

Ksenia S. Besedina<sup>1</sup>, Nikolay A. Lavrov<sup>2</sup>, Viktor V. Barskov<sup>3</sup>

К.С. Беседина<sup>1</sup>, Н.А. Лавров<sup>2</sup>, В.В. Барсков<sup>3</sup>

## **APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN PRODUCTION OF ARTICLES FROM POLYMERIC MATERIALS (review)**

## **ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)**

Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Moskovsky Pr., 26, St Petersburg, 190013, Russia  
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Politechnicheskaya st., 29, St Petersburg, 195251, Russia  
e-mail: kbesedina@inbox.ru

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Московский пр. 26, Санкт-Петербург, 190013, Россия  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.  
e-mail: kbesedina@inbox.ru

*A state of the art review of additive technologies is presented. A brief history of the emergence of additive technologies is given. Available technologies, their advantages and disadvantages are analyzed. Information on the main polymer materials used in 3D printing is given. By using the results of experimental studies, it is shown that additive technologies can be employed in the manufacture of impellers of low-power turbo-generators.*

*Представлен обзор современного состояния аддитивных технологий. Приведена краткая история возникновения аддитивных технологий. Проанализированы известные технологии, их преимущества и недостатки. Даны сведения об основных полимерных материалах, применяемых в 3D-печати. На основании результатов экспериментальных исследований показана возможность использования аддитивных технологий при изготовлении рабочих колес турбогенераторов малой мощности.*

**Key words:** additive technologies, 3D printing, history of 3D printing, polymeric materials for 3D printing, application of additive technologies in the manufacture of impellers of low-power turbo-generators.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, 3D-печать, история 3D-печати, полимерные материалы для 3D-печати, применение аддитивных технологий при изготовлении рабочих колес турбогенераторов малой мощности.

DOI 10.15217/issn1998984-9.2018.44.56

### **Введение**

Исследования в области химии и технологии полимеров привели к созданию ряда новых синтетических конструкционных материалов, обладающих ценными эксплуатационными свойствами [1, 2]. В настоящее время полимеры используются практически во всех областях производства. На их основе получают конструкционные материалы, материалы для электротехнической и радиотехнической индустрии, корпуса приборов, оптические стекла, пленки различного назначения, ткани и волокна, пластмассы со специальными свойствами (термостойкие и морозоустойчивые, повышенной прочности, огнестойкие, электропроводящие и др). Некоторые из полимерных конструкционных материалов (ПКМ) успешно конкурируют с металлами. Например, ПКМ предложено использовать при создании сосудов высокого давления [3, 4]. Наполненные

полимерные материалы могут работать в парах трения при создании различных машин и механизмов [5, 6].

Для производства изделий из полимеров используют различные методы [7]. Для получения изделий из термопластов наибольшее распространение получил метод литья под давлением [7, 8]. В последние годы активно развиваются аддитивные технологии, которые можно использовать для получения изделий сложной конфигурации как из полимерных, так и других материалов.

За время, прошедшее после появления первых публикаций о 3D-печати, как правило, содержащих только описание новых технологий, накоплен достаточно большой объем информации, которая обобщена как в учебных пособиях (правда, пока только во внутривузовских изданиях) [9-11], диссертациях [12], так и в монографиях [11-16]. В этих работах приведены сведения об аддитивных технологиях, их преимуществах и недостатках, перечисле-

1. Беседина Ксения Сергеевна, аспирант каф. химической технологии полимеров СПбГТИ(ТУ), e-mail: kbesedina@inbox.ru  
Ksenia S. Besedina graduate student, Department of Chemical Technology of Polymers SPbSIT(TU)
2. Николай Алексеевич Лавров, д-р хим. наук, профессор, каф. химической технологии полимеров СПбГТИ(ТУ), e-mail: lna@lti-gti.ru  
Nikolay A. Lavrov, Dr Sci. (Chem.), Professor, Department of Chemical Technology of Polymers SPbSIT(TU)
3. Барсков Виктор Валентинович канд. техн. наук, ассистент, Институт энергетики и транспортных систем СПбПУ, e-mail: viktorbarskov@ntcmnt.ru  
Viktor V. Barskov, Ph.D (Eng.), assistant, Institute of Power and Transport Systems SPbPU

Дата поступления – 13 мая 2018 года

ны основные используемые материалы. Однако информации о получении изделий из полимеров с использованием аддитивных технологий пока недостаточно. В частности, нет сведений о влиянии вида материала, режимов получения изделий на их свойства. Отсутствуют публикации о работоспособности деталей из полимерных материалов (ПМ), изготовленных по аддитивным технологиям, в узлах механизмов и машин. Нет конкретных данных о том, насколько удачно можно заменять детали, изготовленные из традиционных для данных механизмов материалов, на детали их полимерных материалов, изготовленные методом 3D-печати

В данной работе предпринята попытка рассмотреть особенности получения изделий из полимеров с использованием аддитивных технологий. Дана краткая историческая справка о развитии методов 3D-печати и современном состоянии этих технологий, приводится классификация наиболее известных аддитивных технологий. Авторы статьи старались не повторять то, что уже опубликовано в указанных выше работах, использовать литературные источники, не вошедшие в библиографический список данных публикаций, в том числе новую информацию об аддитивных технологиях, размещенную в Интернете. В статье на основании результатов экспериментальных исследований показана возможность применения метода 3D-печати для решения важной практической задачи - изготовления рабочих колес из ПМ для турбогенераторов малой мощности. Актуальность этой работы связана с тем, что в современном машиностроении стоит проблема создания новых турбомашин небольшого размера, которые можно использовать для локальных потребителей. В настоящее время детали этих установок изготавливают, в основном, из металла. Изучается возможность замены материала для получения ряда деталей, например, рабочих колес проточной части турбогенератора.

