

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Уральский государственный лесотехнический университет»
(УГЛТУ)

А. Е. Шкуро
П. А. Кривоногов
П. С. Захаров

ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ 3D-ПЕЧАТИ

Учебное пособие

Екатеринбург
УГЛТУ
2026

УДК 004.925.84(075.8)

ББК 32.972.131.2я73

Ш67

Рецензенты:

кафедра химии и процессов горения Уральского института Государственной противопожарной службы МЧС России, начальник кафедры, доцент, канд. хим. наук *А. В. Кокишаров*;

Н. П. Кулик, канд. хим. наук, старший научный сотрудник ФГБУН Института высокотемпературной электрохимии Уральского отделения РАН

Шкуро, Алексей Евгеньевич.

Ш67

Технологии и материалы 3D-печати : учебное пособие / А. Е. Шкуро, П. А. Кривоногов, П. С. Захаров ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2026. – 144 с.

ISBN 978-5-94984-990-3

Приведены сведения о современном состоянии отрасли трехмерной печати, ее перспективы и основные направления развития. Описаны основные существующие технологии и методы трехмерной печати, а также пригодные для этих методов материалы. Представлено необходимое программное обеспечение процесса 3D-печати.

Пособие предназначено для обучающихся, осваивающих образовательные программы по направлению «Химическая технология», а также будет полезно специалистам по переработке пластмасс и композитов.

Издается по решению редакционно-издательского совета Уральского государственного лесотехнического университета.

УДК 004.925.84(075.8)

ББК 32.972.131.2я73

ISBN 978-5-94984-990-3

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Часть I. Основы аддитивного производства	7
Глава 1. Общие сведения о 3D-печати	7
1.1. История возникновения 3D-печати	7
1.2. Современное состояние отрасли.....	12
1.3. Общие принципы 3D-печати.....	20
1.4. Классификация технологий по стандарту ISO/ASTM 52900	24
Глава 2. Цифровая цепочка процесса 3D-печати	25
2.1. Программное обеспечение для 3D-моделирования.....	25
2.2. Программы для вывода на печать созданных 3D-моделей.....	39
2.3. Форматы файлов: эволюция от STL к 3MF и AMF	47
2.4. G-код и его особенности для аддитивных установок.....	49
2.5. Программы для управления и мониторинга процессом 3D-печати в реальном времени	50
Часть II. Технологии 3D-печати.....	53
Глава 3. Технологии печати полимерных материалов	53
3.1. Послойное наплавление	53
3.2. Стереолитография	55
3.3. Цифровая светодиодная проекция.....	60
3.4. Масочная стереолитография	61
3.5. Ламинирование	62
3.6. Ламинирование методом селективного осаждения	64
3.7. Струйная трехмерная печать	66
3.8. Технология многоструйного моделирования	68
3.9. Селективное лазерное спекание полимеров	69
3.10. Гибридные методы	71
3.11. Технология Multi Jet Fusion.....	75
Глава 4. Технологии печати металлических материалов	78
4.1. Прямое лазерное спекание металлов.....	78
4.2. Непрямое лазерное спекание металлов.....	82
4.3. Электронно-лучевая плавка металлов.....	83
4.4. Селективное лазерное плавление	85
4.5. Селективное тепловое спекание	87
4.6. Селективное лазерное спекание.....	88
4.7. Струйное нанесение связующего	91

Глава 5. Специализированные методы 3D-печати.....	94
5.1. Методы непрерывной печати.....	94
5.2. Струйная печать керамикой и металлическими пастами.....	96
5.3. Печать строительных конструкций	98
5.4. Биопечать.....	101
Часть III. Материалы для 3D-печати	104
Глава 6. Полимерные материалы	104
6.1. Термопластичные полимеры для экструзионной печати.....	105
6.2. Полимерные порошки	129
6.3. Фотополимерные смолы	131
Глава 7. Металлические и керамические материалы	134
7.1. Порошки для SLM/EBM	134
7.2. Специальные сплавы.....	137
7.3. Керамические материалы	139
Заключение.....	141
Список использованной литературы.....	142

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивное производство (АП), более известное как 3D-печать, – это один из ключевых драйверов Четвертой промышленной революции (*Industry 4.0*). В отличие от традиционных субтрактивных методов (фрезерование, точение), где изделие создается путем удаления материала из заготовки, аддитивные технологии основаны на послойном синтезировании объекта непосредственно из его цифровой 3D-модели. Этот принцип позволяет создавать детали практически любой, даже самой сложной геометрии, которая была недостижима или экономически нецелесообразна при использовании классических подходов [1].

Если всего десятилетие назад 3D-печать ассоциировалась в основном с быстрым прототипированием и любительскими энтузиастскими проектами, то сегодня она уверенно перешла в стадию серийного и даже массового производства функциональных изделий. Объем мирового рынка аддитивных технологий по данным на 2023 г. превысил 20 млрд долларов США, а прогнозы ведущих аналитических агентств (таких как *Wohlers Associates* и *McKinsey*) указывают на его рост до 50...100 млрд долларов к 2030 г. Такая динамика обусловлена резким расширением областей применения – от аэрокосмической индустрии и медицины до автомобилестроения, строительства и производства потребительских товаров [2].

Российский рынок также демонстрирует активное развитие, сместив фокус с импорта оборудования и материалов на развитие собственных технологий и полного производственного цикла в ответ на новые экономические вызовы. Государственные и частные инвестиции направлены на импортозамещение и создание отечественных аддитивных установок, особенно в области печати металлами и высокопрочными полимерами. Современные российские предприятия успешно внедряют 3D-печать для производства оснастки, запасных частей и даже конечных изделий для критически важных отраслей [3].

Современное развитие аддитивного производства характеризуется несколькими ключевыми тенденциями:

- переходом к серийному производству. Технологии типа *Binder Jetting* (струйное нанесение связующего) и *Multi Jet Fusion* (многоструйное сплавление) делают 3D-печать рентабельной для тысяч и десятков тысяч одинаковых изделий;
- расширением палитры материалов. Помимо стандартных пластиков и сплавов, теперь активно используются керамика, композиты

с углеродным волокном, инженерные полимеры (РЕЕК, РЕКК), а также материалы для биопечати и строительства [4];

– цифровизацией и интеллектуализацией. Использование искусственного интеллекта для контроля качества в реальном времени, генеративное проектирование для создания оптимальных легких конструкций и интеграция АП в цифровые производственные цепочки (цифровые двойники);

– фокусом на устойчивом развитии. Аддитивные технологии рассматриваются как инструмент для создания экономики замкнутого цикла за счет минимизации отходов, производства по требованию и использования переработанных материалов.

Данное пособие призвано дать систематизированное представление о современных технологиях и материалах аддитивного производства. В нем подробно рассмотрены физические и химические принципы, лежащие в основе различных методов 3D-печати, классифицированных по международному стандарту ISO/ASTM 52900 [5].

Пособие предназначено для студентов и магистрантов, обучающихся по направлениям 18.03.01 «Химическая технология» (в части технологии полимерных композиционных материалов), 29.03.03 «Технология полиграфического и упаковочного производства» (для освоения принципов цифрового производства и дизайна упаковки), а также будет полезно широкому кругу специалистов и инженеров, желающих освоить принципы работы и применения одной из самых перспективных технологий XXI в.

Часть I. ОСНОВЫ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Глава 1. Общие сведения о 3D-печати

3D-печать, или аддитивное производство, представляет собой технологию послойного создания объектов на основе цифровой модели. В отличие от традиционных методов механической обработки, аддитивные технологии позволяют создавать сложные формы с высокой точностью, минимизируя отходы материала и сокращая время производства.

Глава знакомит с основными принципами 3D-печати, классификацией технологий, материалами и ключевыми этапами процесса: от подготовки цифровой модели до постобработки готового изделия. Особое внимание уделяется истории развития аддитивных технологий, современному состоянию отрасли и практическим преимуществам, которые делают 3D-печать востребованной в промышленности, медицине, архитектуре и других областях.

Изучение общих сведений о 3D-печати создает фундамент для понимания последующих разделов пособия, посвященных материалам, технологиям и проектированию изделий для аддитивного производства.

1.1. История возникновения 3D-печати

Идею появления первого в истории 3D-принтера нередко связывают с телесериалом «Звездный путь». В оригинальной версии 1966 г. зрителям показали устройство под названием Food Synthesizer – оно «печата́ло» готовые блюда (рис. 1.1). В более позднем сериале 1987 г. – «Звездный путь: Следующее поколение» – этот прибор получил новое имя, Replicator, и был наделен значительно более широкими функциями.

В 1984 г. американский инженер Чарльз Халл (рис. 1.2) создал технологию стереолитографии – способ печати трехмерных объектов по данным цифровых моделей из фотополимеризующихся композитных материалов. Спустя два года он получил патент на данную технологию, основал компанию 3D Systems и разработал первый коммерческий прибор для трехмерной печати. Этот первый в истории 3D-принтер получил простое название – «установка для стереолитографии». Уже

в 1988 г. компания 3D Systems выпустила первую модель 3D-принтера, предназначенную для серийного производства и широкого круга пользователей.



Рис. 1.1. Прибор “Food Synthesizer”¹



Рис. 1.2. Чарльз Халл, «отец» современной 3D-печати²

¹ Изображение взято с сайта: 3dprint.com. URL: <https://clck.ru/wjdlN> (дата обращения: 20.03.2026).

² Изображение взято с сайта: all3dp.com. URL: <https://clck.ru/yZcZi> (дата обращения: 20.03.2026).

В 1985 г. М. Фейген предложил послойное формирование объемных моделей из листового материала – пленок, полиэфиров, композитов, пластмасс, бумаги и т. д. – скрепляя слои между собой с помощью разогретого валика. Эта технология получила название *ламинирование*.

В 1986 г. сотрудники Техасского университета в Остине Карл Декарт и Джо Биман разработали и запатентовали метод *селективного лазерного спекания*.

В 1988 г. Скотт Крамп, будущий основатель компании *Stratasys*, изобрел метод *послойного наплавления*, который впоследствии получил наибольшее распространение среди всех технологий трехмерной печати.

Таким образом, все базовые методы 3D-печати были созданы и запатентованы еще в 1980-е гг. Однако тогда не существовало условий для стремительного роста и широкого применения этой отрасли. Постепенно ситуация начала меняться [6].

К середине 1990-х гг. в мировой экономике сложилась новая тенденция: конкурирующие фирмы стали не только бороться за покупателей, но и стремиться максимально учитывать их индивидуальные потребности. Массовое производство однотипной продукции – например, часов или автомобилей – перестало быть востребованным. Объемы партий, выпускаемых заводами, сократились до нескольких тысяч единиц. Это ознаменовало начало эпохи мелкосерийного производства. При этом компании столкнулись с проблемой высокой стоимости разработки форм, лекал и прототипов для постоянно обновлявшихся моделей.

В то же время стали активно распространяться устройства, позволяющие быстро и с минимальными затратами изготавливать модели, – станки с числовым программным управлением (ЧПУ). Часть из них осталась исключительно в промышленной сфере, однако развитие отдельного направления этой «эволюции» привело к созданию офисных 3D-принтеров – именно так началась история современной трехмерной печати.

В 1995 г. два студента Массачусетского технологического института модифицировали струйный принтер. Их устройство формировало изображение не на бумаге, а в специальной емкости, причем результат был объемным. Именно тогда появились термины *3D-печать* и *3D-принтер*. Метод был запатентован и впоследствии использован в компании *Z Corporation* (рис. 1.3), основанной теми же студентами, а также в компании *ExOne*. По сей день *Z Corporation* выпускает 3D-принтеры, работающие на основе этой технологии [7].

