

Министерство образования и науки Российской Федерации  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

*М. А. Зленко А. А. Попович И. Н. Мутылина*

# АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением  
по университетскому политехническому образованию в качестве  
учебного пособия для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению подготовки магистров  
«Технологические машины и оборудование»*



Санкт-Петербург  
2013

УДК 621.01  
ББК 34.5  
3-67

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
машиностроения Национального минерально-сырьевого  
университета «Горный» *В. В. Максаров*

Доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского  
государственного политехнического университета  
*Е. Л. Голиханданов*

*Зленко М. А. Аддитивные технологии в машиностроении* : учеб. пособие / М. А. Зленко, А. А. Попович, И. Н. Мутьлина. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. — 223 с.

Приведены основные сведения о современных аддитивных и литейных технологиях, а также технологиях порошковой металлургии. Описаны возможности и перспективы применения аддитивных технологий в различных отраслях промышленности. Представлены исторические предпосылки появления аддитивных технологий. Дана терминология, классификация и характеристика рынка аддитивных технологий.

Рекомендовано Учебно-методическим объединением по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки магистров «Технологические машины и оборудование». Также может быть использовано для повышения квалификации инженерных кадров в области аддитивных технологий, студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям и специальностям в области техники и технологии при изучении дисциплин «Материаловедение и технологии современных материалов», «Основы САПР литейного производства» и «Методология научных исследований в машиностроении».

Печатается по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

- © Зленко М. А., Попович А. А.,  
Мутьлина И. Н., 2013
- © Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет, 2013

ISBN 978-5-7422-4025-9

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ТЕРМИНОЛОГИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ.....	10
ГЛАВА 2. ИСТОРИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОЯВЛЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	17
ГЛАВА 3. ХАРАКТЕРИСТИКА РЫНКА АФ-ТЕХНОЛОГИЙ.....	22
ГЛАВА 4. МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ.....	38
4.1. Группа Bed Deposition.....	38
4.2. Группа Direct Deposition.....	56
ГЛАВА 5. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И БЫСТРОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ.....	66
ГЛАВА 6. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО.....	75
ГЛАВА 7. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ.....	115
7.1. Материалы для «металлических» АМ-машин.....	116
7.2. Методы получения металлических порошков.....	120
7.3. Методы получения нанокристаллических материалов..	143
7.4. Производители атомайзеров и поставщики металлопорошковых композиций для использования в АМ-машинах.....	168
ГЛАВА 8. КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЛИТЫХ И МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	178
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	182
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	184
ИНТЕРНЕТ-ИСТОЧНИКИ.....	199
ГЛОССАРИЙ.....	201
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	210

## ВВЕДЕНИЕ

Технология «трехмерной печати» появилась в конце 80-х гг. XX в. Пионером в этой области являлась компания *3D Systems*, которая разработала первую коммерческую стереолитографическую машину – *SLA – Stereolithography Apparatus* (1986 г). До середины 90-х гг. она использовалась главным образом в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности, связанной с оборонной промышленностью. Первые лазерные машины – сначала стереолитографические (*SLA*-машины), затем порошковые (*SLS*-машины), были чрезмерно дороги, выбор модельных материалов – весьма скромный. Широкое распространение цифровых технологий в области проектирования (*CAD*), моделирования и расчетов (*CAE*) и механообработки (*CAM*) стимулировало взрывной характер развития технологий *3D*-печати, и в настоящее время крайне сложно указать область материального производства, где в той или иной степени не использовались бы *3D*-принтеры.

Цифровые *3D-технологии* открыли уникальные возможности воспроизведения сложнейших пространственных форм, объектов и инженерных конструкций, механизмов. В работе [49, с. 64] было отмечено: «экономическая эффективность *3D-технологии* в ее качественной безальтернативности, безотходности и значительном снижении себестоимости при серийном и массовом производстве. В то же время *3D-технологии* – это тест на интеллектуальный уровень науки, образования, а также профессиональной квалификации трудовых ресурсов и индустриального развития».

Сначала эти технологии назывались «технологиями быстрого прототипирования» (от английского *Rapid Prototyping*), однако термин *RP-технологии* довольно быстро устарел и в настоящее время не отражает в полной мере реальной сути технологии. Методами «быст-

рого прототипирования» сейчас изготавливаются вполне коммерческие, товарные «боевые» изделия, которые уже нельзя назвать прототипами – имплантаты и эндопротезы, инструменты и литейные формы, детали самолетов и спутников и многое другое.