Известно, что для получения штучных изделий из ПМ успешно применяется метод литья под давлением, при котором получают точные отливки с достаточно хорошим качеством поверхности. Но этот метод обычно используют для получения крупных партий изделий из-за высокой стоимости изготовления технологической оснастки. Аддитивные технологии могут быть альтернативой для изготовления деталей проточной части турбогенераторов малой мощности с использованием полимерных материалов.

## Основные понятия об аддитивных технологиях

Аддитивные технологии (3D-печать) предусматривают послойное создание физического объекта практически любой геометрической формы, который соответствует математической модели, представленной в CAD-формате. В отличие от традиционных методов производства, аддитивные технологии не предусматривают удаление материала (фрезерование, сверление, стачивание) или изменение формы изделия, при получении изделий из ПМ не требуется механическая обработка (удаление графа, облоя, литников и др.) [13, 17, 18].

В таблице 1 приведены основные технологии и основные производители 3D-принтеров [12].

Любая аддитивная технология включает в себя две основные стадии. На первой стадии создается математическая трехмерная модель изделия с использованием специализированного программного обеспечения в одном из форматов \*.STL, \*.WRL, \*.PLY, \*.3DS. На второй стадии осуществляется печать модели на специальном принтере. Возможна замена стадии создания математической моде-

ли, если существует образец необходимого изделия, на стадию 3D сканирования.

Таблица 1. Технологии 3D-печати и ведущие мировые компании

Название технологии 3D-печати	Компания
Selective Laser Sintering.(SLS)	3D Systems ExOne Company, EOS GmbH
Stereo Lithography Apparatus (SLA)	3D Systems, Институт проблем лазерных технологий РАН
Ink Jet Modelling (IJM)	3D Systems, Solidscape Inc, Object Geometries LTD
Binding Powder by Adhesives	Z Corporation
Laminated Object Manufacturing (LOM)	Helisys Inc

## История создания и современное состояние аддитивных технологий

Исходя из информации, имеющейся в Интернете, первые сведения об аддитивных технологиях появились более 30 лет назад. В 1983 году создана технология-стереолитография (Laser Stereolithography, SLA), которая положила начало истории технологии «трехмерной печати». Спустя год эта технология была запатентована Чарльзом Халлом (Charles Hull), в 1986 году основана компания 3D Systems и разработана стереолитографическая установка.

В 1985 году Михаил Фейген (Michael Feygin) разработал технологию ламинирования LOM (Laminated Object Manufacturing).

В 1986 году произошло появление метода лазерного спекания (Selective Laser Sintering), предложенного Джо Биманом (Joe Beaman) и Карлом Декардом (Carl Decard).

В 1988 году разработано моделирование методом наплавления (Fused Deposition Modeling (FDM), созданное Скоттом Крампом (S. Scott Crump). Спустя год он основал компанию Stratasys.

В 1993 году основана компания «Solidscape», которая выпускала струйные принтеры, а в 1995 году американские студенты-изобретатели создали модифицированную версию струйного принтера, который использовал материал не на бумаге, а в емкости. В результате использования такого метода изготавливались объемные детали. После выпуска этой модели струйного принтера была создана компания "Z Corporation" и введено понятие «3D-печать». В настоящее время по данной технологии изготавливаются принтеры многих производителей, например, ExOne и Z Corporation.

Позднее разработана методика PolyJet, которая заключалась в использовании в качестве материала фотополимерного жидкого пластика (фотополимер наносился печатной головкой и засвечивался лампой).

Ассортимент материалов, из которых можно создавать изделия, постепенно расширялся. В 2005 году Адрианом Боером предложена технология RepRap, созданная для печати биоразлагаемым материалом.

В 2006 году напечатана первая деталь по технологии RepRap, что повлияло на создание аналогичных настольных принтеров FDM.

В 2010 году учеными предпринята попытка напечатать с помощью 3D-принтера кровеносные сосуды. В это же время компанией Cornucopia3D созданы первые пищевые 3D-принтеры для печати блюд [10, 17].

В мире существует несколько компаний-гигантов, которые являются передовыми в области аддитивных технологий. Перечислим некоторые из них.

1. Компания *Shapeways*, организованная в 2007 году в Нидерландах, штаб квартира которой располагается в Нью-Йорке. В компании работает 90 человек. На данный момент привлечено около 40 млн. долларов инвестиций. Имеет два полноценных производства в Нидерландах и в Нью-Йорке. Количество заказанных изделий насчитывает более миллиона.

2. Французский стартап компании *Sculpteo*, запущенный в 2009 году. Привлек несколько миллионов инвестиций, имеет небольшой парк своего оборудования. Сильные стороны: очень интересный онлайн-сервис, с возможностями не только анализировать свою модель, но и онлайн готовить ее к печати. Есть мобильное приложение *3DPcase*.

3. Бельгийская компания *Materialise NV*, созданная в 1990 году. Создатели «Мамонтоподобной стереолитографической машины» (размеры печати 2 x 0,7 x 0,8 метра) когда-то вели свой блог на Хабре, с некоторыми вполне полезными статьями [19].

Несмотря на то, что 3D-печать впервые была коммерчески использована еще в 1987 году, только разработки последних семи лет позволили получить разнообразие коммерческих приложений, позволяющих извлекать серьезные операционные, экономические и эмоциональные выгоды в реальной производственной практике. Это подчеркивается ускорением темпов адаптации технологии, рост которых идет по экспоненте.

Технологии 3D-печати пока слабо развиты в России, но существуют предпосылки их развития в ближайшем будущем. На сегодняшний день существуют несколько научно-исследовательских институтов, которые участвуют в федеральных программах по изучению и развитию аддитивных технологий.

В 2018 году в мире насчитывается более 300 производителей 3D-оборудования, в том числе в России 44 фирмы-производителя.