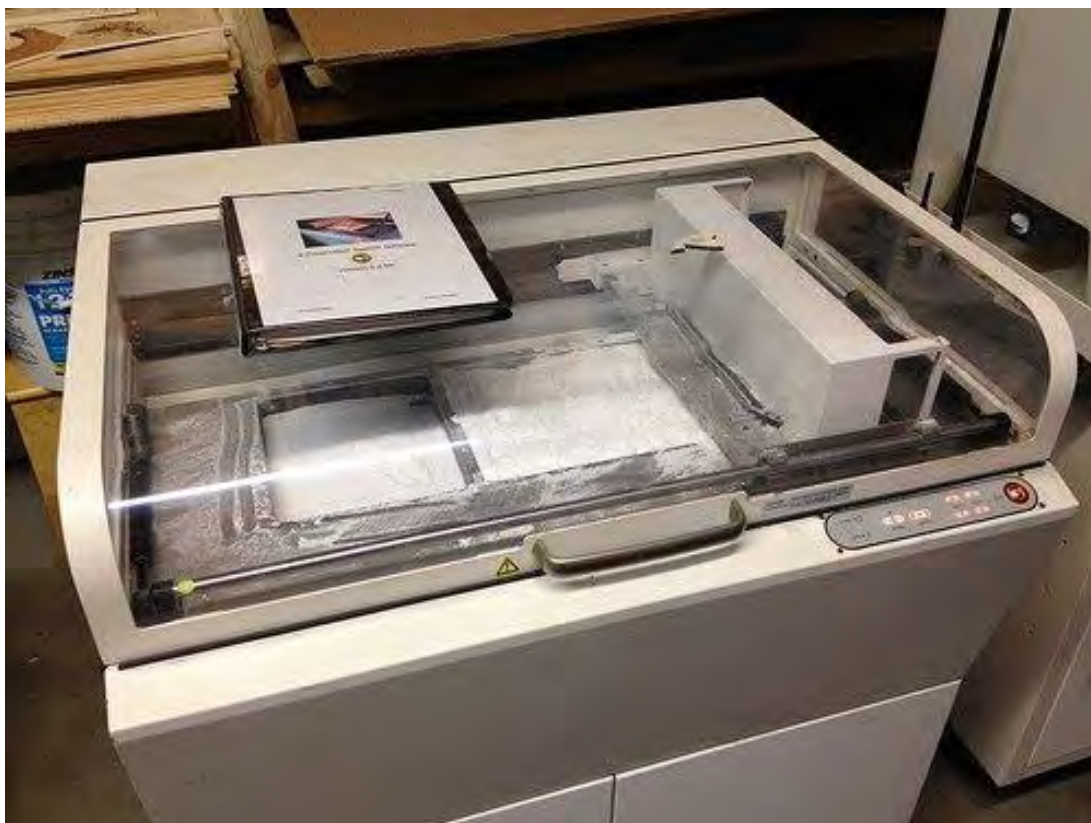


Рис. 1.3. 3D-принтер модели Z402 от Z Corp³

История развития 3D-принтеров продолжилась с появлением технологии *PolyJet*, основанной на использовании фотополимерной смолы. При таком способе печати печатающая головка наносит слой модели из светочувствительного материала, который сразу же засвечивается ультрафиолетовой лампой. Этот метод оказался особенно эффективным: при относительно низкой стоимости он обеспечивает высокую точность, что позволяет изготавливать не только прототипы, но и полностью готовые к применению детали [8].

Со временем индустрия 3D-печати развивалась все быстрее. Появлялись новые компании-производители, предлагавшие собственные решения, внедрялись новые материалы и принципы печати. Габариты устройств становились все меньше, а цены – доступнее: если первые 3D-принтеры представляли собой громоздкие установки, то современные модели легко помещаются на рабочем столе (за исключением промышленных образцов).

Современные трехмерные принтеры во многом напоминают привычные 2D-принтеры: как по внешнему виду, так и по принципу

³ Изображение взято с сайта: www.bibliofond.ru. URL: <https://clck.ru/kLpnD> (дата обращения: 20.03.2026).

работы, основанному на послойном нанесении «красящего» вещества. При этом изделия, создаваемые на таких устройствах, отличаются высокой механической прочностью и могут использоваться как готовые продукты.

В 2010 г. представлен *Urbee* – первый экспериментальный прототип автомобиля, частично напечатанного на 3D-принтере. В это же время активно развивается 3D-печать протезов, имплантов и других медицинских изделий.

Не менее стремительно растет и скорость печати. В 2011 г. компания *Ultimaker* (Нидерланды) установила своеобразный рекорд: ее аппараты достигли скорости 350 мм/с. Однако при столь высокой скорости точность печати заметно снижалась. Сегодня этот показатель уже не выглядит столь впечатляющим. В то же время новые достижения связаны с миниатюризацией: инженеры Венского технологического университета (Австрия) разработали 3D-принтер, способный создавать микроскопические объекты с разрешением до 100 нм при скорости 5 мм/с.

В 2013–2015 гг. истекли ключевые патенты на технологии FDM/FFF, что стимулировало бурный рост десктопных 3D-принтеров и открытых решений. В 2015 г. компания *Carbon* выпускает технологию *CLIP* (*Continuous Liquid Interface Production*) – значительно ускоренный метод фотополимеризации [9].

В 2016–2018 гг. наблюдался рост применения крупноформатной 3D-печати в архитектуре и строительстве. Появились первые напечатанные дома и экспериментальные проекты жилья из бетона.

В 2019 г. появляется технология *Computed Axial Lithography* (CAL), позволяющая создавать объекты не послойно, а целиком, что значительно сокращает время печати для смоляных систем.

В 2020–2022 г. начинает активно внедряться металлопорошковая печать, *Multi Jet Fusion* (MJF) от HP, развиваются гибридные машины (сочетающие аддитивные и субтрактивные методы). Существенный прогресс отмечается в области новых материалов: прочные полимеры, композиты, биоразлагаемые и экологичные полимеры.

В 2023–2025 гг. резко усиливается роль микро- и нанопечати со включением двухфотонной полимеризации с разрешением до сотен нанометров. Появляются компактные чип-принтеры, где печать смоллой управляется световыми фотонными антеннами без механических частей. Все активнее внедряются ИИ-системы: встроенные камеры и сенсоры контролируют процесс в реальном времени и автоматически корректируют параметры печати.

Первоначально трехмерная печать воспринималась как нишевая и дорогостоящая технология, доступная лишь для опытов в крупных лабораториях и на производственных предприятиях. Однако развитие рынка, удешевление комплектующих и рост конкуренции производителей постепенно сделали ее частью повседневной жизни.

На заре развития технологии 3D-принтеры были крайне дорогими и использовались преимущественно крупными корпорациями и исследовательскими центрами. Сегодня ситуация кардинально изменилась: настольные модели стали массовым продуктом, доступным широкому кругу пользователей. Базовые устройства для дома и офиса можно приобрести по цене от 200...300 долларов, а более функциональные решения для профессионального использования стоят в среднем 600...1000 долларов, что делает технологию доступной как энтузиастам, так и малому бизнесу [10].

1.2. Современное состояние отрасли

Спектр изделий, производимых с помощью аддитивных технологий, чрезвычайно широк и продолжает стремительно расширяться. На сегодняшний день 3D-печать находит применение в следующих сферах человеческой деятельности [11]:

- архитектура;
- строительство;
- промышленный дизайн;
- автомобильная отрасль;
- аэрокосмическая отрасль;
- военно-промышленный комплекс;
- инженерная отрасль;
- медицина;
- биоинженерия (для создания искусственных тканей);
- производство одежды и обуви;
- производство ювелирных изделий;
- образование;
- географические информационные системы;
- пищевая промышленность;
- фармацевтика.

В 2010 г. группа ученых Fluid Interfaces Group из Массачусетского Технологического института представила первый 3D-принтер для создания продуктов – «*Cornucopia*». В 2011 г. группа исследователей

из университета Эксетера, университета Брюнеля и фирмы Delcam создали первый 3D-принтер, печатающий шоколадом.

Ведущие мировые корпорации активно внедряют 3D-принтеры в качестве основного производственного оборудования. Так, например, компания Adidas выпустила кроссовки *Futurecraft 3D* (рис. 1.4). Концепция этого проекта предполагает печать подошвы кроссовок, исходя из индивидуальных антропометрических особенностей покупателя. В мире профессионального спорта, счет в котором зачастую идет на миллисекунды, уже давно известно, что чем удобнее обувь, чем больше она учитывает особенности спортсмена, тем выше его результаты. По этой причине изготовление спортивной обуви под индивидуальные особенности спортсмена уже давно не редкость. Отличием и новацией проекта *Futurecraft 3D* является тот факт, что получить кроссовки с подошвой, созданной специально под ногу каждого покупателя, теперь сможет каждый желающий [12].

Следует отметить, что проект *Futurecraft 3D* являлся своеобразным ответом на создание компанией Nike футбольных бутс при помощи технологий 3D-печати.



Рис. 1.4. Кроссовки Futurecraft 3D⁴

⁴ Изображение взято с сайта: www.architecturaldigest.com. URL: <https://clck.ru/QWdZY> (дата обращения: 20.03.2026).

Технологии 3D-печати открывают широкие возможности персонализации в автомобилестроении: каждый сможет заказать уникальный автомобиль, адаптированный под свои требования. Практическая преграда – клиент часто не знает, чего хочет, и не всегда владеет необходимыми инженерными знаниями; предполагается, что это будут компенсировать встроенные анализирующие алгоритмы, автоматически выявляющие и исправляющие решения, нарушающие безопасность или технологичность, при сохранении пользовательских предпочтений.

Для производителей ключевое преимущество – отказ от массового тиражирования многочисленных конфигураций: пользователь формирует функционал и внешний вид, отправляет проект в производство, ПО устраняет ошибки и запускает печать. Такой подход уже применяется на практике (в частности, модель бизнес-предзаказов известна у Tesla). Дополнительный эффект – снижение экологической нагрузки за счет более точечного включения производственных линий.

Практические примеры подтверждают потенциал технологии: в 2013 г. компания Local Motors представила Strati – автомобиль, напечатанный за ~ 30...44 ч из ≈ 40 деталей с использованием ВААМ (производительность $\approx 4,5$ кг/ч), при этом силовые и ходовые компоненты оставались традиционными. Осенью 2016 г. Honda на выставке SEATEC показала автомобиль с напечатанными кузовными деталями (рис. 1.5).

Наконец развитие аддитивных технологий сопряжено и с рисками: в 2013 г. американец Коди Уилсон (Defense Distributed) продемонстрировал «Освободитель» – 3D-напечатанный пистолет из 16 деталей; первый прототип разрушился при выстреле, второй выдержал серию из 8 выстрелов, что подчеркивает необходимость регулирования и контроля новых производственных возможностей (рис. 1.6).

С помощью трехмерной печати изготавливаются некоторые детали ракет для национального агентства США по исследованию космического пространства (NASA). В июле 2013 г. успешно прошли испытания двух топливных форсунок, которые показали результаты на уровне деталей, производимых традиционными методами. Во время рабочих тестов форсунки подвергались воздействию температур более 3000 °C, а также экстремальным уровням давления.

В 2011 г. инженерами университета Саутгемптона создан первый самолет, напечатанный на 3D-принтере. Сложность была скорее в проектировании модели таким образом, чтобы ее можно было распечатать. Модель прекрасно летала.

Перспективнейшим направлением развития аддитивных технологий является печать строительных материалов и непосредственно зданий. Так, в 2016 г. инженерами шанхайской компании *WinSun Decoration Design Engineering Co* был сконструирован строительный 3D-принтер, поразивший мировую общественность своими размерами. Его длина составила 150, а ширина – 10 м. Этот аппарат способен всего за несколько часов напечатать здание высотой до 6 м. В качестве «чернил» этот принтер использует цемент, усиленный стекловолокном.



Рис. 1.5. Автомобиль, «распечатанный» на 3D-принтере⁵

Компания уже применила свое изобретение на практике (рис. 1.7). Пока речь идет про недорогое, несложное одноэтажное жилье, однако в *Shanghai WinSun* полны энтузиазма: тестовые образцы обошлись предприятию на 50 % дешевле, чем их аналоги, возведенные при использовании классических методов строительства. Технологии подобного рода интенсивно развиваются в США, Великобритании и Нидерландах.

Словенская компания *BetAbram* занялась серийным производством строительных принтеров. На данный момент модельный ряд продукции словенского производителя ограничен тремя моделям. Стоимость бюджетной модели составит 12 000 евро, в то время как флагманы линейки будут продаваться по цене от 20 000 евро. Учитывая, что

⁵ Изображение взято с сайта: www.carwale.com. URL: <https://clck.su/NeqQy> (дата обращения: 20.03.2026).

аппарат может печатать несущие конструкции, его стоимость полностью себя оправдывает. Что более важно: он окупает себя. Вполне возможно, что через пару лет каждый желающий сможет купить 3D-принтер для строительства домов на розничном рынке.



Рис. 1.6. Пистолет «Освободитель»⁶



Рис. 1.7. Дом, построенный с помощью 3D-принтера⁷

⁶ Изображение взято с сайта: en.wikipedia.org. URL: <https://clck.ru/dlXgj> (дата обращения: 21.03.2026).

⁷ Изображение взято с сайта: www.businessinsider.com. URL: <https://clck.ru/CtiHy> (дата обращения: 21.03.2026).

