

УДК 004.925.84 : 629.5

Л.С. Баева, А.А. Маринин

Современные технологии аддитивного изготовления объектов

L.S. Baeva, A.A. Marinin

Modern technologies of additive manufacturing of objects

Аннотация. Проведен анализ преимуществ и недостатков современных аддитивных технологий. Представлена терминология, используемая в данной области знаний.

Abstract. Advantages and disadvantages of modern additive technologies have been analyzed. The terminology used in the field of knowledge has been presented.

Ключевые слова: аддитивная технология, 3D-принтер, быстрое прототипирование
Key words: additive technology, 3D-printer, rapid prototyping

1. Введение

Аддитивная технология, получившая развитие с 80-х гг. XX в., открывает возможность изготовления (выращивания) объектов посредством поэтапного нанесения материала построения на генерируемый объект. Начальным этапом в развитии данной технологии было быстрое прототипирование (*Rapid Prototyping, RP*). Первые *RP*-принтеры были сконструированы с целью сокращения времени, затрачиваемого на изготовление моделей (прототипов), оценку инженерами-конструкторами и дизайнерами эргономических и эстетических особенностей будущего изделия и их корректировку. Появление *RP*-технологии обусловлено совершенствованием вычислительной техники, 3D-моделирования, в процессе которого создается цифровое описание объекта и производится его преобразование в реальную физическую модель с помощью *RP*-принтера (*Heynick, Stotz, 2000*).

В отличие от технологии механической обработки, работающей по принципу "вычитания", т.е. поэтапного удаления материала с заготовки до получения необходимых формы и размера, современные аддитивные технологии работают по принципу послойного "добавления" – выращивания изделия посредством нанесения слоев равной толщины на основе его компьютерной модели, созданной при использовании программы *CAD (Computer-aided design) (Barnatt, 2013)*.

Рост количества технологических решений, позволяющих осуществлять 3D-печать, обусловлен массовым интересом к данному вопросу, доступностью современных технологий и материалов, дающих возможность конструировать, испытывать и использовать принтеры в домашних условиях. Повышение интереса, в свою очередь, объясняется тем, что данная технология затронула многие сферы деятельности человека: культуру, производство, даже здравоохранение. Следует отметить значительную роль аддитивных технологий в судостроении: гидродинамические испытания точных моделей судов любой сложности в лаборатории позволяют получить достоверные данные о поведении судов в условиях, максимально приближенных к реальным (*Evans, 2012*).

Высокий темп развития аддитивных технологий ведет к быстрой потере актуальности материалов, написанных по данной теме некоторое время назад. Кроме того, в литературе можно встретить новые термины и аббревиатуры, которые могут быть непонятны читателю. Целью данной статьи является анализ преимуществ и недостатков современных аддитивных технологий, а также определение понятий и расшифровка аббревиатур, встречающихся в литературе по данной теме.

2. Основные технологии

2.1. Технологии отверждения жидкостей

3D-печать – аддитивная технология, в которой объект создается послойно (посредством нанесения большого количества тонких слоев). Первый коммерческий 3D-принтер был основан на стереолитографии (*Stereolithography Apparatus, SLA*), разработанной Чарльзом Халлом (*Charles Hull*) в 1984 г. Стереолитографический принтер имеет платформу, которую погружают в бак с жидким фотополимером. Она располагается непосредственно под поверхностью на глубине генерируемого слоя. Лазер проходит по просчитанной поверхности выращиваемого сечения объекта, в результате чего тонкий слой фотополимера затвердевает. Затем платформа опускается ниже, образуя над отвердевшим слоем очередной тонкий слой жидкого полимера, и лазер вновь обрисовывает следующий слой на поверхности предыдущего. Слой за слоем платформа опускается вглубь бака до полного построения объекта в жидком фотополимере.

Стереолитографический принтер является одним из точнейших оборудований 3D-печати: толщина генерируемого слоя составляет 0,06 мм; точность в Z-направлении равна 0,025 мм (рис. 1).