В настоящее время области применения 3D-печати достаточно обширны:

- машиностроение (изготовление форм и деталей для дальнейшей выплавки);
- строительство (есть предположение, что в будущем намного ускорится процесс возведения зданий, благодаря 3D-печати);
- медицина (благодаря трехмерной печати врачи получили возможность создавать копии отдельных фрагментов человеческого скелета, большое применение 3D-принтеры нашли в стоматологическом протезировании);
- архитектура и дизайн (создание макетов элементов интерьера, зданий и районов позволяют оценить эргономику, функциональность и внешний вид прототипа);
- маркетинг и реклама (появляется возможность продемонстрировать преимущества нового товара);
- образование (3D-модели являются отличными наглядными пособиями для обучения на всех уровнях образования);
- автомобилестроение (3D-моделирование позволяет протестировать автомобиль на этапе разработки);
- моделирование (изготовление упаковочных материалов, игрушек и сувенирной продукции);
- легкая промышленность (изготовление разных элементов потребительских товаров);

- изготовление одежды и обуви (подобная одежда и обувь используются только на показах, материалом служит полиуретан, резина и пластик);

- ювелирное дело (технологии 3D-моделирования позволяют создать полноценные изделия из порошка драгоценного металла);

- история и антропология (модели создаются на базе археологических находок) [9, 10, 20 - 23].

### Технологии 3D-печати

В России и за рубежом конкретная классификация аддитивных технологий пока не принята. Поэтому сведения о классификации, публикуемые в известных учебных пособиях и монографиях, различаются.

Например, аддитивные технологии подразделяют:

- по используемым материалам (жидкие, сыпучие, полимерные, металлопорошковые и др.);
- по наличию или отсутствию лазера;
- по методам подвода энергии для фиксации слоя построения (с помощью теплового воздействия, облучения ультрафиолетовым или видимым светом, посредством связующего состава и др.);
- по способу формирования слоя.

Наибольшее распространение получила классификация по типу наращивания слоев материала. В настоящее время существует четыре базовых типа технологий 3D-печати (таблица 2).

Таблица 2. Базовые типы технологий 3D-печати [9, 10, 13].

Метод	Расшифровка названия метода	Используемые материалы
Технологии, использующие принцип ламинирования		
LOM	Laminated Object Manufacturing (производство объекта ламинированием)	Бумага, алюминиевая фольга
Технологии, использующие принцип гранулирования		
SLS	Selective Laser Sintering (селективное лазерное спекание)	Керамические и металлические порошки, термопластик
DMLS	Direct Metal Laser Sintering (прямое металлическое лазерное спекание)	Практически любой металлический сплав в виде порошка, крошки, гранул
SLM	аналог DMLS (селективное лазерное наплавление)	Порошки инструментальной и нержавеющей стали, хрома, кобальта, титана алюминия.
EBM	Electron Beam Melting (электронно-лучевая плавка)	Сплавы титана
SHS	Selective Heat Sintering (избирательное тепловое спекание)	Термопластичный пластиковый порошок
3DP	Three-Dimensional Printing (послойное спекание тонких слоев модельного порошка)	Гипсоподобный порошок
Технологии, использующие принцип экструдирования		
FDM	Fused Deposition Modeling (моделирование посредством наплавления)	Легкоплавкие металлы и сплавы, термопластики (ПЛА, АБС и т.п.), съедобные материалы (например, шоколад)
DOD Jet	Drop On Demand Jet (напыление капель нагретого материала)	Литейный воск
SFF	Solid Freeform Fabrication (3D-печать еды)	Шоколад, гидроколлоиды и др.
Технологии, использующие принцип фотополимеризации		
SLA	Stereolithography (стереолитография)	Фотополимерная смола
DLP	Digital Light Processing (цифровая обработка света)	Фотополимерная смола
MJM	Multi Jet Modeling (метод многоструйного моделирования)	Акриловый пластик, литейный воск, фотополимерная смола

Технологические процессы, протекающие при реализации этих технологий, заключаются в следующем:

- ламинирование (склеивание материала с последующим вырезанием);
- гранулирование (спекание или склеивание частиц материала);
- экструдирование (выдавливание расплавленного материала с использованием профилирующей головки);
- фотополимеризация (отверждение полимера лазерным или ультрафиолетовым излучением) [9].

В некоторых литературных источниках аддитивные технологии сравнивают с технологиями литья, считая, что они близки по принципу создания объекта. При этом отмечается, что в сравнении с литьем под давлением, аддитивные технологии имеют следующие преимущества [24, 25]:

- возможность создания сложных, разомкнутых 3D-объектов;
- отсутствие необходимости создания специальной оснастки и форм;
- создаваемый объект не имеет облоя и литников.

Но аддитивные технологии отличаются от литья под давлением не только по этим признакам. Если рассматривать классическую классификацию способов переработки полимерных материалов, то главным признаком, по которому их различают, является физическое состояние, в котором находится полимер в момент оформления изделия. При литье под давлением полимер находится в вязкотекучем состоянии, то есть в состоянии расплава, кроме того получение изделия идет в замкнутой форме. Ни одна из известных аддитивных технологий на этот метод не похожа. Какие-то известные технологии подобны сварке полимеров, другие — спеканию, но всегда процесс получения изделия идет без использования формы, без воздействия давления. С этим связаны и некоторые недостатки аддитивных технологий, среди которых: пористая структура получаемого объекта, в большинстве случаев получается объект с шероховатой поверхностью, также в определенных случаях требуется материал поддержка, отмечается сложность и дороговизна подготовительных работ и основного оборудования.

Аддитивные технологии являются перспективным направлением развития промышленного производства изделий из полимерных материалов. Рассмотрим отличительные особенности некоторых известных аддитивных технологий подробнее.