Аддитивные технологии в медицине затрагивают самые разные ее отрасли, в том числе хирургию, стоматологию, сурдологию, изготовление коронок, каркасов бюгельных протезов, хирургических шаблонов для имплантации, позвоночных имплантатов, индивидуальных ушных вкладышей для слуховых аппаратов, протезирование конечностей (рис. 1.8). Особые надежды в области медицины возлагаются на развитие трехмерной печати органов.

Первый удачный эксперимент по созданию органов на 3D-принтере состоялся в 2006 г. Группа биоинженеров из *Wake Forest Institute for Regenerative Medicine* (Винтсон-салем, США) разработала и напечатала мочевые пузыри для семерых подопытных пациентов. Врачи использовали стволовые клетки пациентов для создания искусственного органа. Образцы донорской ткани в специальной герметичной камере с помощью экструдера нанесли поверх макета мочевого пузыря, нагретого до естественной температуры человеческого тела. Через 8 недель в ходе интенсивного роста и последующего деления клетки воссоздали человеческий орган.

Ближайшие перспективы аддитивных технологий в области медицины заключаются в создании первых коммерческих биопринтеров и массовой печати протезов и имплантов.



Рис. 1.8. Имплант-челюсть, распечатанный на 3D-принтере⁸

⁸ Изображение взято с сайта: www.researchgate.net. URL: <https://clck.ru/yqcEs> (дата обращения: 21.03.2026).

Одним из важных направлений развития 3D-печати является печать собственно 3D-принтеров, или *репликация*. На сегодняшний день полная репликация 3D-принтера невозможна: необходимые электронные и электромеханические компоненты (например, печатные платы) не подлежат печати. Однако предполагается, что в ближайшем будущем эта проблема будет устранена: почти все используемые материалы или их ближайшие аналоги уже были использованы в качестве печатных материалов в различных методах аддитивного производства [13].

В связи с этим необходимо упомянуть проект *Replicating Rapid Prototype* или *RepRap*. Целью этого проекта стало создание самокопирующегося 3D-принтера (рис. 1.9). Самокопирование определяется авторами как способность аппарата воспроизводить компоненты, необходимые для создания другой версии себя. Благодаря способности аппарата к самовоспроизводству авторы считают возможным дешево распределять такие устройства между людьми и сообществами, позволяя им создавать (или скачивать из Интернета) сложные продукты без необходимости создания дорогой производственной инфраструктуры. Дальнейшее развитие реплицирующих устройств будет носить эволюционный характер вкупе с возможностью экспоненциального роста числа изготовленных устройств. Планируется, что проект станет одной из «прорывных технологий» наравне с персональным компьютером и интегральными микросхемами [14].

Стремительно набирают популярность сервисы по созданию 3D-портретов. По аналогии с клеевым пистолетом была реализована идея создания ручного инструмента для 3D-печати. Этот инструмент получил название «3D-ручка» (рис. 1.10). С помощью 3D-ручки вы получаете возможность рисовать в воздухе. Это очередной технологический прорыв в области 3D-моделирования.

Гаджет, которому суждено навсегда изменить представление о том, что такое «рисование», так как теперь вы сможете рисовать не на бумаге, а в пространстве. Устройство напоминает 3D-принтер экструзивного типа, однако сфера его применения по-настоящему велика. С его помощью вы сможете не только практиковаться в рисовании и экспериментировать в создании художественных шедевров, но и определенно сможете решить множество проблем бытового характера.

На сегодняшний день различают два вида ручек: холодные и горячие. Первые печатают быстро затвердевающими смолами. «Горячие» ручки используют различные термопластические полимеры.



Рис. 1.9. Модель самовоспроизводящего принтера от RepRap⁹



Рис. 1.10. 3D-ручка¹⁰

⁹ Изображение взято с сайта: repprap.org. URL: <https://clck.su/xEUIX> (дата обращения: 21.03.2026).

¹⁰ Изображение взято с сайта: computeraideddesignguide.com. URL: <https://clck.su/hmQNc> (дата обращения: 21.03.2026).

Принцип работы горячей 3D-ручки предельно прост. В отличие от обычных приспособлений для письма и рисования, вместо чернил заправляется пластиковая нить. Большинство ручек, доступных на розничном рынке, используют обычный полимерный пруток, который покупается для принтеров, работающих по технологии послойного наплавления.

В задней части корпуса предусмотрено специальное отверстие, в которое вставляется филамент. Встроенный механизм автоматически подводит филамент к экструдеру, где он расплавляется и выдавливается в расплавленном виде наружу. Металлический наконечник печатной головки нагревается до температуры 180...220 °С, поэтому при работе с устройством следует придерживаться базовых правил безопасности. Несмотря на то, что 3D-ручки оборудованы встроенным вентилятором для ускорения процесса застывания пластика, небрежное отношение к прибору напрямую связано с риском получить ожег.

1.3. Общие принципы 3D-печати

3D-принтер (рис. 1.11) – это устройство, которое осуществляет трехмерную печать и позволяет создавать материальные объекты по их 3D-моделям. Конструктивные особенности 3D-принтера целиком и полностью зависят от технологии аддитивного производства, положенной в его основу [15].

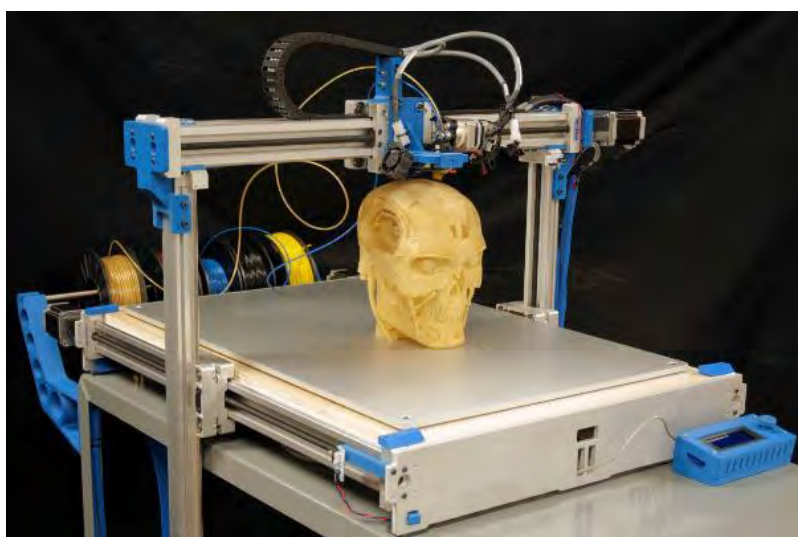


Рис. 1.11. 3D-принтер в процессе печати¹¹

¹¹ Изображение взято с сайта: www.embodi3d.com. URL: <https://clck.ru/XudyO> (дата обращения: 21.03.2026).

Автоматизированное аддитивное производство невозможно без источника информации о взаиморасположении элементов объекта печати, его геометрии. Таким источником информации служат цифровые трехмерные модели или *3D-модели*. Они создаются методом ручного компьютерного графического дизайна или методом 3D-сканирования. Ручное моделирование, или подготовка геометрических данных для создания трехмерной компьютерной графики, несколько напоминает скульптуру. 3D-сканирование – это автоматический сбор и анализ данных реального объекта, а именно формы, цвета и других характеристик, с последующим преобразованием в цифровую 3D-модель (рис. 1.12) [16].



Рис. 1.12. 3D-модель танка¹²

И ручное, и автоматическое создание 3D-печатных моделей может вызвать трудности у среднего пользователя. В связи с этим в последние годы получили распространение 3D-печатные торговые площадки. Среди наиболее популярных примеров такие сервисы, как *Shapeways*, *Thingiverse* и *Threeding*.

Построение модели с применением современных технологий занимает от нескольких часов до нескольких дней – все зависит от метода, а также размеров и сложности изделия. Промышленные аддитивные системы способны сократить время до нескольких часов, однако

¹² Изображение взято с сайта: www.turbosquid.com. URL: <https://clck.su/MPtnM> (дата обращения: 21.03.2026).

итоговый результат определяется типом установки и количеством одновременно изготавливаемых моделей.

Во время печати принтер считывает 3D-файл (обычно в формате STL), содержащий данные трехмерной модели, и послойно наносит жидкий, порошкообразный, бумажный или листовый материал, формируя объект из серии поперечных сечений. Эти слои, соответствующие виртуальным срезам CAD-модели, соединяются или сплавляются, создавая изделие заданной формы. Ключевое преимущество метода – возможность изготавливать геометрически сложные формы практически без ограничений.

Разрешение принтера определяется толщиной наносимых слоев (ось Z) и точностью позиционирования печатающей головки в горизонтальной плоскости (оси X и Y). Оно измеряется в DPI (точки на дюйм) или микрометрах. Типичная толщина слоя составляет около 100 мкм (250 DPI), однако современные устройства вроде Objet Connex и 3D Systems ProJet печатают с толщиной слоя от 16 мкм (1600 DPI). По осям X и Y разрешение сопоставимо с показателями обычных лазерных принтеров, а размер частиц порошка обычно достигает 50...100 мкм.

Традиционные технологии – литье под давлением или прессование – остаются выгоднее при выпуске крупных партий полимерных изделий. Но при мелкосерийном производстве аддитивные методы выигрывают благодаря гибкости дизайна, высокой скорости запуска и экономичности на единицу продукции. Кроме того, настольные 3D-принтеры дают возможность инженерам и дизайнерам быстро создавать концепты и прототипы прямо в офисе.

Хотя разрешение печати удовлетворяет большинству задач, наивысшую точность можно получить при комбинированном подходе – печати с небольшим превышением размеров и последующей механической обработкой. Такой метод используется, например, в установках LUMEX Avance-25.

Некоторые технологии предусматривают печать несколькими материалами и цветами в одном цикле. При этом нередко применяются специальные «опоры» для формирования нависающих элементов конструкции. После завершения печати опоры удаляются – либо механически, если выполнены из того же материала, либо растворяются в воде или ацетоне, если напечатаны из поддерживающего состава. Технологические особенности процесса трехмерной печати главным образом зависят от технологии аддитивного производства, лежащей в основе этого процесса. Классификация основных методов технологий, применяемых в трехмерной печати на сегодняшний день, представлена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Методы и технологии 3D-печати

Метод	Базовая технология	Используемые материалы
Экструзионный	Моделирование методом послойного наплавления (FDM или FFF)	Термопластичные полимеры (такие как полилактид (ПЛА), акрилонитрилбутадиенстирол (АБС-пластик) и др.)
Проволочный	Производство произвольных форм электронно-лучевой плавкой (EBF)	Практически любые металлические сплавы
Порошковый	Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)	Практически любые металлические сплавы
	Электронно-лучевая плавка (EBM)	Титановые сплавы
	Выборочная лазерная плавка (SLM)	Титановые сплавы, кобальт-хромовые сплавы, нержавеющая сталь, алюминий
	Выборочное тепловое спекание (SHS)	Порошковые термопластичные полимеры
	Выборочное лазерное спекание (SLS)	Термопластичные полимеры, металлические порошки, керамические порошки
Струйный	Струйная трехмерная печать (3DP)	Гипс, пластики, металлические порошки, песчаные смеси
Ламинирование	Изготовление объектов методом ламинирования (LOM)	Бумага, металлическая фольга, пластиковая пленка
Полимеризация	Стереолитография (SLA)	Фотополимеры
	Цифровая светодиодная проекция (DLP)	Фотополимеры

Поскольку представленные в таблице методы печати существенно различаются по лежащим в их основе принципам, условиям применимости, материалам, форме и функциональному назначению изделий, получаемых с их помощью, уместно будет рассматривать каждый из методов отдельно.

1.4. Классификация технологий по стандарту ISO/ASTM 52900

Для унификации терминологии в области аддитивного производства в 2015 г. был принят международный стандарт ISO/ASTM 52900 “*Additive manufacturing – General principles – Terminology*”, который заменил разрозненные коммерческие и торговые наименования технологий (например, FDM, SLA, SLS). Такая классификация основывается на физических принципах построения изделия (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Классификация аддитивных технологий
согласно стандарту ISO/ASTM 52900

Класс технологии	Принцип процесса	Типичные примеры
Vat Photopolymerization (фотополимеризация в ванне)	Затвердевание жидкой смолы под действием лазера, проектора или ЖК-матрицы	SLA, DLP, MSLA
Material Extrusion (экструзия материала)	Наплавление термопласта через нагретое сопло	FDM/FFF
Material Jetting (струйное нанесение материала)	Распыление капель фотополимера с последующим отверждением	PolyJet, MultiJet
Binder Jetting (струйное нанесение связующего)	Скрепление порошкового слоя жидким связующим, последующее спекание/инфильтрация	Binder Jetting для металлов и керамики
Powder Bed Fusion (плавление/спекание порошка в слое)	Избирательное воздействие лазера или электронного пучка на порошковый слой	SLS (полимеры), SLM/DMLS (металлы), EBM
Directed Energy Deposition (направленное энергетическое наплавление)	Подача порошка или проволоки в зону плавления, создаваемую концентрированным источником энергии	LMD, DED
Sheet Lamination (послойная ламинация листов)	Сборка изделия из листовых материалов с резкой и склеиванием/спеканием	LOM, UAM

Таким образом, классификация ISO/ASTM 52900 рассматривает аддитивные процессы как единую систему, что облегчает их сравнение, стандартизацию и выбор технологии для конкретных задач.

