.youtube.com/watch?v=KfUOmYDw650>
20. <http://www.youtube.com/watch?v=NnG4-cRaOLE>
21. <http://www.youtube.com/watch?v=WueUU3PrX0A>
22. <http://www.youtube.com/watch?v=h7VMcm2OICs>

Валентина Алексеевна **Шустова**,
Михаил Анатольевич **Шустов**

**ПРИМЕНЕНИЕ 3D-ТЕХНОЛОГИЙ
В ОРТОПЕДИЧЕСКОЙ СТОМАТОЛОГИИ**

Редактор *Ивакина Н. Н.*
Корректор *Борисенкова А. А.*
Компьютерная верстка *Габерган Е. С.*

Подписано в печать 08.11.2016. Формат 60 × 88 ¹/₁₆.
Печ. л. 10,00 + 1,25 печ. л. цв. вкл. Тираж 1000 экз. Заказ №

ООО «Издательство „СпецЛит“».
190103, Санкт-Петербург, 10-я Красноармейская ул., 15
Тел.: (812) 495-38-94, 495-36-12
<http://www.speclit.spb.ru>

Отпечатано в ООО «Литография Принт»,
191119, Санкт-Петербург, Днепропетровская ул., д. 8