**Лазерная стереолитография (Laser Stereolithography, SLA).** При создании объекта его трехмерная модель разбивается на тонкие двумерные слои в плоскости XY с одинаковым шагом по оси Z. В качестве исходного материала используется фотополимер в жидком состоянии. Создание одного слоя происходит за счет локального экспонирования жидкого полимера сфокусированным лучом лазера, приводящего к локальной полимеризации материала. Формирование последующих слоев объекта производится путем добавления нового слоя полимера или путем доливки, или же за счет погружения подложки держателя в кювету с полимером. В результате последовательного формирования слоев создается заданный объект. Данная технология позволяет создавать изделия лишь последовательно слой за слоем, что накладывает ограничения на их форму.

Существует большое количество разновидностей фотополимеров для создания 3D печатных моделей с различными техническими характеристиками и для разных технологий печати: SLA. Материал может быть в жидком

или твердом состоянии. Например, фотополимерные смолы – отдельный класс светочувствительных смол, способных менять свое агрегатное состояние под воздействием лазерного луча или ультрафиолетовой вспышки. Физические и механические свойства смол могут значительно отличаться: итоговые модели могут быть гибкими и твердыми, прозрачными и светонепроницаемыми. С помощью фотополимерных смол возможна 3D-печать многокомпонентных деталей.

Положительные факторы технологии SLA [14, 26-28]:

- высокое разрешение печати (в некоторых принтерах толщина слоя может достигать до 0,025 мм), что делает этот метод идеальным для изготовления мастер-моделей для последующих отливок и создания ювелирных изделий.
- поверхность деталей не требует дополнительной обработки (в конце печати необходимо лишь удалить остатки смолы).
- широкий диапазон механических и физических свойств.

Отрицательные факторы: дороговизна материалов, сложность печати, большие размеры принтеров.

**Селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering, SLS)** по своему принципу схоже с технологией стереолитографии, но в данной технологии создание объекта происходит из любого порошкообразного материала, подверженного плавлению под воздействием лазерного луча (металл, пластик и т.п.), а не только из фотополимера.

С помощью лазерного луча происходит создание слоя путем спекания частиц порошкообразного материала. При передвижении вниз подвижного основания на заданную толщину, проводится нанесение следующего слоя порошка и спекание. Эта операция повторяется несколько раз до момента создания конечного изделия. Изделия, получаемые SLS технологией, получают более долговечными и прочными.

Для SLS технологией используют полиамиды — линейные синтетические полимеры, содержащие в основной цепи амидные группы —CONH—. Данные материалы используются, в основном, в машиностроении, текстильной промышленности, автомобильной промышленности, медицине и других областях. Существует большое количество полиамидных материалов с различными техническими характеристиками.

Преимущества изделий, изготовленных из полиамидов, заключаются в высокой механической прочности, высоких показателях усталостной прочности, долговечности, скольжения. Их отличают хорошие электроизоляционные свойства. Поверхность изделий не нуждается в механической обработке. Есть возможность окрашивания изделий, они сохраняют стабильные характеристики под воздействием УФ-лучей. их можно использовать в широком диапазоне температур (от -40 °C до 185 °C) [12, 29-31]:

Существуют наполненные полиамиды:

- стеклонаполненные полиамиды, улучшающие физические свойства напечатанной модели;
- угленаполненные полиамиды, которые позволяют уменьшить вес конструкции, сохраняя при этом физико-механические свойства изделия;
- металлонаполненные полиамиды, используемые в качестве барьерных материалов, например, при экранировании радиации.

Существует широкий марочный ассортимент полиамидов. Они выпускаются с разными торговыми назва-

ниями. Например, нейлон (nylon) относится к синтетическим полиамидам, используется, в основном, при производстве волокон. Данный вид полимера подходит для печати шестерней, рычагов и даже запчастей для медицинских аппаратов.

О материалах, применяемых в SLS технологии, опубликованы работы [29, 30], в них описаны основные свойства и особенности поведения материалов при различных режимах переработки.

Производители оборудования отмечают следующие преимущества SLS технологии [15, 24].

- возможность создания деталей с «находящимися в воздухе» элементами без использования поддерживающей структуры;
- при реализации этой технологии можно использовать, в основном, недорогие и нетоксичные материалы;
- материал испытывает низкие напряжения и деформации;
- возможность создания нескольких деталей одновременно.

Недостатки SLS технологии: длительная подготовка установки к работе, получаемые детали имеют пористую и шероховатую поверхность, после создания изделия необходима чистка рабочей камеры от остатков порошка.

Авторы работы [22], имеющие опыт использования данной технологии, отмечают также следующие преимущества SLS технологии:

- возможность получения изделий сложной формы, точность воспроизведения заданной геометрии изделия;
- широкий ассортимент используемых порошков;
- невысокая трудоемкость;
- возможность создания облегченных конструкций;
- безотходность;
- получение изделий с микро- и наноструктурированными поверхностями.

В дополнение к уже указанным недостаткам некоторые исследователи перечисляют следующие: высокая продолжительность изготовления изделий; анизотропные свойства, высокие остаточные напряжения в изделиях. низкая повторяемость результатов, трудность извлечения порошка из каналов малых размеров, высокая стоимость оборудования.

**Моделирование методом наплавления (Fused Deposition Modeling, FDM)** используется для получения изделий из различных плавких материалов (воск, пластик, металл и др.). Сырье подается в специальную экструзионную головку, где материал расплавляется и в виде тонкой нити выдавливается на холодную рабочую поверхность. Температура выдавливаемого материала незначительно превышает температуру его затвердевания. После полного затвердевания первого контура, головка наносит на платформу следующий слой.