Глава 2. Цифровая цепочка процесса 3D-печати

Эффективное использование аддитивных технологий невозможно без понимания всей цифровой цепочки производства – от создания 3D-модели до подготовки файла для печати и управления процессом на принтере. Глава 2 посвящена рассмотрению ключевых этапов этой цепочки: проектирования и моделирования, подготовки и исправления сетки, генерации поддержек и слайсинга, а также особенностей форматов файлов и программного обеспечения для мониторинга печати.

Знание цифровой цепочки позволяет оптимизировать качество и точность изделий, сократить время производства, минимизировать ошибки и эффективно использовать материалы. Кроме того, современные инструменты автоматизации и контроля открывают возможности для интеграции аддитивного производства в промышленные процессы и персональное изготовление прототипов, обеспечивая гибкость и адаптивность технологического цикла.

2.1. Программное обеспечение для 3D-моделирования

Обязательным условием для начала трехмерной печати является наличие цифровой модели планируемого к печати изделия. Существует несколько способов получения такой модели:

- поиск в каталогах готовых 3D-моделей, содержащихся в большом количестве в сети Интернет;
- создание трехмерной модели объекта с помощью какого-либо 3D-редактора;
- сканирование существующего объекта;
- создание трехмерной модели по чертежам или фотографиям с помощью искусственного интеллекта.

Проще всего отсканировать уже существующий объект. Существует два варианта сканирования объектов:

- 1) сканирование с использованием 3D-сканнера и программного обеспечения, поставляющегося в комплекте с ним;
- 2) использование фотоаппарата и специальных программ захвата трехмерных моделей объектов по их фотографиям (например, Autodesk 123D Catch).

Если у вас имеется 3D-принтер, но нет 3D-сканнера или программа для захвата цифровых моделей реально существующих объектов не обеспечивает надлежащей точности, или объект, который вы хотите распечатать, пока что существует только в вашем воображении, стоит

воспользоваться специализированной программой для построения трехмерных моделей – 3D-редактором. Даже если вы сканируете реальный объект с помощью сканера, скорее всего вам захочется его доработать. Поэтому сегодня 3D-редактор – необходимый инструмент для всех, кто хочет печатать уникальные и необычные модели.

Зачастую в качестве 3D-редакторов применяются системы автоматизированного проектирования или системы автоматизированного дизайна (сокращенно САПР и CAD). Стоит отметить, что отечественный термин САПР является более широким по сравнению с англоязычным термином CAD. Так, в перечень САПР, помимо CAD-систем, включаются CAE (computer aided engineering) – системы расчетов и инженерного анализа, CAM (computer aided manufacturing) – системы проектирования технологических процессов производства, PDM (product data management) – системы координации и управления проектными данными, SCM (supply chain management) – системы управления цепочками поставок материалов и комплектующих. Наиболее популярные системы автоматического проектирования, применяемые в трехмерной печати, представлены в табл. 2.1 [17].

Существует множество форматов файлов для моделей, но большинство 3D-принтеров использует STL формат. К сожалению, не все STL файлы могут быть распечатаны. Модель, подходящая для печати, должна иметь «герметичную» форму с закрытой монолитной поверхностью, без каких-либо разрывов, которая четко разделяет внутреннюю и внешние части модели. Программы компьютерной графики (такие как Blender) обычно моделируют поверхность, не заботясь о «герметичности» модели. Поэтому новичкам рекомендуется на первых порах использовать программное обеспечение, специализированное на создание монолитных моделей, например, 123 Design.

Таблица 2.1

САПР, применяемые в 3D-печати

Программа	Разработчик	Существует с	Цена подписки на 1 год	Примечания
Blender	Blender Foundation	1999	0	Широко известная и признанная, мощная программа с открытым исходным кодом. Огромное сообщество пользователей. Легка в освоении

Продолжение табл. 2.1

Программа	Разработчик	Существует	Цена подписки на 1 год	Примечания
SketchUp	Trimble	2000	0/\$400 (pro)	Хороший баланс простоты в использовании и функциональности. Встроенная функция обмена 3D-моделями имеет большое сообщество пользователей. Нет родной поддержки STL
FreeCAD	Juergen Riegel, Werner Mayer	2002	0	Очень мощная параметрическая CAD платформа с открытым кодом, сфокусированная на инженерном использовании. Набор функций конкурирует с профессиональной линейкой CAD программ
OpenSCAD	Cliffird Wolf, Marius Kintel	2009	0	Модели создаются текстовыми скриптами, напоминающими программирование
Sculptris	Tomas Pettersson / Pixologic	2010	0	Использует принцип придания формы модели по аналогии с лепкой глиной, путем «защипывания», «выглаживания» и т. д. Возможно коммерческое использование
Tinkercad	Tinkercad Inc./Autodesk	2011	0	Удобный браузерный инструмент для обучения и несложного моделирования
123D Design	Autodesk	2011	0	Младший брат для Autodesk Inventor. Усовершенствованная программа для монолитного моделирования 3D-объектов для PC, Mac, web, и iPad
123D Sculpt	Autodesk	2011	0	Расширяет возможности моделирования для интерфейса с применением сенсорного экрана iPad

Продолжение табл. 2.1

Программа	Разработчик	Существует	Цена подписки на 1 год	Примечания
123D Creature	Autodesk	2013	0	В интуитивно понятном дружественном интерфейсе iPad данное приложение позволяет создавать собственных трехмерных персонажей, моделировать их внешний вид и текстуру
Sharp3D	Sharp3D	2014	0 (для iPadOS, macOS)/ \$300 (другие ОС)	Мобильное приложение для быстрого прототипирования и моделирования на планшетах, известно своей интеграцией с Apple Pencil
Cubify Design	3D Systems	2013	\$285	Программное обеспечение, позволяющее создавать монолитные 3D-модели с учетом последующей 3D-печати. Является развитием Cubify Invent и Cubify Sculpt
Meshy	Meshy LLC	2023	0/\$180 (pro)	Удобный онлайн-сервис, использующий ИИ-платформу. Отлично подходит для новичков. Генерирует 3D-модель на основе текстового описания или изображений
Autodesk Fusion 360	Autodesk	2013	0/\$495 (pro)	Мощное облачное программное обеспечение для проектирования моделей. Позволяет работать нескольким пользователям и создавать сложные сборки. Популярно благодаря расширенным функциям инженерии и симуляции

Окончание табл. 2.1

Программа	Разработчик	Существует	Цена подписки на 1 год	Примечания
Rhinoceros	McNeel & Associates	1998	\$230 (EDU)	Специализируется на моделировании с использованием NURBS (неоднородных рациональных В-сплайнов). Используется в задачах, требующих точного моделирования поверхностей. Например, архитектура и дизайн ювелирных изделий
Modo	Luxology, LLC	2004	0/\$1800	Инструмент для 3D-моделирования, текстурирования и рендеринга. Предлагает мощные функции моделирования, имеет интуитивно понятный интерфейс
ZBrush	Pixologic	2009	0/\$180	Инструмент для цифровой скульптуры, способный создавать высокодетализированные, сложные модели

Рассмотрим наиболее популярные современные программные средства трехмерного моделирования.

Autodesk 3Ds Max. Крайне функциональная программа. С ней можно реализовать любую задумку, поэтому она так популярна среди инженеров и дизайнеров. Удобно, что в сети есть множество бесплатных уроков, с которыми вы быстро обучитесь работе с софтом. Но это программа поверхностного моделирования, то есть с ее помощью создаются объекты, непригодные для объемной печати.

Достоинства:

- быстрое и эффективное ПО. 3ds Max легковесен и хорошо работает в задачах моделирования, освещения и экспорта;
- легко использовать. Как новички, так и эксперты находят интерфейс удобным и легким для навигации;
- быстрый рендеринг: он обеспечивает быстрые, реалистичные рендеры, повышая производительность.

Недостатки:

- маленькие окна интерфейса. Некоторые окна слишком малы, вызывают раздражающее прокручивание;
- нет многопоточности. Некоторые задачи выполняются медленнее из-за отсутствия многопоточности;
- низкая производительность на старых ПК. Она испытывает трудности на старых или менее мощных компьютерах.

SolidWorks. Своеобразная твердотельная альтернатива предыдущему софту. С ее помощью создаются изделия с изначально заполненным внутренним пространством. Она также поможет оцифровать двухмерные чертежи.

Достоинства:

- удобное моделирование. SolidWorks имеет простые инструменты для создания и сборки деталей, что делает ее доступной для работы с большими моделями: эффективно управляет большими сборками и остается стабильной со сложными проектами;
- обширная база данных материалов. Программное обеспечение предлагает большую библиотеку материалов, экономя время в процессе проектирования;
- инструменты симуляции и анимации. SolidWorks включает инструменты для анализа проектов и визуализации их поведения под нагрузкой.

Недостатки:

- высокие системные требования. SolidWorks требует мощного компьютера для хорошей работы, особенно со сложными моделями;
- сложный САМ пакет. Функции САМ сложны в использовании, что может быть разочаровывающим для пользователей;
- длительное время решения для сложных моделей.

Autodesk 123D Design. Это бесплатная программа с хорошим функционалом и крайне удобным интерфейсом. Один из лучших трехмерных редакторов для начинающих, так как программа очень проста в освоении. Минус – отсутствие бесплатных уроков.

Google SketchUp. Для создания 3D-моделей принтеру необходимо получить описание того, что оператор должен получить в результате. Такие описания, как правило, создаются с использованием CAD-программ, что в настоящее время является довольно дорогим удовольствием. Но чаще всего для решения задачи вполне достаточно будет и бесплатного программного обеспечения Google SketchUp. В ее работе вначале используется свой собственный формат SKP. Затем при помощи специального плагина этот формат конвертируется в STL.

Интерфейс программы представлен на рис. 2.1, а набор функций – в табл. 2.2.

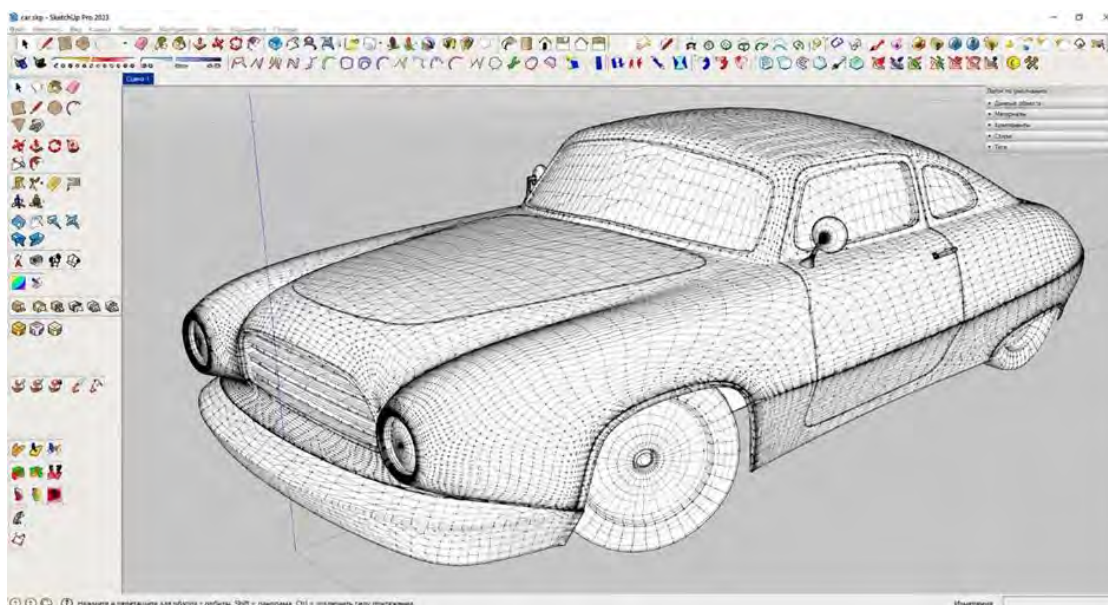


Рис. 2.1. Интерфейс программы Google SketchUp¹³

Одним из неоспоримых достоинств SketchUp является целый набор запатентованных разработчиками инструментов, которые делают работу с программой легкой и результативной.