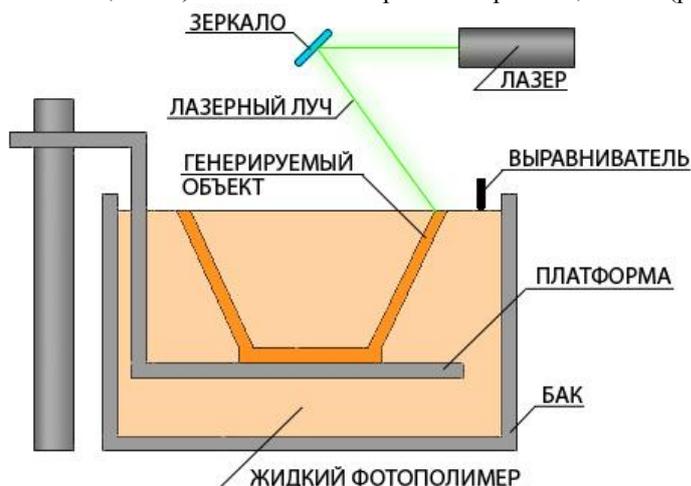


Рис. 1. Принципиальная схема SLA-принтера

Принтеры, основанные на технологии *Direct Light Processing (DLP)*, работают по принципу селективного отверждения жидкого фотополимера в баке. В таких принтерах вместо лазера (в отличие от SLA-технологии) используется проектор, засвечивающий статическое изображение выращиваемого слоя посредством ультрафиолетового излучения (УФИ). Жидкий фотополимер равномерно отвердевает в необходимой области слоя, благодаря чему достигается высокая скорость печати. При построении объект не опускается в полимер, а, наоборот, прилипнув основанием к платформе, поднимается над баком с полимером, оставаясь погруженным в него лишь на небольшую глубину (Heynick, Stotz, 2000).

При использовании технологии *Material Jetting* (коммерческое название *Polyjet Matrix*) жидкий фотополимер также отвердевает под действием светового излучения. Принтер имеет головку, наносящую жидкий полимер на плоскость построения, подобно струйным принтерам, печатающим чернилами по бумаге. По окончании нанесения всего слоя зону печати подвергают мощному УФИ для полного отверждения фотополимера, после чего наносится следующий слой.

Технология *Multi Jet Modeling (MJM)* является многосопловым аналогом технологии *Material Jetting*, преимуществом которой является то, что печатная головка может наносить разные материалы при построении одного объекта. Так, можно получать объекты, одни элементы которого изготовлены из твердого пластика, а другие из эластичного материала – резины.

Технология *Film Transfer Imaging (FTI)* является разработкой фирмы *3D Systems* и аналогом SLA-технологии, но с использованием фотополимера с иным составом.

2.2. Технологии экструзии расплавленных материалов

Технология осаждения полужидкого материала (*Fused Deposition Modelling, FDM*) (в основном горячего термопластика) из нагретой головки для формирования слоев объекта была изобретена Скоттом Крапом (Scott Crump) в 1988 г. Запатентовав свое изобретение и основав компанию *Stratasys*, он начал выпуск FDM-принтеров, в которых роликами полимерная нить с катушки подается с необходимой скоростью на нагретую головку в экструдере, где расплавляется и осаждается (с последующим отверждением) на плоскость построения для формирования очередного слоя. В качестве материала построения могут использоваться пластики *ABC (acrylonitrile butadiene styrene)* и *PLA (polylactic acid)*. Во избежание поломки выступающих частей или плохого качества печати необходимо использовать поддержку, для формирования которой имеется вторая головка и катушка с нитью материала поддержки. Точность печати в Z-направлении составляет 0,13 мм (рис. 2). Изготавливаются также принтеры, работающие по FDM-технологии без поддержки (Barnatt, 2013).

Многие производители 3D-принтеров используют другие названия FDM-технологии: *Thermoplastic Extrusion*, *Plastic Jet Printing (PJP)*, *Fused Filament Method (FFM)*, *Fused Filament Fabrication (FFF)*.

Несомненным преимуществом таких принтеров является использование тех же термопластиков, что и при традиционном литье под давлением, а также с их помощью возможна печать нагретым до полужидкого состояния пищевым сырьем (печать кондитерских изделий с использованием шоколада, печать сыром и др.).

