

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	Photosculpture	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.

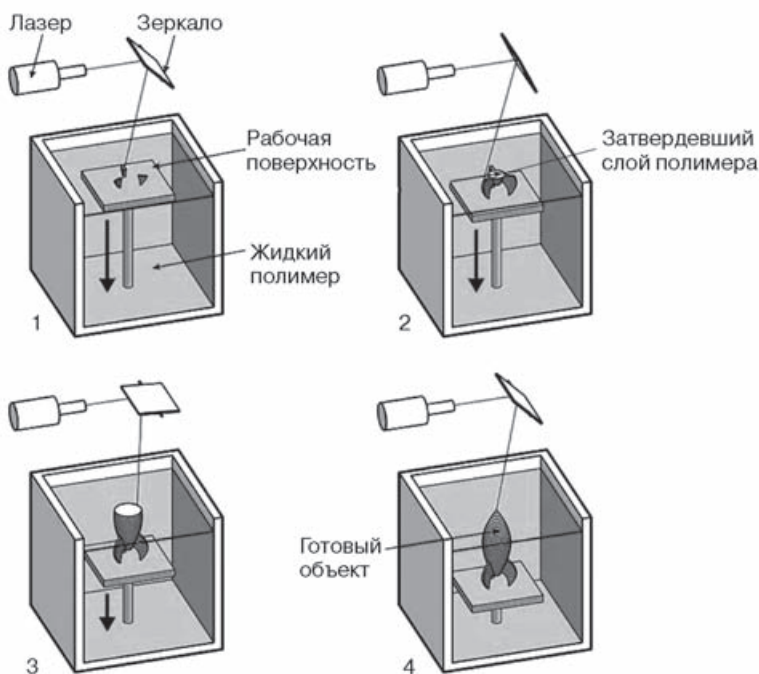


Рис. 1. Принцип работы установки для стереолитографии (пояснения даны в тексте)

На основе технологии ламинирования компания Helisys (1985–2000 гг.), созданная М. Фейгенмом, 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.

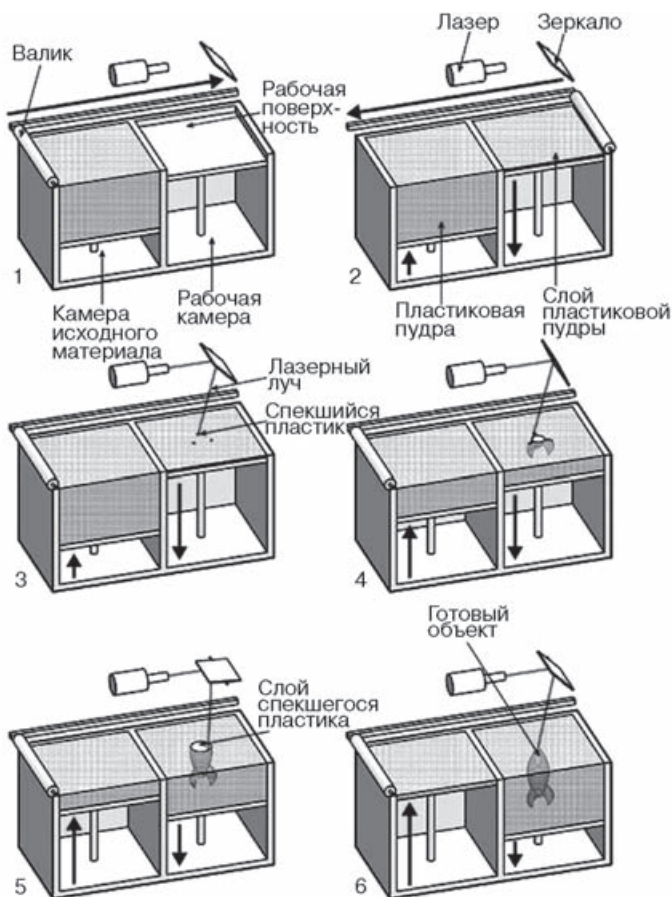


Рис. 2. Принцип работы установки для селективного лазерного спекания материалов (пояснения даны в тексте)

В 1999 г. DTM частично продали 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.

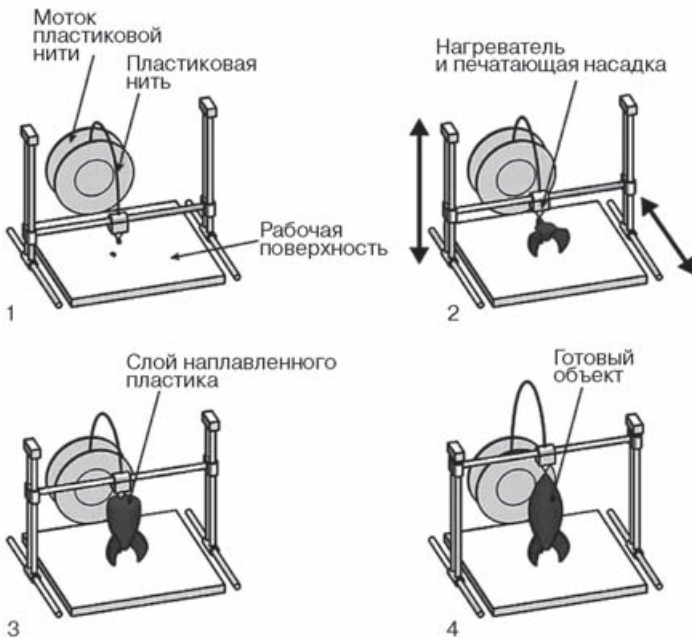


Рис. 3. Принцип работы установки для послойного наплавления пластика (пояснения даны в тексте)

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