Таблица 2.2

Функциональные особенности Google SketchUp

Функция	Результат применения
Инструмент «Тяни/Толкай»	Плоская поверхность превращается в 3D (например, можно превратить квадрат в куб)
Точные измерения	В 3D-печати одним из основных параметров, который гарантирует нужный результат, является точность в измерениях. В данном случае это требование выполняется на очень высоком уровне
Работа с другими программами	При работе с версией SketchUp Pro можно экспортировать геометрию модели, например, в 3ds MAX или AutoCAD

¹³ Изображение взято с сайта: www.academyx.eu. URL: <https://clck.ru/zIpHx> (дата обращения: 22.03.2026).

Функция	Результат применения
Инструмент «Ведение»	При помощи данного инструмента есть возможность создания 3D-формы путем экструзии (выдавливания) 2D-поверхности вдоль заданных линий
Функция сечений SketchUp	Использование данной возможности дает возможность пользователю «заглянуть внутрь» проектируемого объекта
Функция «Сцены»	С ее помощью можно вращать и перемещать плоскости сечений. Также есть возможность отдельно сохранить нужные для дальнейшей работы виды модели
Инструменты «Осмотреть» и «Проход»	Проектируемую модель можно увидеть изнутри при помощи данных инструментов навигации
Инструменты «Песочницы»	Позволят создать, адаптировать или изменить плоское изображение местности в 3D (можно добавить уступы, автотрассы, долины, создать гладкий ландшафт)
Импорт 3DS	Возможность работы с моделями, которые уже имеются в другом формате, путем простого импорта
Импорт изображений	Возможен импорт изображений, имеющих в форматах JPG, PNG, TIFF и PDF
Экспорт файлов	С использованием данной программы можно экспортировать растровое изображение (не более 10 тысяч пикселей) в форматах JPG, PNG, TIFF

Достоинства:

- удобный для пользователя. Новички могут быстро начать;
- универсальный. Хорошо работает в различных отраслях, включая архитектуру, инженерное дело и 3D-печать;
- 3D-склад. Доступ к обширной библиотеке бесплатных 3D-моделей помогает сэкономить время на проектирование;
- интеграция. Плавно интегрируется с популярным программным обеспечением для проектирования и поддерживает ключевые форматы файлов, такие как DWG и DXF.

Недостатки:

- ограниченные расширенные функции. Не идеально для сложных или профессиональных проектов;
- базовая анимация. Отсутствуют расширенные инструменты анимации;
- крутая кривая обучения. Расширенные функции могут быть трудными для освоения;
- дорогая версия Pro. Больше функций стоит дороже, хотя доступны подписки;
- различия на Mac. Версия для Mac может не иметь некоторых функций по сравнению с Windows.

On-line сервис Tinkercad предназначен для обеспечения возможности создания 3D-моделей непосредственно в приложении, которое работает в браузере. Затем можно передавать его на печать. Эта разработка основана на базе WebGL, что дает пользователю возможность работать с данным сервисом без необходимости установки дополнительных приложений. Вполне достаточно браузера, который поддерживает WebGL (Opera 12 Alpha, Firefox или Chrome). Модели, созданные при помощи Tinkercad, можно загрузить на локальный диск или сохранить на сервере. Сервис работает с i.Materialise, Shapeways и Ponoko (сервисами 3D-печати), а также принтерами MakerBot. Tinkercad является бесплатным при его некоммерческом использовании.

Достоинства:

- бесплатно. Tinkercad полностью бесплатен, что делает его доступным для всех, кто хочет исследовать 3D-печать без каких-либо финансовых барьеров;
- быстрое прототипирование. Позволяет быстро создавать высококачественные модели и связываться с услугами 3D-печати;
- удобный интерфейс. Простой в использовании интерфейс с опциями для 3D-дизайна, схем и блоков кода;
- может быть интегрирован с Thingiverse, что облегчает обмен вашими проектами;
- фокус на 3D-печати. Инструмент более ориентирован на 3D-печать, чем на резку или гравировку.

Недостатки:

- ограничен для сложных проектов. Отсутствуют расширенные функции и трудности с детализированными проектами;
- требуется Интернет. Не может использоваться офлайн, что делает его ненадежным при плохом Интернет-соединении;

– утомительные настройки точности. Работа с точностью отнимает много времени.

Solidworks Standard. Данная программа имеет два основных направления работы: гибридное параметрическое моделирование и проектирование изделий при специфических условиях изготовления (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Характеристики Solidworks Standard

Гибридное параметрическое моделирование	Проектирование изделий при специфических условиях изготовления
Моделирование поверхностей	Пресс-формы и штампы
Твердотельное моделирование	Листовой материал
Каркасное моделирование	Металлоконструкции
Импортированная геометрия	Детали из пластмасс
Редактирование с использованием параметров и истории проектирования модели	—
Прямое редактирование	—
Использование вспомогательной геометрии	—

Также данное программное обеспечение дает возможность пользоваться такими функциями как:

- библиотека проектирования;
- экспресс-анализ;
- экспертные системы;
- оформление чертежей в ЕСКД;
- анимация;
- трансляция данных.

Достоинства:

– удобное моделирование. SolidWorks имеет простые инструменты для создания и сборки деталей, что делает его доступным

для работы с большими моделями: он эффективно управляет большими сборками и остается стабильным с сложными проектами;

- обширная база данных материалов. Программное обеспечение предлагает большую библиотеку материалов, экономя время в процессе проектирования;

- инструменты симуляции и анимации. SolidWorks включает инструменты для анализа проектов и визуализации их поведения под нагрузкой.

Недостатки:

- высокие системные требования. SolidWorks требует мощного компьютера для хорошей работы, особенно со сложными моделями;

- сложный САМ пакет. Функции САМ сложны в использовании, что может быть разочаровывающим для пользователей.

- длительное время решения для сложных моделей.

OpenSCAD – программное обеспечение, которое предназначено для создания твердотельных 3D САПР-объектов. Эта программа – то, что нужно, если необходимо создать 3D-модель детали машины. OpenSCAD работает путем чтения файла сценария, в котором описан объект, а затем строит 3D-модель. В результате у пользователя имеется полный контроль над процессом, возможность менять следующий шаг или в процессе моделирования, или при производстве параметрических конструкций.

OpenSCAD работает по двум основным методам:

- CSG – конструктивная сплошная геометрия;

- экструзия (выдавливание двухмерных контуров).

Достоинства:

- точное моделирование. Отлично подходит для создания точных 3D-моделей с точными размерами;

- бесплатно и с открытым исходным кодом. Бесплатный доступ, позволяет любому использовать его;

- легко изучить для программистов. Знакомо для пользователей, имеющих опыт в программировании.

Недостатки:

- ограниченные функции. Не подходит для создания сложных форм или 3D-печати;

- неудобный интерфейс. Требуется знание программирования, что может быть сложным для новичков.

Компас-3D уже много лет является эталонной системой при трехмерном моделировании твердых тел. Эта программа открывает огромные воз-

возможности перед профессиональным пользователем для решения сложных задач, связанных с построением различных поверхностей. Для этого в нем имеется обширная внутренняя база библиотек и развитый инструментарий для работы с ней. Основной задачей системы Компас-3D является формирование модели 3D для детали, ее сборочных единиц или отдельных элементов. По виду конструкций могут быть как типичные, так и нестандартные элементы.

При работе с полной версией КОМПАС-3D открываются возможности для:

- машиностроительного проектирования;
- применения в приборостроении (при создании принципиальных электрических схем, а также перечней элементов);
- строительного проектирования (является инструментом для создания, использования и хранения интеллектуальных строительных конструкций и элементов, а также включена библиотека для системы проектирования газоснабжения и проектирования систем электроснабжения).

Достоинства:

- отечественное программное обеспечение. Разрабатывается в России, доступ к обновлениям и библиотекам;
- простота в освоении. Интерфейс интуитивно понятен, что облегчает обучение, особенно для начинающих пользователей;
- поддержка российских стандартов (ГОСТ), что важно для проектной документации в России;
- широкий функционал. Программа предоставляет инструменты для 2D- и 3D-проектирования, создания сборок, спецификаций и других видов технической документации;
- интеграция с другими системами. «КОМПАС-3D» может интегрироваться с другими программными продуктами, такими как системы управления данными (PDM) и системы планирования ресурсов предприятия (ERP).

Недостатки:

- меньшая распространенность – программа менее популярна за пределами России и стран СНГ, что может создать проблемы при обмене проектами с иностранными партнерами;
- ограниченная библиотека компонентов. Стандартная библиотека компонентов «КОМПАС-3D» может быть менее обширной, чем у некоторых других САПР-систем;
- требования к аппаратному обеспечению. Для работы со сложными 3D-моделями может потребоваться более мощный компьютер.

T-flex CAD 3D – идеальное решение для того, чтобы автоматизировать конструкторско-технологическую подготовку производства. Данная программа дает пользователю надежные и мощные инструменты, а также обеспечивает возможную интеграцию с самыми лучшими программами в данной области.

Возможности для пространственного моделирования:

- масс-инерционные характеристики трехмерных сборочных конструкций и для твердых тел;
- визуализация трехмерных объектов (шейдинг, рендеринг, реберная модель и удаление невидимых линий);
- возможность получения точных чертежей по разрезам и видам 3D-модели;
- получение фотореалистичных изображений;
- анализ кривизны поверхностей;
- задание материалов, установка источников света, наложение текстур, установка «камер».

Многообразие различных функций и возможностей для получения нужного результата позволяет выбрать для работы именно то программное обеспечение, которое поможет сделать проектирование и печать на 3D-принтере быстрой, удобной и эффективной.

Достоинства:

- возможность параметрического черчения. Программа автоматически меняет всю фигуру, сохраняя ее первоначальную форму, при изменении переменной. Например, если начертить гайку, а потом поменять диаметр, гайка автоматически перестраивается;
- продуманная связь чертежа с базой данных. Можно задать, например, модуль и степень точности детали, и программа автоматически получит на чертеж допуски формы и шероховатости;
- готовые библиотеки элементов. В них входят стандартные и нестандартные элементы, большой перечень элементов, соответствующих ГОСТ, специализированные базы элементов конкретных производителей. Большинство библиотек предоставляется бесплатно;
- автоматизация среды создания конструкторских документов. Можно выбрать для оформления любой российский или международный стандарт – от чертежей и спецификаций до технических инструкций.

Недостатки:

- неудобство 3D-моделирования. Некоторые пользователи отмечают, что программа не всегда удобна для создания сложных моделей, например, при изменении одного фрагмента пересчитывается вся сборка;

- невозможность конвертации в другие форматы (Автокад, Компас и пр.) в базовой комплектации. Работа с файлами только по повышающей версии программы;
- высокая сложность создания художественных моделей;
- проблемы с производительностью. Например, при сложных сборках с использованием массивов система может зависать.

FreeCAD – параметрический трехмерный редактор, позволяющий создавать объемные модели и чертежи их проекций (рис. 2.2). Пригодится всем, кто хочет ознакомиться с трехмерным моделированием и анимацией, прежде чем перейти к более сложным программам. Это относительно простая система для трехмерного проектирования, оснащенная средствами моделирования движения. Помимо задач проектирования, программа пригодится для освоения геометрии, кинематики, динамики, принципов построения механизмов и моделирования физических процессов.