По данной технологии можно изготавливать изделия из АБС-пластика (ABS-plastic) — это термопластичный ударопрочный материал на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом. Состав АБС-пластиков может варьироваться (15-35 % акрилонитрила, 5-30 % бутадиена и 40-60 % стирола). Преимущества материала: влагостойкость, кислотостойкость, жиростойкость, высокая ударная вязкость. Однако он имеет и существенные недостатки: чувствительность к воздействию УФ-лучей и атмосферных осадков. Создание изделий из АБС-пластика сопровождается технологическими трудностями из-за усадки материала, что может привести к деформации или расслоению модели. Изделия, произведен-

ные методом 3D-печати из АБС-пластика, имеют блестящую поверхность.

Также используют ПЛА-пластик (PLA) или полилактид, который является самым экологически чистым и подходящим полимерным материалом для 3D-печати. Мономером для получения полилактида является молочная кислота. Материал представляет собой термопластичный полиэфир, для создания которого можно использовать биологические отходы, сахарную свеклу или силос кукурузы. Преимущества ПЛА-пластика: нетоксичен, при печати нет необходимости использования нагретой платформы, возможна экономия энергозатрат из-за низкой температуры размягчения нити, получаемые детали не нуждаются в дополнительной обработке. Но ПЛА-пластик недолговечен и хрупок, и поэтому для изготовления ответственных деталей данный материал не подходит. Для повышения прочности материала возможно его смешение с АБС-пластиком.

Положительные факторы FDM технологии:

- возможность получения деталей сложной конфигурации;
- прочность деталей, полученных данным методом, не уступает деталям, изготовленным традиционными методами.

Отрицательным фактором является рельефная поверхность деталей, что влечет за собой необходимость их обработки. [11, 16, 29]

**Изготовление объектов с использованием ламинирования (Laminated Object Manufacturing, LOM).** Метод подразумевает последовательное склеивание листового материала (бумаги, пластика, металлической фольги) с формированием контура каждого слоя с помощью лазерной резки. Объекты, производимые этим методом, обычно подлежат дополнительной механической обработке после печати. Толщина наносимого слоя напрямую зависит от толщины используемого листового материала.

Процесс печати протекает следующим образом: Лист материала с клейким покрытием наносится на рабочую платформу (или нижние слои модели) с помощью разогретого ролика. Контур слоя вычерчивается с помощью лазера. Лишний материал режется лазером на мелкие секции для упрощения процедуры удаления. Платформа с готовым слоем передвигается вниз. В рабочую камеру подается новый лист материала. Платформа поднимается вверх до контакта с новым материалом. Цикл повторяется до завершения постройки модели, после чего лишний материал удаляется, и производится завершающая механическая обработка изделия (сверление, шлифовка и пр.) Бумажные модели приближаются по физическим характеристикам к древесине, что позволяет проводить соответствующую механическую обработку. Разрешение печати несколько уступает таким высокоточным методам, как стереолитография (SLA) или выборочное лазерное спекание (SLS).

Положительные факторы:

- возможность удаления испорченного слоя и создание нового;
- недорогие материалы;
- повышенная прочность.

Недостатки: возможность расслоения и ошибок при не полностью прорезанном листе, изделие шероховатое, существуют сложности при удалении излишков материала, из-за рисков расслоения изделия, технология не слишком подходит для создания сложных объектов, поскольку не позволяет создавать полости [15, 16].

**Полиструйная технология (Poly Jet, PJET)** по принципу создания объекта схожа с стереолитографией

(SLA). При использовании данной технологии используются фоточувствительные смолы. Полимерная смола подается в струйную головку, предварительно расплавляется. Подвижная головка движется вдоль оси, распределяя расплавленную смолу на рабочей поверхности. Толщина слоя - 16 мкм, что в пять раз меньше толщины слоя при стереолитографии. С применением УФ-лампы ускоряется затвердевание материала. При создании сложных изделий используется поддержка из геля, которую удаляют с помощью воды после получения готового изделия.

Достоинства этой технологии:

- получение деталей с гладкой поверхностью;
- широкий выбор используемых в данной технологии полимеров;
- возможность использования одновременно нескольких материалов;

Отрицательный фактор - высокая себестоимость изделия. [9, 11, 13]

**3D-печать от Z Corp (Z Corp Three-Dimensional Printing, Z Corporation).** Данный метод основан на струйной технологии и схож с SLS технологией. Установки работают с использованием двух компонентов - порошкообразной массы и жидкого вяжущего вещества (клея). Сначала порошок распределяется по рабочей поверхности специальным валиком. Затем на рабочую область печатающей головкой наносится клей, связывающий порошкообразную массу, создавая твердую основу запрограммированной формы. После этого платформа опускается вниз на толщину одного слоя и процесс повторяется. Процесс спекания отсутствует.

Положительные факторы:

- метод отличается невысокой себестоимостью моделей и в то же время высокой скоростью печати;
- технология является безотходной, поскольку в качестве поддержки используется исходный материал, а его остатки могут быть профильтрованы и использованы вновь;
- возможность печатать полноцветные модели в рамках цветовой палитры CMYK, которая содержит около 390 000 цветов. Модель окрашивается на этапе построения, путем добавления красителя в связующее вещество;
- технология позволяет создавать модели с чрезвычайно тонкими стенками (минимально допустимая толщина составляет 0,5 мм и ограничивается только физическими свойствами материала).

Отмечаемые отрицательные факторы: невысокое разрешение печати (0,1 - 0,4 мм), грубая гигроскопичная поверхность, которая нуждается в шлифовке.

**Моделирование методом напыления с последующим фрезерованием слоя (Drop On Demand Jet, DODJet).** В этой технологии используется также два компонента - модельный и материал поддержки. Происходит одновременное распыление материалов на рабочую поверхность. Далее фрезеровочная головка охлаждает полученный слой и производит механическую обработку. Быстрота изготовления объекта зависит от его сложности.

Достоинства:

- быстрое создание прототипа малого изделия для отливки;
- получение гладкого изделия с высокой точностью соблюдения его размеров.