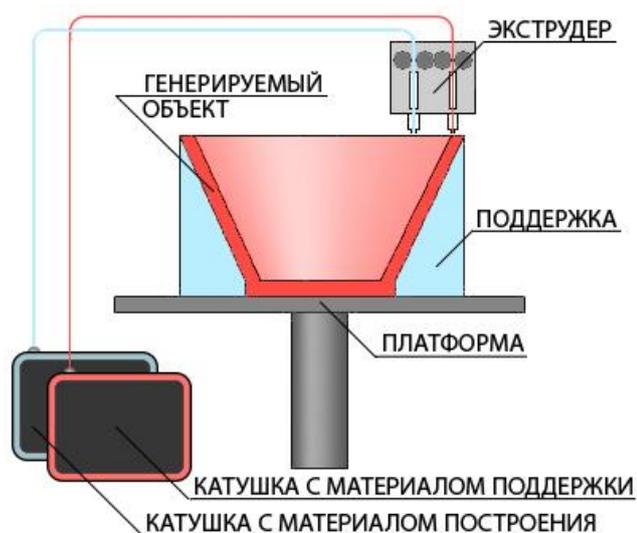


Рис. 2. Принципиальная схема FDM-принтера

2.3. Порошковые технологии

Порошковые технологии основаны на следующих принципах:

1. Выборочное склеивание порошкового материала построения.

В принтерах, работающих по технологии *Binder Jetting* (или *Inkjet Powder Printing*), происходит равномерное нанесение слоя порошка на плоскость построения с его последующим выборочным склеиванием посредством нанесения связующего вещества печатной головкой. Поэтапное нанесение равномерного слоя порошка и его склеивание продолжается до полного построения объекта. По окончании печати он извлекается из поддержки (в роли которой выступает сам материал построения) и очищается. В качестве материала построения используется в основном композитный материал на основе гипса. Точность печати в Z-направлении составляет 0,1 мм (рис. 3).

Преимущество данной технологии (касательно гипса) заключается в возможности печати полноцветных объектов цветными чернилами из специализированных головок, подобно печати на бумаге с помощью принтеров, выполняющих функции комбинирования цветных чернил и получения новых цветов.

В качестве материала построения можно использовать порошки (металлический, пластиковый), а также силикаты. Использование силикатов открывает возможность печати литейных форм для изготовления металлических отливок любой сложности и конфигурации.

По завершении печати с использованием металлического порошка в качестве материала построения объект помещается в печь до полного отвердевания связующего вещества, затем он извлекается из поддержки и очищается. Выращенный объект все еще довольно хрупок и на 40 % состоит из воздуха. В следующей печи по специальной технологии он, подобно губке, пропитывается порошковой бронзой. В результате получается готовое изделие, имеющее высокие механические свойства и на 99 % состоящее из металла.

В 3D-принтерах, работающих по технологии *Binder Jetting*, порошок, расположенный в плоскостях построения, но не участвующий в непосредственном формировании объекта, играет роль поддержки и подлежит повторному использованию.

2. Выборочное спекание порошкового материала.

Технология *Selective Laser Sintering* (SLS) является альтернативой методу склеивания порошка связующим веществом. В данном случае происходит выборочное спекание порошка лазером (рис. 3). В качестве материала для построения используется широкий спектр гранулированных (порошковых) материалов. Чаще всего применяются воск, полистирол, нейлон, керамика, стекло, нержавеющая сталь, титан, алюминий и другие металлические сплавы (*Lukkassen, Meidell, 2007*).

SLS-технология с применением металлических порошков носит специализированное название *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS). Выращенный объект состоит из металла (на 99,99 %) и имеет высокие механические свойства, поэтому может быть использован как готовое изделие.

SLS-печать воском дала возможность быстро производить восковки любой сложности для литья по выплавляемым моделям.