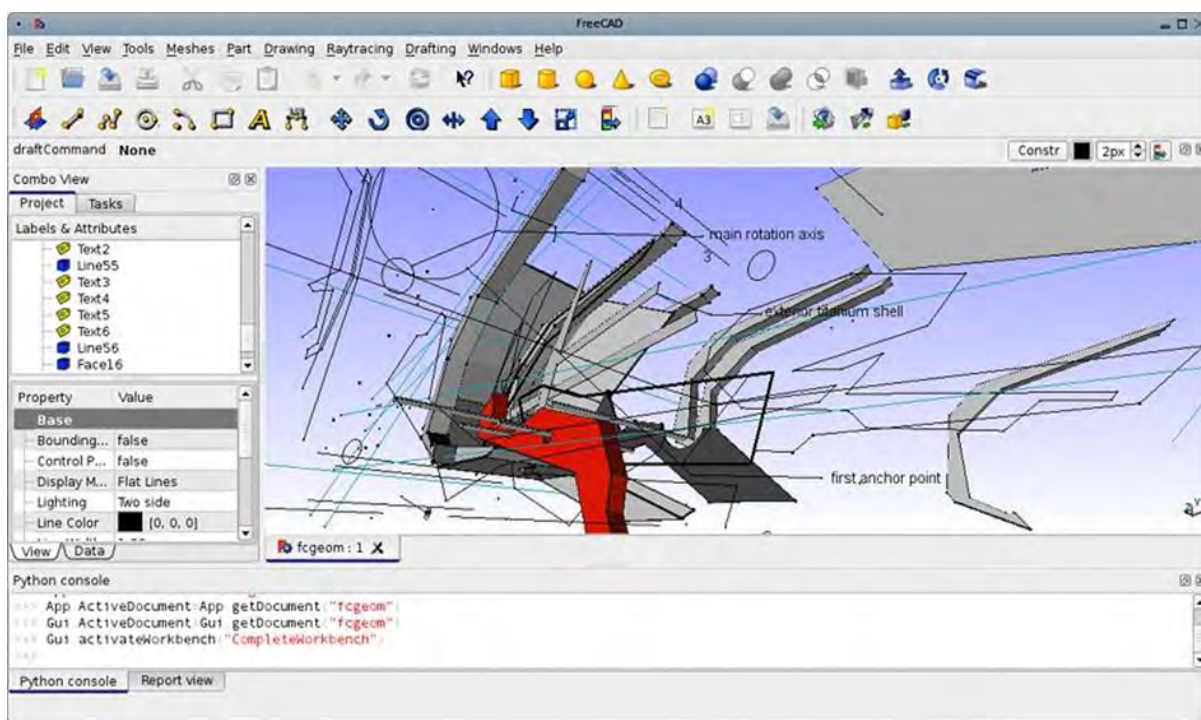


Рис. 2.2. Интерфейс программы FreeCAD¹⁴

Распространяется FreeCAD бесплатно. Существуют версии программы для различных операционных систем.

¹⁴ Изображение взято с сайта: wiki.freecad.org. URL: <https://clck.ru/aNphb> (дата обращения: 22.03.2026).

Достоинства:

- импортирует различные форматы CAD. FreeCAD легко импортирует различные CAD файлы;
- преобразует сетки в твердые тела. Может изменять форматы сеток в твердые формы;
- исправляет ошибки геометрии. Пользователи могут исправлять ошибки в CAD-дизайнах;
- широкий спектр функций. Поддерживает 2D- и 3D-эскизы, импорт/экспорт различных форматов и генерацию сеток.

Недостатки:

- нет облачных функций. Нет поддержки облака для легкого доступа;
- отсутствие базовых инструментов анализа. Нет базовых инструментов для анализа.

Кроме классических программ, многие дизайнеры пользуются онлайн-редакторами. Если у вас есть 3D-принтер, программа для моделирования может быть использована и в интерактивном режиме:

- *3DTin* – удобный и стильный трехмерный редактор, который поддерживает русский язык;
- *123D Design* – функциональный трехмерный редактор;
- *Tinkercad* – функциональный трехмерный редактор, созданный для обучения и работы с учебными проектами для 3D-принтеров и Arduino.

2.2. Программы для вывода на печать созданных 3D-моделей

Программное обеспечение печати готовых 3D-моделей состоит из трех частей (рис. 2.3):

- интерфейс;
- слайсер;
- прошивка контроллера.

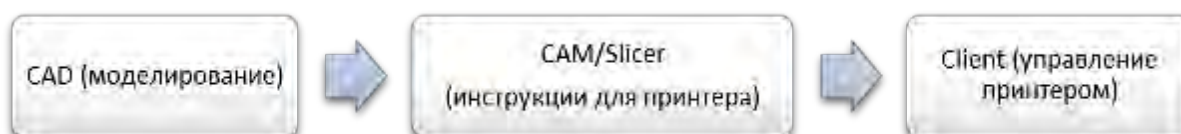


Рис. 2.3. Программное обеспечение 3D-печати

Интерфейс пользователя. Это та программа, которая отправляет на 3D-принтер код, согласно которому и происходит распечатывание модели. В этой программе мы можем выставить температуры нагрева рабочего стола и экструдера, подать или вытащить пластик, переместить печатающую головку и стол в ручном режиме, настроить протокол обмена, соединиться с принтером и отправить модель на печать. Существует два широко известных интерфейса для 3D-принтеров:

- Repetier Host;
- Printron Pronterface.

Первая программа развивается европейской компанией, вторая – энтузиастом-одиночкой и некоммерческой группой программистов в системе GitHub. Обе программы находятся в свободном, некоммерческом доступе.

Интерфейс отправляет на 3D-принтер так называемый G-код – программный язык, разработанный для станков ЧПУ. Как получается, что мы загружаем трехмерную STL-модель, а на принтер отправляется G-код? Кто преобразует модель в G-код? Этим занимается программа-слайсер.

Чтобы приступить к печати объекта, 3D-принтеру необходимо получить входящий сигнал в виде так называемого G-кода – программного языка, разработанного специально для станков ЧПУ. Таким образом, для начала печати информация о 3D-модели из формата STL должна быть перекодирована с помощью G-кода. Этим занимается программа-слайсер.

Слайсер – от английского *slice* – кусочек, ломтик, срез. Слайсер «разрезает» 3D-модель по слоям и задает перемещения экструдерной головки, а также порядка 100 параметров, которые характеризуют толщину и температуру слоя, механические и электронные характеристики конкретного 3D-принтера, наличие или отсутствие поддержек и т. д. Каждая из этих характеристик критически влияет на качество печати. Наиболее распространенные виды слайсеров представлены в табл. 2.4.

Внешний вид графического интерфейса разных слайсеров очень похож друг на друга и представлен на рис. 2.4–2.7. Отдельно стоит выделить слайсер CHITUBOX (рис. 2.8). Он представляет линейку программного обеспечения, предназначенного для работы с фотополимерными принтерами. Может готовить модель к печати для 3D-принтеров разных производителей. В целом для фотополимерных принтеров разработано очень много слайсеров. Каждый производитель старается предоставлять свое программное обеспечение вместе с оборудованием.

Таблица 2.4

Основные виды слайсеров

Программа	Производитель	Год создания	Лицензия	Особенности
Skeinforge	Enrique Perez	2009	Free	Данная программа предоставляет отличные возможности настройки за счет большого количества функций, однако по этой же причине интерфейс может показаться несколько запутанным
Slic3r	Alessandro Ranelucc	2011	Free	Является одной из самых популярных slicing программ, сменив на этом месте Skeinforge. Имеет открытый код, поддерживает различные операционные системы, быстрая и простая в использовании
Cura	David Braam/ Ultimaker	2012	Free	Встроенный CAM/client для 3D-принтеров Ultimaker и некоторых других. Одна из наиболее быстрых slicer программ на сегодняшний день. Осуществляет «нарезку» слоев в фоне и автоматически корректирует результат в случае внесения каких-либо изменений. Экспортирует файлы формата G-code
KISSlicer	Jonathan Dummer	2012	\$0(42)	Pro версия поддерживает печать несколькими экструдерами и другие продвинутые возможности
MakerWare	MakerBot	2013	0	Встроенный CAM/client для 3D-принтеров Replicator. Экспортирует файлы формата G-code
Orca Slicer	SoftFever	2022	0	Бесплатная программа-слайсер для 3D-печати с открытым исходным кодом. Основана на Bambu Studio, но имеет расширенные функции

Окончание табл. 2.4

Программа	Производитель	Год создания	Лицензия	Особенности
Bambu Studio	Bambu Lab	2020	0	Слайсер, разработанный компанией Bambu Lab для поддержки ее собственных 3D-принтеров, но также совместим со многими другими принтерами разных производителей
PrusaSlicer	Prusa Research	2019	0	Бесплатное программное обеспечение для нарезки с открытым исходным кодом, разработанное на базе Slic3r
Creality Print	Shenzhen Creality 3D Technology	2022	0	Бесплатное программное обеспечение для нарезки моделей, созданное для 3D-принтеров Creality