*Аддитивные технологии* (от английского *Additive Fabrication*) – обобщенное название технологий, предполагающих изготовление изделия по данным цифровой модели (или CAD-модели) методом послойного добавления (*add*, *англ.* – *добавлять*, отсюда и название) материала.

Получение изделия происходит послойно, шаг за шагом путем формирования (тем или иным способом) слоя материала, отверждения или фиксации этого слоя в соответствии с конфигурацией сечения CAD-модели и соединения каждого последующего слоя с предыдущим (рис. 1).

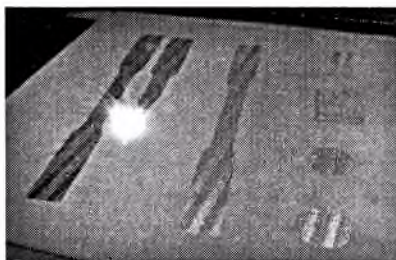


Рис. 1. Процесс послойного лазерного сплавления

Послойный синтез предполагает проведение построения в среде инертного газа с охлаждением определенных зон, с местной усадкой металла, с захватом молекул газа окружающей среды (азота или аргона), с образованием дефектов, вызванных работой лазера, неоднородностью модельного материала и др.

Модельные (строительные) материалы могут быть жидкими (фотополимерные смолы, воски и др.), сыпучими (пески, порошковые полимеры, металлопорошковые композиции), в виде тонких листов

(полимерные пленки, листы бумаги и др.), а также в виде полимерной нити или металлической проволоки, расплавляемой непосредственно перед формированием слоя построения.

При использовании AF-технологий все стадии реализации проекта от идеи до материализации (в любом виде – в промежуточном или в виде готовой продукции) находятся в «дружественной» технологической среде, в единой технологической цепи, где каждая технологическая операция также выполняется в цифровой CAD/CAM/CAE-системе. Практически это означает реальный переход к «безбумажным» технологиям, когда для изготовления детали традиционной бумажной чертежной документации в принципе не требуется.

Суть *Additive Fabrication (AF)* может быть проиллюстрирована простым примером: CAD-модель → AF-машина → деталь (рис. 2).

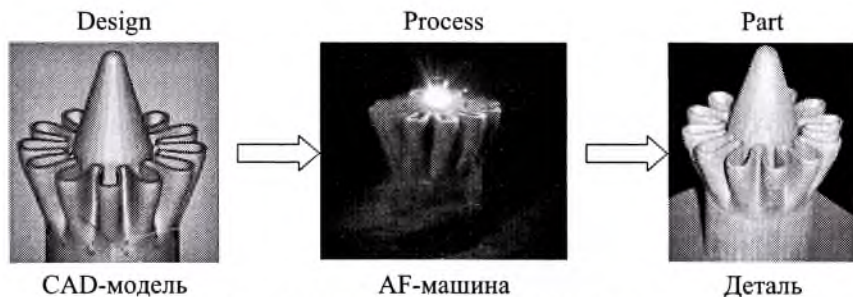


Рис. 2. Процесс Additive Fabrication

Аддитивные технологии охватывают все новые сферы деятельности человека. Дизайнеры, архитекторы, археологи, палеонтологи и представители других профессий используют 3D-принтеры для реализации различных идей и проектов (рис. 3-6). Активно создаются роботизированные комплексы для «печати» быстротвердеющими бетонными смесями.

Все эти работы ведутся при активной поддержке государства и бизнеса из различных источников. Особое внимание уделяется разви-

тию технологий *DMF* – *Direct Metal Fabrication* – непосредственного выращивания из металла. Эту технологию рассматривают в качестве одной из стратегических технологий для освоения в первую очередь в аэрокосмической и оборонной отраслях.

Все многообразие аддитивных технологий базируется на автоматическом преобразовании электронных CAD-проектов в твердотельные физические формы с помощью специальных цифровых фабрикаторов – *фабберов* (*faber* от англ. слова «*fabrication*»), история появления которых насчитывает несколько столетий. Впервые идея автоматизированного изготовления трехмерного твердого тела была реализована в XVIII в. для копирования медальонов. Автор работ [116-118] считает, что «по прошествии трех-четырёх десятков лет человечеству все же удастся воплотить в жизнь немислимое, реализовав в условиях дома непосредственное производство необходимых предметов по моделям физических объектов, загруженных из глобальной сети» [117, с. 7].