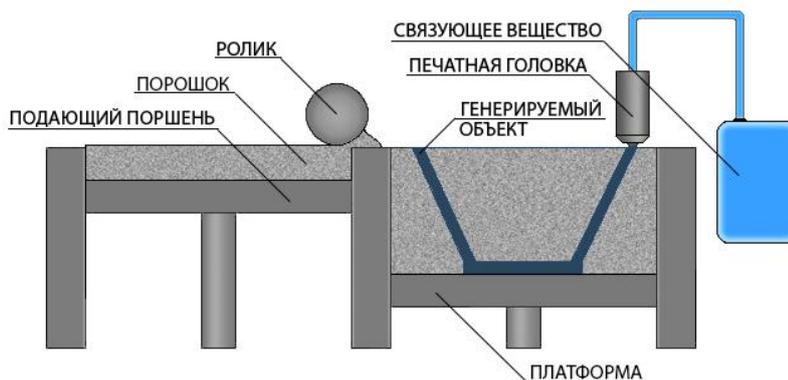


Рис. 3. Принципиальная схема 3D-принтера, работающего по технологии *Binder Jetting*

Следует отметить схожие технологии:

- 1) *Selective Heat Sintering (SHS)* – применение термопечатающей головки взамен лазера;
- 2) *Selective Laser Melting (SLM)* – полное расплавление порошка лазером в отличие от спекания;
- 3) *Electron Beam Melting (EBM)* – полное расплавление порошка направленным пучком электронов в отличие от спекания.

Иной способ воздействия на порошок используется при применении технологии *Directed Energy Deposition* (или *Laser Powder Forming*). Порошки из нержавеющей стали, меди, никеля, кобальта, алюминия или титана подают в луч мощного лазера для осаждения в расплавленном виде на плоскость построения (Barnatt, 2013).

3. Другие аддитивные технологии

В настоящее время получили развитие следующие технологии аддитивного изготовления объектов:

1. *Two Photon Polymerization (2PP)*. Сверхкороткие лазерные импульсы фокусируются в объем полимера толщиной в несколько сотен микрометров, который в составе имеет инициатор. Инициатор активируется и запускает реакцию полимеризации лишь при поглощении двух фотонов одновременно. Такая ситуация возможна лишь в фатальной точке лазера – его центре. Данная технология позволяет создавать объекты размером до 100 мкм.

2. *Solid Ground Curing (SGC)*. На плоскость построения наносится слой жидкого фотополимера, который затем отверждается с помощью УФ-лампы (через маску). Незасвеченные участки с жидким полимером очищаются, и образовавшиеся пустоты заполняются жидким воском, который затвердевает благодаря прислоненной холодной пластине. Затем слой фрезеруется до необходимой толщины и аналогично начинает формироваться следующий. Технология обладает достаточно высокой точностью в Z-направлении, но большое количество отходов при фрезеровании слоев и высокие эксплуатационные затраты на сложную конструкцию принтера повышают стоимость печати.

3. *Ballistic Particle Manufacturing (BPM)*. Выращивание объекта посредством нанесения микрокапель (струйного нанесения) расплавленного материала на поверхность построения из сопел движущейся печатной головки. Материал построения поступает к печатной головке уже в расплавленном состоянии. После окончания печати одного слоя платформа опускается и печатается следующий слой. В качестве материала построения могут использоваться, например, термопластик и воск.

4. *Laminated Object Modeling (LOM)*. При использовании данной технологии происходит склеивание тонких слоев материала построения посредством нагрева и сдвливания. Затем область слоя, не образующая тело выращиваемого объекта, мелко режется лазером, платформа с плоскостью построения опускается и наносится следующий слой. Операция повторяется до полного построения объекта. Таким образом, материал построения выполняет функции поддержки, которая затем удаляется механическим путем. В некоторых случаях при удалении поддержки могут возникнуть трудности. В качестве материала построения используется бумага, пластики и листы металла (Зорин, 2006; Lukkassen, Meidell, 2007).

5. Биопечать. Технология биопечати носит экспериментальный характер и используется в области построения трехмерных объектов. В настоящее время биопринтеры имеют различные конфигурации, но их принцип работы заключается в послойном нанесении на поверхность построения слоев живых клеток из печатной головки и использовании в качестве поддержки специального

растворимого геля. В перспективе данная технология позволит обеспечить пациентов, нуждающихся в восстановлении или полной замене какого-либо органа (Evans, 2012; Barnatt, 2013).