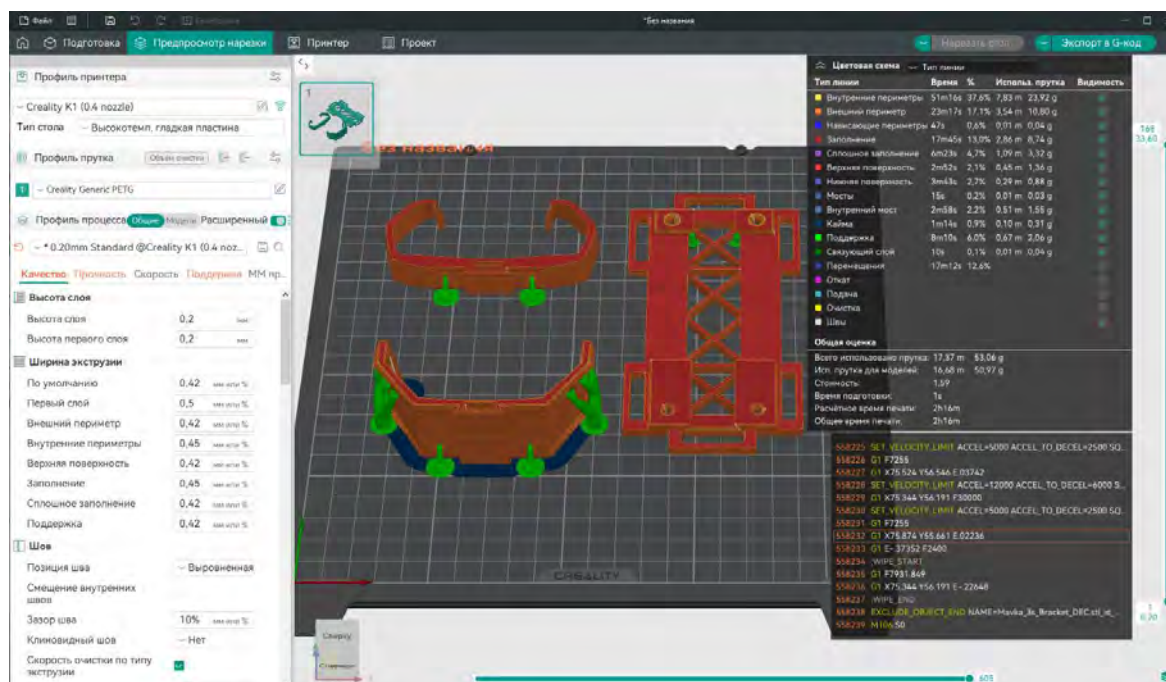


Рис. 2.4. Интерфейс слайсера OrcaSlicer

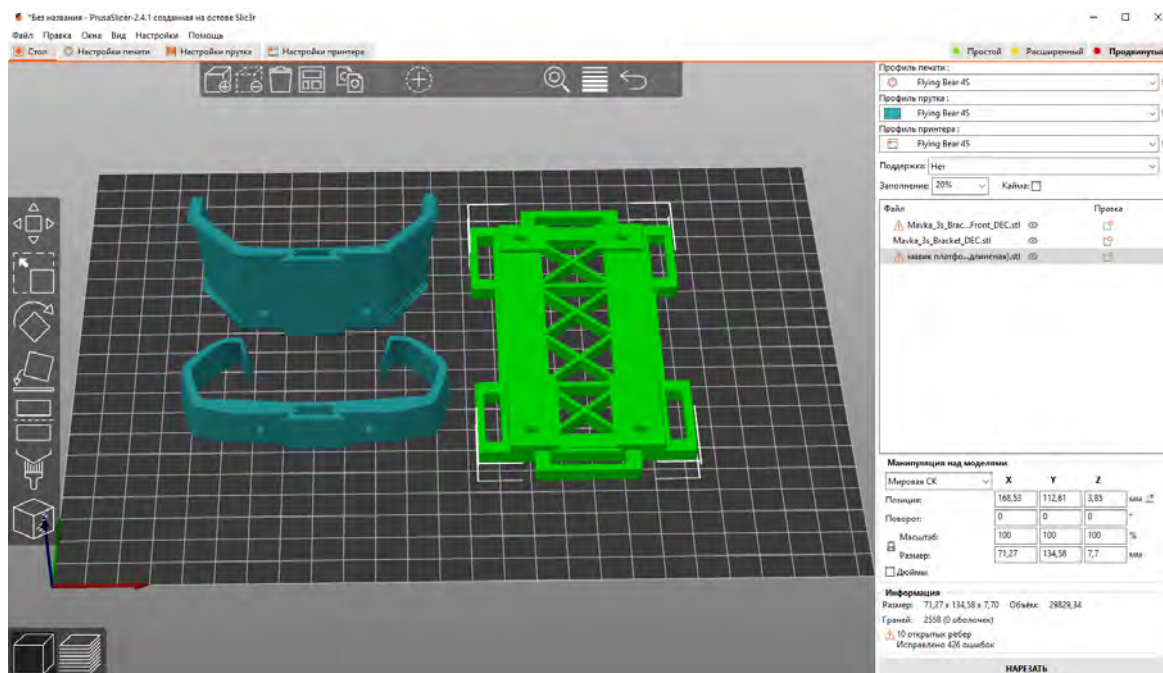


Рис. 2.5. Интерфейс слайсера PrusaSlicer

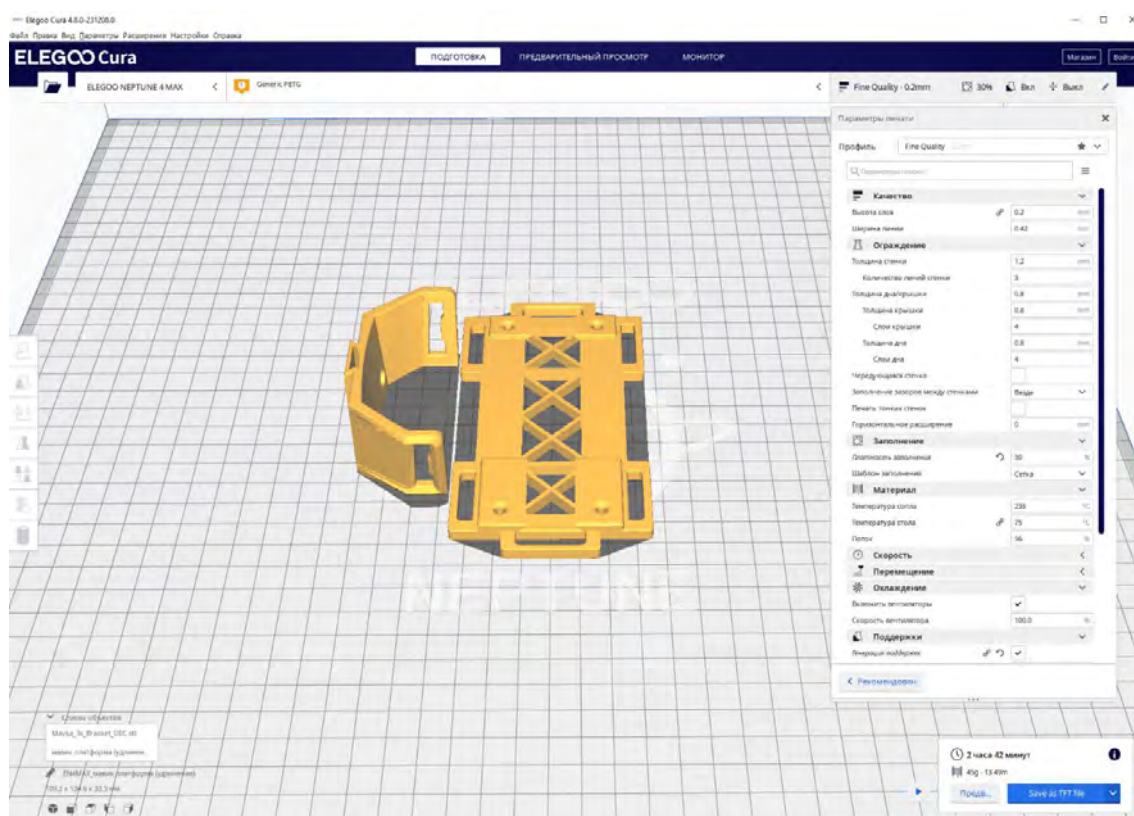


Рис. 2.6. Интерфейс слайсера Cura

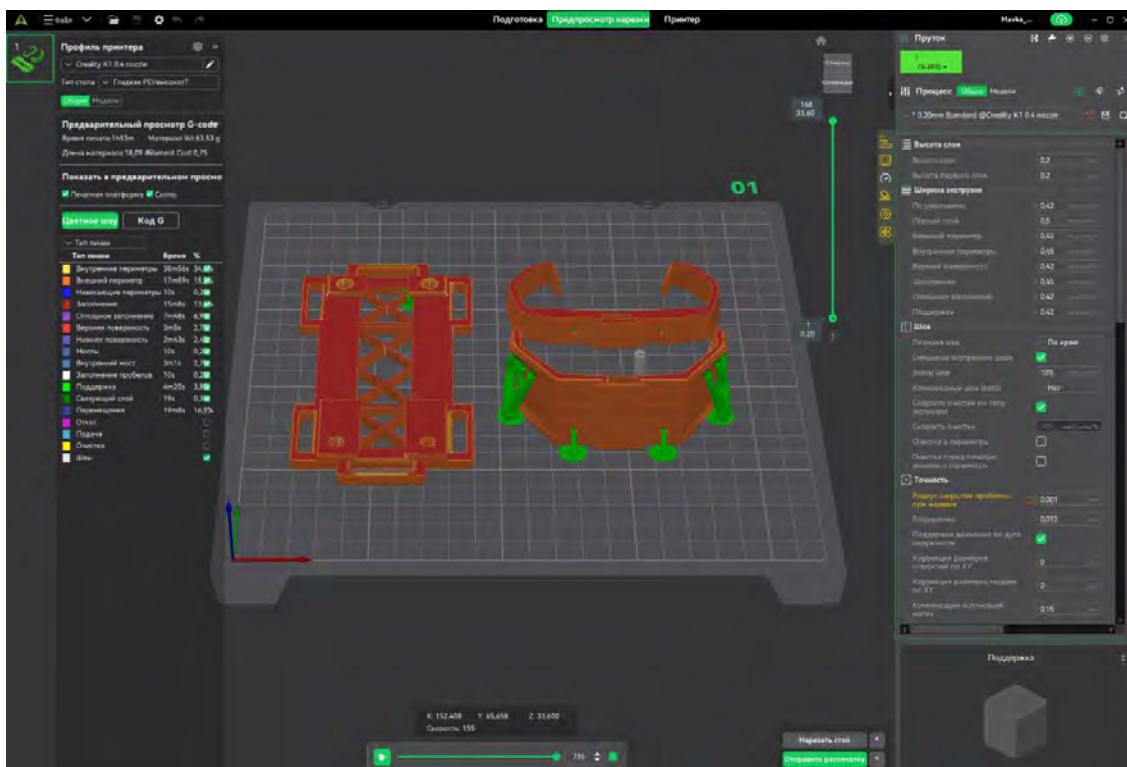


Рис. 2.7. Интерфейс слайсера Crealty Print

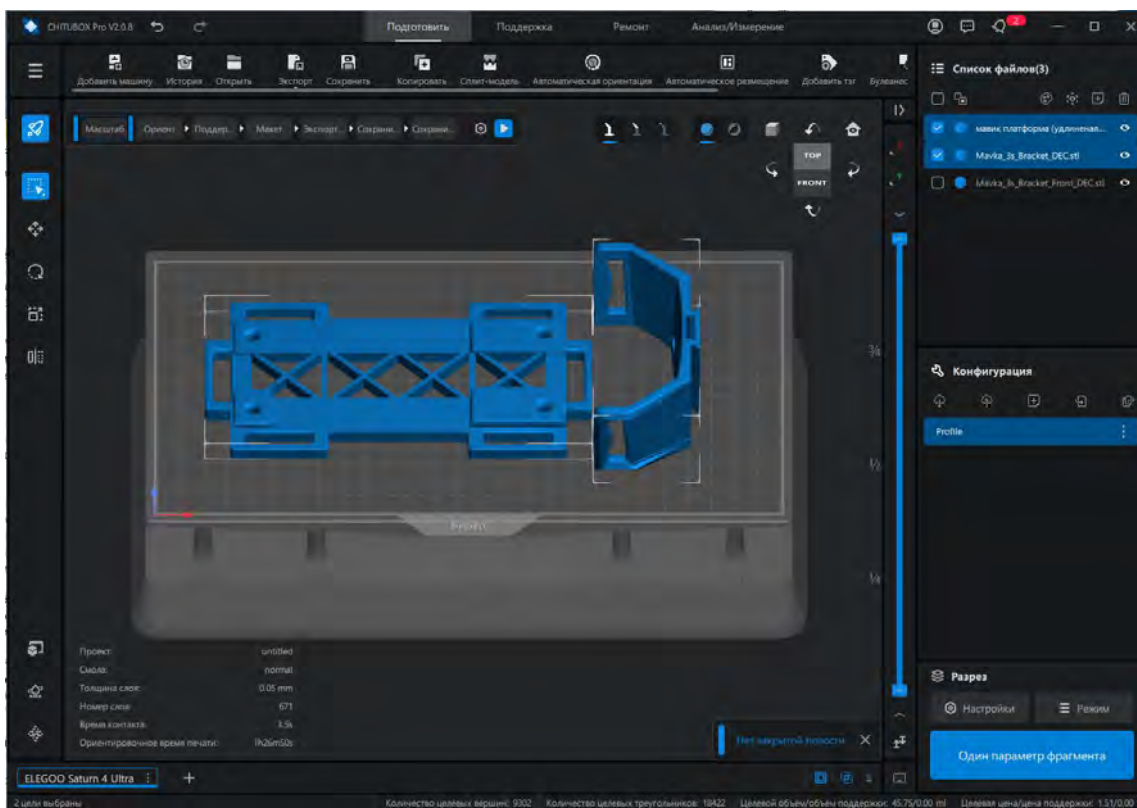


Рис. 2.8. Интерфейс слайсера CHITUBOX Pro

При 3D-печати мы имеем дело со сложными термодинамическими процессами. Если не учитывать все детали, созданная модель будет коробиться, слои будут наезжать друг на друга, части модели будут провисать, геометрические формы нарушаться, а после многочасовой печати модель просто отлипнет от рабочего стола на последних минутах работы, отправив в утиль ваше время, возможно, и надежду когда-либо отладить процесс. Это гораздо сложнее печати на бумаге краской.

Программы уровня CAD и CAM В служат для создания трехмерных цифровых моделей и их перевода в физические инструкции для принтера; в то время как программа типа “*client*” (табл. 2.5) осуществляет управление аппаратным оборудованием принтера.

Программа “*Client*” – это в основном своего рода панель управления принтером. Она посылает в принтер САМ инструкции и предоставляет интерфейс для управления функциями принтера. В настоящее время наметилась тенденция объединения САМ и client-программ в единый интерфейс управления принтером.

Таблица 2.5

Некоторые виды программ типа “*Client*”

Программа	Производитель	Год создания	Лицензия	Особенности
Replicator G	MakerBot	2008	Free	Изначальный client принтеров Replicator, впоследствии замененный MakerWare
Printerface	Kliment Yanev	2011	Free	Наиболее известная из 3 утилит популярного набора Printron. Требуется Python. Несколько запутанная установка
Repetier-Host	Hot world Media Gmbh	2011	Free	Одна из самых популярных client-программ с открытым кодом. Предлагает продвинутый графический интерфейс с возможностью вращать модели, а также визуализатор траекторий движения, печатающий головки, позволяющий посмотреть, как именно будет двигаться экструдер, печатая модель. Требуется Python. Доступен авто-установщик

Окончание табл. 2.5

Программа	Производитель	Год создания	Лицензия	Особенности
Octoprint	Gina Haussge	2011	Free	Браузерный интерфейс, предлагающий управление, мониторинг и G-code визуализацию «из любого места»
UP/Afinia 3D	PP3DP	2012	Free	Встроенный CAM/client программа для UP принтеров. Не экспортирует файлы

Прошивка контроллера – часть программного обеспечения, которая «отвечает» за распознавание G-кода и отдачу команд непосредственно электромеханическим устройствам – двигателям, вентиляторам, нагревателям. Должно быть четко настроено на характеристики конкретного 3D-принтера – передаточные числа шестерен, диаметры валов, размеры площадок и т. д. Это основная задача прошивки. Дополнительные функции, такие как вывод информации о процессе печати, печать с SD карты памяти, управление принтером через интерфейсы – это все дополнительные функции, и в разных прошивках набор этих дополнительных модулей разнообразен.

Некоторые популярные прошивки для 3D-принтеров:

– **Marlin**. Популярная прошивка, совместимая с 8- и 32-битными платами. Предоставляет пользователю широкий диапазон настроек, например, для контроллера интерфейса дисплея предусмотрен выбор из 30 языков;

– **Repetier-Firmware**. Прошивка от команды, создавшей популярный слайсер Repetier-Host. Совместима с 8-битными платами и с 32-битными платами с контроллерами AVR (Arduino Due и RADDs). Есть поддержка онлайн-редактирования файла конфигурации;

– **RepRap Firmware**. Прошивка, разработанная для 32-битных микросхем на базе контроллеров AVR;

– **Smoothieware**. Работает только на ограниченном количестве плат, основными из которых являются Smoothieboard и Azteeg X5 Mini;

– **Klipper** – это прошивка с открытым исходным кодом для 3D-принтеров. Она распределяет рабочую нагрузку между компьютером общего назначения (например, Raspberry Pi) и одним или несколькими базовыми микроконтроллерами 3D-принтера.