Недостаток заключается в том, что восковка - недешевый метод.

**Контурное изготовление (Contour Crafting, CC)** является строительной технологией, установка похожа на козловый кран. Распыление бетонной смеси проис-

ходит головкой со встроенными пневматическими формователями слоя. Мгновенно застывающий бетонный раствор слой за слоем наносится на основу дома [11, 12, 14].

## Опыт использования 3D-печати в энергомашиностроении для изготовления деталей турбогенераторов

Для каждой технологии 3D-печати существует определенный перечень используемых материалов: [17, 18]. Из известных полимерных материалов в настоящее время могут использоваться поликарбонат, полистирол, АБС, полиамиды, полиметилметакрилат, полилактид, фотополимеры.

Нами изучена возможность использования полимерных материалов для изготовления деталей турбогенераторов. В результате проведенного анализа свойств полимеров и особенностей их применения в условиях эксплуатации показано, что для этих целей наиболее приемлемы АБС-пластики и полиамиды.

Каждый из полимерных материалов требует особого подхода в выборе технологии с учетом особенностей этого полимера. Для АБС-пластиков используют FDM технологию, для полиамидов — SLS технологию.

Нами получены образцы деталей из АБС-пластика марки REC и полиамида марки ПА-12. На основе результатов экспериментальных исследований выбраны режимы получения деталей из АБС-пластика (варьировались температура расплава, скорость нанесения материала). Проведены физико-механические испытания полученных образцов, изучено качество поверхности изделий, получаемых технологиями FDM и SLS [32, 33].

Результаты испытаний использованы для проведения расчетов сегмента проточной части турбогенератора (рисунок 1) в эквивалентных напряжениях и деформациях по методу фон-Мизеса. Для подтверждения полученных результатов по напряженности диска дополнительно был выполнен расчет 3D-геометрической модели диска методом конечных элементов МКЭ, реализованный в пакете ANSYS.

Получено заключение ООО «Микротурбинные технологии» об условной возможности применения полиамида марки ПА-12 и технологии SLS для изготовления деталей проектируемой турбодетандерной установки.



Рисунок 1. Проточная часть турбогенератора, изготовленная из полиамида марки ПА-12 по технологии SLS

Таким образом, в настоящее время аддитивные технологии активно используют в различных отраслях промышленности. С каждым годом увеличивается количество компаний-производителей, которые создают новые доступные технологии и материалы. Аддитивные технологии являются перспективным направлением развития промышленного производства изделий из полимерных материалов.

## Литература

1. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / 4-е изд.,

испр. и доп. под общей редакцией А.А. Берлина. СПб.: ЦОП «Профессия», 2014. 592 с.

2. Пластмассы со специальными свойствами: сб. науч. тр. / Под общей редакцией Н.А. Лаврова. СПб.: ЦОП «Профессия», 2011. 344 с.

3. *Igumenov M.S., Lavrov N.A.* Adhesion of Linear Low-Density Polyethylene and Oligomers // *Polymer Science. Ser. D.* 2017. Vol. 10. № 1. P. 55-58.

4. *Lavrov N.A., Igumenov M.S.* A Technique for Production of High-Pressure Vessels from Polymer-Composite Materials // *Polymer Science. Ser. D.* 2018. Vol. 11. № 1. P. 113-116.

5. *Kryzhanovskii V.K., Lavrov N.A., Kiemov Sh.N.* The Effect of Disperse Fillers on the Thermomechanical Characteristics of Epoxy Polymers // *Polymer Science. Ser. D.* 2018. Vol. 11. № 2. P. 230-232.

6. *Киемов Ш.Н., Крыжановский В.К., Лавров Н.А.* Деформация дисперсно-наполненных эпоксидных полимеров // Композиционные материалы. Узбекский научно-технический и производственный журнал. 2017. № 4. С. 13-14.

7. *Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Панаматченко А.Д., Крыжановская Ю.В.* Производство изделий из полимерных материалов. СПб.: Профессия, 2004. 460 с.

8. *Николаев О.О., Бритов В.П., Лебедева Т.М.* Влияние способов окрашивания на энергоэффективность производства полимерных изделий методом литья под давлением // Известия СПбГТИ(ТУ). 2017. № 41(67). С. 63-66.

9. *Валетов В.А.* Аддитивные технологии (состояние и перспективы): учеб. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2015. 63 с.

10. *Антонова В.С., Осовская И.И.* Аддитивные технологии: учеб. пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2017. 30 с.

11. *Рудской А.И., Попович А.А., Григорьев А.В., Каледина Д.Е.* Аддитивные технологии: учеб. пособие. СПб.: СПбПУ, 2016. 299 с.

12. *Бобцова С.В.* Исследование и разработка методов использования технологий быстрого прототипирования в приборостроении: дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2005. 124 с.

13. *Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М.* Аддитивные технологии в машиностроении / пособие для инженеров. М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.

14. *Шишковский И.В.* Основы аддитивных технологий высокого разрешения. СПб.: Изд-во Питер, 2015. 348 с.

15. *Смуров И.Ю., Тарасова Т.В., Назаров А.П., Котобан Д.В.* Оборудование и технология селективного лазерного плавления. / под ред. А.В. Гусарова М.: МГТУ «СТАНКИН», 2015. 142 с.

16. *Товажнянский Л.Л., Грабченко А.И., Чернышов С.И., Верезуб Н.В., Витязев Ю.Б., Доброскок В.Л., Кнут Х., Лиерат Ф.* Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления. Монография. - 2-е изд., перераб. и доп. / Под. ред. Л.Л. Товажнянского, А.И. Грабченко. Харьков: ОАО "Модель Вселенной", 2005. 224 с.

17. *Баева Л.С., Маринин А.А.* Современные технологии аддитивного изготовления объектов // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17. № 1. С. 7-12.