Рис. 3. Музыкальный инструмент из алюмид-наполненного полиамида профессора Diegel (Massey University, Auckland, New Zealand)

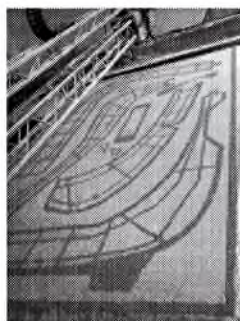


Рис. 4. Принтер итальянского инженера Enrico Dini для «печати» фрагментов зданий (технология Inkjet). Строительный материал – песок и неорганическое связующее

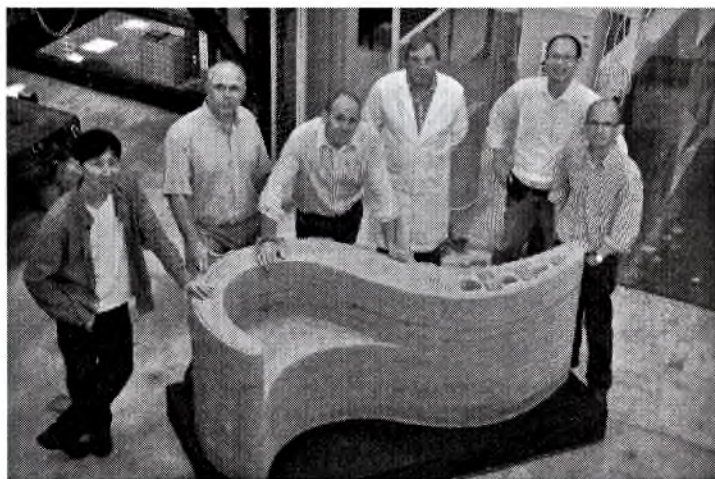


Рис. 5. Разработка принтера экструзионного типа для применения в строительстве (Loughborough University, Великобритания)



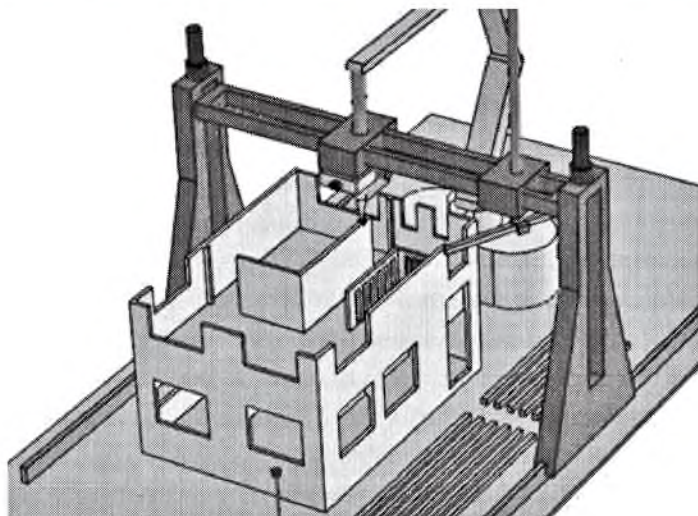
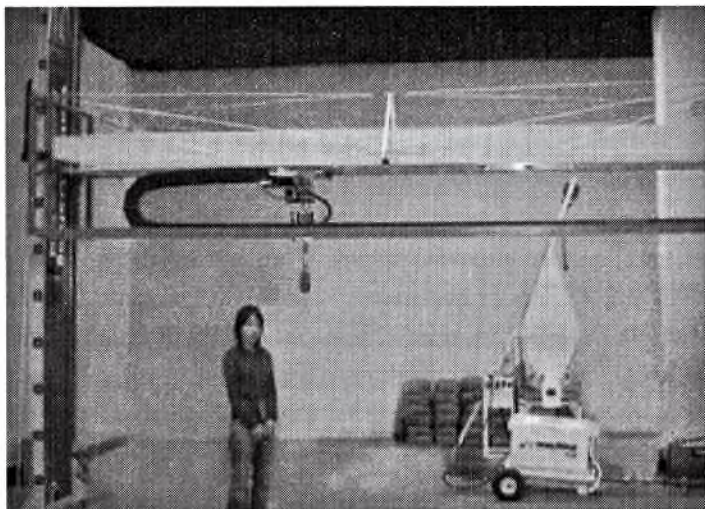


Рис. 6. Проект профессора Behrokh Khoshnevis (Университет Южной Калифорнии). Разработка технологии «печати дома» менее чем за 20 час.