4. Производители 3D-принтеров

Для производственного применения доступен широкий спектр коммерческих 3D-принтеров от разных производителей. Наиболее крупными компаниями-производителями являются *3D Systems* (работает с большинством технологий и быстро поглощает более мелкие компании) и *Stratasys* (предлагает оборудование, работающее по технологиям *FDM* и *Polyjet Matrix*, а также специальные 3D-принтеры для стоматологических работ, печатающие воском). Обе эти компании в конце 2012 г. оценивались в три миллиарда долларов.

Можно отметить другие крупные производители 3D-принтеров, которые котируются на фондовой бирже: *Arcam* (выпускает принтеры, работающие по технологии *EMB*), *ExOne* (предлагает принтеры, функционирующие по технологии *Binder Jetting* с использованием силикатов и металлов) и *Organovo* (специализация – биопечать) (Barnatt, 2013).

5. Заключение

Проанализировав современные аддитивные технологии, можно выделить:

1) их преимущества:

- создание объекта с помощью одной процедуры;
- возможность изготовления объекта, который не может быть изготовлен иным способом;
- построение объекта любой сложности с минимальными временными затратами на приготовление процесса (нет необходимости в разработке технологического процесса);
- построение объекта, элементы которого состоят из разных материалов;

2) недостатки:

- дорогостоящие расходные материалы;
- невысокая точность при быстрой печати;
- относительно низкая прочность моделей;
- необходимость в некоторых случаях последующей обработки поверхности.

Аддитивные технологии быстро развиваются, и недостатков становится меньше. В настоящее время не все объекты, напечатанные на 3D-принтерах, могут являться готовыми изделиями. Развитие аддитивных технологий направлено на решение данной проблемы. Так, появился способ изготовления готовых изделий с помощью 3D-печати, получивший название прямого цифрового производства (*Direct Digital Manufacturing (DDM)*).

Литература

- Barnatt Ch.** 3D printing: The next industrial revolution. Nottingham, CreateSpace Independent Publishing Platform, 276 p., 2013.
- Evans B.** Practical 3D printers: The science and art of 3D printing. New York, Apress, 306 p., 2012.
- Heynick M., Stotz I.** 3D CAD, CAM and rapid prototyping. URL: <http://enac-oc.epfl.ch/files/content/sites/enacco/files/3D%20CAD%20CAM%20and%20Rapid%20PrototypingV1.1.pdf>, 2000.
- Lukkassen D., Meidell A.** Advanced materials and structures and their fabrication processes. URL: <http://ru.scribd.com/doc/24165910/146/Ballistic-particle-manufacturing-inkjet-BMP>, 2007.
- Зорин С.** Технологии быстрого прототипирования. URL: http://www.vzrt.ru/rp_tec.php, 2006.

References

- Barnatt Ch.** 3D printing: The next industrial revolution. Nottingham, CreateSpace Independent Publishing Platform, 276 p., 2013.
- Evans B.** Practical 3D printers: The science and art of 3D printing. New York, Apress, 306 p., 2012.
- Heynick M., Stotz I.** 3D CAD, CAM and rapid prototyping. URL: <http://enac-oc.epfl.ch/files/content/sites/enacco/files/3D%20CAD%20CAM%20and%20Rapid%20PrototypingV1.1.pdf>, 2000.
- Lukkassen D., Meidell A.** Advanced materials and structures and their fabrication processes. URL: <http://ru.scribd.com/doc/24165910/146/Ballistic-particle-manufacturing-inkjet-BMP>, 2007.
- Zorin C.** Tehnologii byistrogo prototipirovaniya [Technologies of rapid prototyping]. URL: http://www.vzrt.ru/rp_tec.php, 2006.

Информация об авторах

Баева Людмила Сандуовна – Морская академия МГТУ, кафедра технологии металлов и судоремонта, канд. техн. наук, профессор

Баева L.S. – Marine Academy of MSTU, Department of Process Metallurgy and Ship Repair, Cand. of Tech. Sci., Professor

Маринин Антон Анатольевич – Морская академия МГТУ, кафедра технологии металлов и судоремонта, аспирант, e-mail: mafialf@yandex.ru

Marinin A.A. – Marine Academy of MSTU, Department of Process Metallurgy and Ship Repair, Ph.D. Student, e-mail: mafialf@yandex.ru