18. *Михайлова А.Е., Дошина А.Д.* 3D принтер – технология будущего // Молодой ученый. 2015. № 20. С. 40-44. <https://moluch.ru/archive/100/22467> (дата обращения: 02.02.2018 г.)

19. Обзор компаний-лидеров в области оказания услуг 3D-печати: <https://habr.com/post/222991/> (дата обращения 10 апреля 2018 года)

20. *Ерин С.В.* Перспективы 3D-печати детекторов частиц: Препринт ИФВЭ 2014-11. Протвино, 2014. 13 с

21. 3-D Printing Manufacturing Process is Here; Independent global forum for the Unmanned Aircraft Systems community, UAS Vision. URL: <http://www.uasvision.com>.

22. *Milewski J.O.* Additive Manufacturing of Metals: From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry Springer International Publishing AG, 2017. 351 p.

23. *Слесарев А.Д.* Технологии 3D печати // Современная техника и технологии. 2015. № 6 URL: <http://technology.snauka.ru/2015/06/6596> (дата обращения: 01.10.2017).

24. *Сухочев Г.А., Коденцев С.Н., Смольяникова Е.Г.* Технология машиностроения. Аддитивные технологии в подготовке производства наукоемких изделий Воронеж: Воронежский гос. технический ун-т, 2013. 222 с.

25. *Дьяченко В.А., Челпанов И.Б., Никифоров С.О., Хозонхонова Д.Д.* Материалы и процессы аддитивных технологий (быстрое прототипирование). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2015. 198 с.

26. *Добринский Е.С.* Быстрое прототипирование: идеи, технологии, изделия // Полимерные материалы. 2011. № 9. С. 36-37.

27. *Каменев С.В., Романенко К.С.* Технологии аддитивного производства. Оренбург: ОГУ, 2017. 145 с.

28. *Камаев С.В., Марков М.А., Никитин А.Н., Новиков М.М., Панченко В.Я.* Лазерная стереолитография: состояние и перспективы // Аддитивные технологии: настоящее и будущее: сб. докл. I междунар. научной конф. 27 мая - 1 июня 2015 г., Москва, ФГУП ВИАМ. М., ВИАМ, 2015. С. 20.

29. *Кокцинская Е.М.* Технология 3D-печати: обзор последних новостей. // Videonauka: сетевой журн. 2016. № 2(2). URL: <http://videonauka.ru/stati/33-informatsionnye-soobshcheniya/44-3d-pechat-obzor-poslednikh-novostej> (дата обращения 1.07.2016).

30. *Вальтер А.В.* Технологии аддитивного формообразования. Томск: ТПУ, 2013. 171 с.

31. *Gu D.* Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. XVII, 311 p.

32. *Беседина К.С., Лавров Н.А., Барсков В.В.* Применение аддитивных технологий полимеров в машиностроении // Инновационные материалы и технологии в дизайне. Тезисы докл. IV Всерос. научно-практ. конф. с участием молодых ученых. 22-23 марта 2018 г. СПб.: СПбГИКИТ, 2018. С. 26-27.

33. *Беседина К.С., Лавров Н.А., Барсков В.В., Рассохин В.А.* К вопросу о создании конкурентоспособных энергоисточников малой мощности аддитивным способом // Неделя науки – 2017. Сб. тезисов VII научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых 5-7 апреля 2017 г. СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2017. С. 298.

## References

1. Polimernyye kompozitsionnyye materialy: struktura. svoystva. tekhnologiya: ucheb. posobiye / 4-e izd.. ispr. i dop. pod obshchey redaktsiyey A.A. Berlina. SPb.: TsOP «Professiya». 2014. 592 s.

2. Plastmassy so spetsialnymi svoystvami: sb. nauch. tr. / Pod obshchey redaktsiyey N.A. Lavrova. SPb.: TsOP «Professiya». 2011. 344 s.



3. *Igumenov M.S., Lavrov N.A.* Adhesion of Linear Low-Density Polyethylene and Oligomers // Polymer Science. Ser. D. 2017. Vol. 10. № 1. P. 55-58.
4. *Lavrov N.A., Igumenov M.S.* A Technique for Production of High-Pressure Vessels from Polymer-Composite Materials // Polymer Science. Ser. D. 2018. Vol. 11. № 1. P. 113-116.
5. *Kryzhanovskii V.K., Lavrov N.A., Kiemov Sh.N.* The Effect of Disperse Fillers on the Thermomechanical Characteristics of Epoxy Polymers // Polymer Science. Ser. D. 2018. Vol. 11. № 2. P. 230-232.
6. *Kiyemov Sh.N., Kryzhanovskiy V.K., Lavrov N.A.* Deformatsiya dispersno-napolnennykh epoksidnykh polimerov // Kompozitsionnyye materialy. Uzbekskiy nauchno-tekhnicheskii i proizvodstvennyy zhurnal. 2017. № 4. S. 13-14.
7. *Kryzhanovskiy V.K., Burlov V.V., Panimatchenko A.D., Kryzhanovskaya Yu.V.* Proizvodstvo izdeliy iz polimernykh materialov. SPb.: Professiya. 2004. 460 s.
8. *Nikolayev O.O., Britov V.P., Lebedeva T.M.* Vliyaniye sposobov okrashivaniya na energoeffektivnost proizvodstva polimernykh izdeliy metodom litia pod davleniyem // Izvestiya SPbGTI(TU). 2017. № 41(67). S. 63-66.
9. *Valetov V.A.* Additivnyye tekhnologii (sostoyaniye i perspektivy): ucheb. posobiye. SPb.: Universitet ITMO. 2015. 63 s.
10. *Antonova V.S., Osovskaya I.I.* Additivnyye tekhnologii: ucheb. posobiye / VShTE SPbGUPTD. SPb.. 2017. 30 s.
11. *Rudskoy A.I., Popovich A.A., Grigoryev A.V., Kaledina D.E.* Additivnyye tekhnologii: ucheb. posobiye. SPb.: SPbPU. 2016. 299 s.
12. *Bobtsova S.V.* Issledovaniye i razrabotka metodov ispolzovaniya tekhnologiy bystrogo prototipirovaniya v priborostroyeni: dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb. 2005. 124 s.
13. *Zlenko M.A., Nagaytsev M.V., Dovbysh V.M.* Additivnyye tekhnologii v mashinostroyenii / posobiye dlya inzhenerov. M.: GNTs RF FGUP «NAMI». 2015. 220 s.
14. *Shishkovskiy I.V.* Osnovy additivnykh tekhnologiy vysokogo razresheniya. SPb.: Izd-vo Piter. 2015. 348 s.
15. *Smurov I.Yu., Tarasova T.V., Nazarov A.P., Kotoban D.V.* Oborudovaniye i tekhnologiya selektivnogo lazernogo plavleniya. / pod red. A.V. Gusarova M.: MGТУ «STANKIN». 2015. 142 s.
16. *Tovazhnyanskiy L.L., Grabchenko A.I., Chernyshov S.I., Verezub N.V., Vityazev Yu.B., Dobroskok V.L., Knut Kh., Liyerat F.* Integrirovannyye tekhnologii uskorenogo prototipirovaniya i izgotovleniya. Monografiya. - 2-e izd., pererab. i dop. / Pod. red. L.L. Tovazhnyanskogo. A.I. Grabchenko. Kharkov: OAO "Model Vselennyoy". 2005. 224 s.
17. *Bayeva L.S., Marinin A.A.* Sovremennyye tekhnologii additivnogo izgotovleniya obyektov // Vestnik MGТУ. 2014. T. 17. № 1. S. 7-12.
18. *Mikhaylova A.E., Doshina A.D.* 3D printer – tekhnologiya budushchego // Molodoy uchenyy. 2015. № 20. S. 40-44. <https://moluch.ru/archive/100/22467> (data obrashcheniya: 02.02.2018 g.)
19. Obzor kompaniy-liderov v oblasti okazaniya uslug 3D-pechati: <https://habr.com/post/222991/> (data obrashcheniya 10 aprelya 2018 goda)
20. *Erin S.V.* Perspektivy 3D-pechati detektorov chastits: Preprint IFVE 2014-11. Protvino. 2014. 13 s
21. 3-D Printing Manufacturing Process is Here; Independent global forum for the Unmanned Aircraft Systems community. UAS Vision. URL: <http://www.uasvision.com>.
22. *Milewski J.O.* Additive Manufacturing of Metals: From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry Springer International Publishing AG. 2017. 351 p.
23. *Slesarev A.D.* Tekhnologii 3D pečati // Sovremennaya tekhnika i tekhnologii. 2015. № 6 URL: <http://technology.snauka.ru/2015/06/6596> (data obrashcheniya: 01.10.2017).
24. *Sukhochev G.A., Kodentsev S.N., Smoliannikova E.G.* Tekhnologiya mashinostroyeniya. Additivnyye tekhnologii v podgotovke proizvodstva naukoymkikh izdeliy Voronezh: Voronezhskiy gos. tekhnicheskiy un-t. 2013. 222 s.
25. *Diachenko V.A., Chelpanov I.B., Nikiforov S.O., Khozonkhonova D.D.* Materialy i protsessy additivnykh tekhnologiy (bystroye prototipirovaniye). Ulan-Ude: Izd-vo BNTs SO RAN. 2015. 198 s.
26. *Dobrinskiy E.S.* Bystroye prototipirovaniye: idei, tekhnologii, izdeliya // Polimernyye materialy. 2011. № 9. S. 36-37.
27. *Kamenev S.V., Romanenko K.S.* Tekhnologii additivnogo proizvodstva. Orenburg: OGU. 2017. 145 c.
28. *Kamayev S.V., Markov M.A., Nikitin A.N., Novikov M.M., Panchenko V.Ya.* Lazernaya stereolitografiya: sostoyaniye i perspektivy // Additivnyye tekhnologii: nastoyashcheye i budushcheye: sb. dokl. I mezhdunar. nauchnoy konf.. 27 maya - 1 iyunya 2015 g., Moskva. FGUP VIAM. M., VIAM. 2015. S. 20.
29. *Koktsinskaya E.M.* Tekhnologiya 3D-pechati: obzor poslednykh novostey. // Videonauka: setevoy zhurn. 2016. № 2(2). URL: <http://videonauka.ru/stati/33-informatsionnye-soobshcheniya/44-3d-pechat-obzor-poslednykh-novostey> (data obrashcheniya 1.07.2016).
30. *Valter A.V.* Tekhnologii additivnogo formoobrazovaniya. Tomsk: TPU. 2013. 171 s.
31. *Gu D.* Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag. 2015. XVII. 311 p.
32. *Besedina K.S., Lavrov N.A., Barskov V.V.* Primeneniye additivnykh tekhnologiy polimerov v mashinostroyenii // Innovatsionnyye materialy i tekhnologii v dizayne. Tezisy dokl. IV Vseros. nauchno-prakt. konf. s uchastiyem molodykh uchenykh. 22-23 marta 2018 g. SPb.: SPbGIKİT. 2018. S. 26-27.
33. *Besedina K.S., Lavrov N.A., Barskov V.V., Rassokhin V.A.* K voprosu o sozdaniі konkurentosposobnykh energoistochnikov maloy moshchnosti additivnym sposobom // Nedelya nauki – 2017. Sb. tezisov VII nauchno-tekhn. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh 5-7 aprelya 2017 g. SPb.: SPbGTI(TU). 2017. S. 298.