В совокупности эти три части программного обеспечения для 3D-принтера дают сотни нетривиальных комбинаций, и разобраться человеку, которому просто надо распечатать модель, достаточно

сложно. Обычно на налаживание процесса 3D-печати уходит не одна неделя, и это в том случае, если вы покупаете принтер с адаптированным программным обеспечением. Если же производитель не взял на себя труд адаптировать программы для своего 3D-принтера и рекомендует пользоваться обычными, некоммерческими программами – freeware, то необходимо понимать, что этот труд вы возьмете на себя. Более того, даже если производитель предоставляет адаптированную программу – интерфейс, то это совершенно не означает, что вам не придется заниматься настройками слайсера.

Выбор программного обеспечения и прошивки принтера зависит только от пользователя, при желании можно сменить уже установленную прошивку на принтере или настроить слайсер под свое оборудование. Мнений, какой слайсер или прошивка лучше, очень много. Выбор стоит осуществлять после изучения и работы с теми программами, которые рекомендуются производителями 3D-принтеров.

При работе с 3D-принтером используют:

- язык STL (для описания поверхности заданной модели используются треугольники);
- язык X3D (отсчет идет от заранее заданного профиля, построен на XML-стандарте),
- стандарт VRML (работает с треугольниками, в которых нет общих точек).

2.3. Форматы файлов: эволюция от STL к 3MF и AMF

Ключевым элементом цифровой цепочки 3D-печати является формат файла, в котором сохраняется трехмерная модель. От правильного выбора формата зависит точность печати, поддержка нескольких материалов, цветов и текстур, а также совместимость с конкретным оборудованием.

Исторически самым распространенным форматом является **STL (STereoLithography)**, появившийся в 1987 г. вместе с первыми коммерческими установками SLA. STL описывает поверхность модели с помощью треугольной сетки, что обеспечивает простоту и универсальность. Однако этот формат не содержит информации о цвете, текстуре или материалах и не поддерживает метаданные о модели, что ограничивает его возможности в современных задачах.

Для решения этих ограничений были разработаны **AMF (Additive Manufacturing File)** и **3MF (3D Manufacturing Format)**. AMF представляет собой XML-базируемый формат, который поддерживает

многоматериальные объекты, цвета, текстуры и внутренние структуры, а также хранит информацию о масштабах и единицах измерения. Формат 3MF был разработан консорциумом Microsoft и ведущими производителями 3D-принтеров и программного обеспечения. Он сохраняет все преимущества AMF и дополнительно обеспечивает полную совместимость с современными САД-системами, поддерживает сжатие данных и интеграцию метаданных, облегчая передачу модели между различными приложениями и платформами.

Сегодня использование форматов AMF и 3MF становится стандартом для промышленных и профессиональных процессов 3D-печати, особенно там, где требуется высокая точность, многоцветность и работа с несколькими материалами. В то же время STL остается востребованным в образовательной сфере и для прототипирования, где критичны скорость и простота работы с файлами. Сравнение форматов 3D-печати приведено в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Сравнение форматов 3D-печати

Характеристика	STL	AMF	3MF
Дата появления	1987	2011	2015
Тип данных	Только геометрия (треугольники)	Геометрия, материалы, цвета, текстуры, структуры	Геометрия, материалы, цвета, текстуры, структуры, метаданные
Поддержка цвета	Нет	Да	Да
Поддержка нескольких материалов	Нет	Да	Да
Поддержка текстур и декора	Нет	Да	Да
Поддержка сложных структур (например, сетки, вложенные объекты)	Ограничена	Да	Да, с улучшенной совместимостью
Размер файла	Обычно меньше, но при сложной модели может быть больше из-за треугольников	Чаще меньше за счет оптимизации и поддержки более сложных структур	Обычно оптимизированный размер, поддержка сжатия

Окончание табл. 2.6

Характеристика	STL	AMF	3MF
Совместимость	Широко поддерживается всеми CAD и 3D-принтерами	Менее распространен, поддержка растет	Хорошая поддержка в современных CAD и 3D-принтерах
Преимущества	Простота, совместимость, проверенный временем	Расширенные возможности по цвету и материалам, точность	Комплексный формат с расширенной информацией, современная поддержка, оптимизация файлов
Недостатки	Нет поддержки цвета, материалов, текстур, ограничено сложная геометрия	Менее популярный, поддержка не во всех программах	Меньше распространен, но быстро растет поддержка

Таким образом, эволюция форматов файлов отражает развитие отрасли: от простого обмена треугольными сетками к полноценной передаче всех данных о сложных моделях, открывая возможности для высокоточного и многофункционального аддитивного производства.

2.4. G-код и его особенности для аддитивных установок

После подготовки 3D-модели и слайсинга необходимо преобразовать данные в формат, понятный принтеру. Для большинства аддитивных устройств таким языком команд является **G-код** – стандартный набор инструкций для числового управления станками (CNC). G-код описывает путь перемещения печатающей головки, скорость, температуру, подачу материала и другие параметры, необходимые для послойного построения объекта. В контексте 3D-печати G-код выполняет несколько ключевых функций:

- позиционирование экструдера и платформы – координаты X , Y и Z определяют точное расположение сопла или лазера для формирования каждого слоя;
- управление подачей материала – команды регулируют скорость экструзии, поток фотополимера или порошка;
- контроль температуры и охлаждения – поддержка оптимального состояния материала и предотвращение деформаций;

– включение и выключение вспомогательных функций – управление вентиляторами, ультрафиолетовыми лампами, лазерами или другими активными элементами установки.

Особенностью G-кода в 3D-печати является его послойная структура: каждая команда относится к конкретному слою, что позволяет принтеру точно воспроизводить сложные геометрические формы. При этом современные слайсеры автоматически оптимизируют траектории движения, минимизируют перемещения без подачи материала и рассчитывают параметры для многоэкструдерной печати или использования поддержек.

Несмотря на то, что G-код является низкоуровневым и технически сложным, его универсальность позволяет использовать один и тот же набор команд для различных устройств и технологий, от FDM и SLA до SLS и MJF. Некоторые современные принтеры поддерживают также высокоуровневые форматы управления, интегрированные с конкретным программным обеспечением, но G-код остается основой передачи инструкций на аппаратном уровне.

Использование G-кода обеспечивает точность, повторяемость и гибкость процесса, позволяя инженерам и разработчикам оптимизировать печать под конкретные задачи и материалы, а также интегрировать 3D-печать в промышленные производственные цепочки.

2.5. Программы для управления и мониторинга процессом 3D-печати в реальном времени

Программы для управления и мониторинга процессом 3D-печати в реальном времени – это специализированное программное обеспечение, предназначенное для контроля всех этапов процесса 3D-печати, от подготовки модели до окончательной печати изделия. Такие программы позволяют оператору отслеживать ключевые параметры принтера, включая температуру экструдера и стола, скорость подачи материала, положение печатающей головки и состояние охлаждения. Контроль этих параметров критически важен для поддержания высокого качества печати, предотвращения дефектов и оптимизации расхода материалов.

На рынке представлено множество программ для управления 3D-печатью, каждая из которых имеет свои особенности и функциональные возможности. Одной из наиболее популярных является **Ultimaker Cura** – бесплатное программное обеспечение с открытым исходным кодом. Оно поддерживает широкий спектр 3D-принтеров и позволяет

не только нарезать 3D-модель на слои (slicing), но и осуществлять мониторинг процесса печати через подключение к принтеру. Cura предоставляет визуализацию траектории печати, позволяет изменять параметры печати в реальном времени, а также интегрируется с облачными сервисами для дистанционного управления.

Еще одной известной программой является **PrusaSlicer**, разработанная компанией Prusa Research. Она ориентирована на 3D-принтеры Prusa, но также поддерживает многие другие модели. PrusaSlicer позволяет детально настраивать параметры печати, включая скорость, температуру, толщину слоя и поддержку сложных структур. Программа включает инструменты для анализа модели, предупреждения о потенциальных ошибках и мониторинга процесса печати через подключение к принтеру с помощью сети Wi-Fi или USB.

Для профессиональных и промышленных решений часто используют **OctoPrint** – веб-приложение с открытым исходным кодом, которое обеспечивает удаленный контроль и мониторинг 3D-печати. OctoPrint позволяет запускать и останавливать печать, управлять температурой, отслеживать прогресс через веб-интерфейс и подключенные камеры, а также расширять функционал с помощью многочисленных плагинов. Этот инструмент особенно полезен для печати сложных и длительных проектов, где важны постоянное наблюдение за процессом и возможность оперативного вмешательства.

Помимо этих популярных решений, существуют специализированные программы для промышленных принтеров, такие как *MakerBot Print* и *Raise3D IdeaMaker*. Они предоставляют расширенные возможности по управлению несколькими принтерами одновременно, автоматической настройке параметров для различных материалов, интеграции с CAD-программами и детальному мониторингу состояния каждого принтера.

На сегодняшний день все крупные производители принтеров выпускают программное обеспечение для своей продукции. Часто оно включает в себя и слайсер, и ПО для мониторинга и управления. Существует возможность и записывать таймлапсы.

Использование программ для мониторинга и управления процессом 3D-печати позволяет не только повысить качество изделий и уменьшить количество брака, но и оптимизировать рабочий процесс, экономить материалы и время. В образовательной и исследовательской среде такие инструменты также дают возможность анализировать

результаты печати, экспериментировать с новыми материалами и методиками, а также обучать студентов современным технологиям аддитивного производства.

Таким образом, современные программы управления и мониторинга 3D-печати – это не просто вспомогательные инструменты, а важная часть полного технологического процесса, обеспечивающая надежность, точность и эффективность аддитивного производства.

Часть II. ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ

Глава 3. Технологии печати полимерных материалов

Полимерные материалы занимают ведущие позиции в аддитивных технологиях благодаря их доступности, разнообразию свойств и простоте переработки. На их основе реализуется наибольшее количество технологий 3D-печати, каждая из которых обладает своими особенностями, преимуществами и ограничениями.

В данной главе рассматриваются основные методы печати полимеров, включая экструзионные, фотополимеризационные и технологии послойного наплавления порошков. Для каждой технологии анализируются принципы работы, используемые материалы, область применения и характерные достоинства и недостатки.

Знание особенностей технологий печати полимеров позволяет осознанно выбирать оптимальный метод для решения конкретной задачи – от быстрого прототипирования до производства функциональных изделий с заданными эксплуатационными свойствами.

3.1. Послойное наплавление

Моделирование методом *послойного наплавления (FDM/FFF)* или *экструзии* было разработано С. Скоттом Трампом в конце 1980-х гг. и получило коммерческое распространение в 1990 г. силами компании Stratasys, в числе основателей которой числится сам Трамп. В связи с истечением срока действия патента существует большое сообщество разработчиков 3D-принтеров с открытым исходным кодом, а также коммерческих организаций, использующих данную технологию. Как следствие, стоимость устройств уменьшилась на два порядка со времени изобретения технологии.

Процесс печати методом послойного наплавления подразумевает создание слоев за счет экструзии быстро застывающего материала в виде микрокапель или тонких струй. Экструдер нагревает материал до температуры плавления с последующим выдавливанием расплавленной массы через сопло. Сам экструдер приводится в движение пошаговыми двигателями или сервомоторами, обеспечивающими позиционирование печатной головки в трех плоскостях. Перемещение экструдера контролируется производственным программным обеспечением (CAM), привязанным к микроконтроллеру.

Общая схема устройства 3D-принтера экструзивного типа представлена на рис. 3.1.

Производственный цикл начинается с обработки трехмерной цифровой модели. Модель в формате STL делится на слои и ориентируется наиболее подходящим образом для печати. При необходимости генерируются поддерживающие структуры, необходимые для печати нависающих элементов. Некоторые устройства позволяют использовать разные материалы во время одного производственного цикла. Например, возможна печать модели из одного материала с печатью опор из другого, легкорастворимого материала, что позволяет с легкостью удалять поддерживающие структуры после завершения процесса печати. Альтернативно возможна печать разными цветами одного и того же вида пластика при создании единой модели. Изделие производится выдавливанием (*экструзией*) и нанесением микрокапель расплавленного термопластичного полимера с формированием последовательных слоев, застывающих сразу после экструдирования.

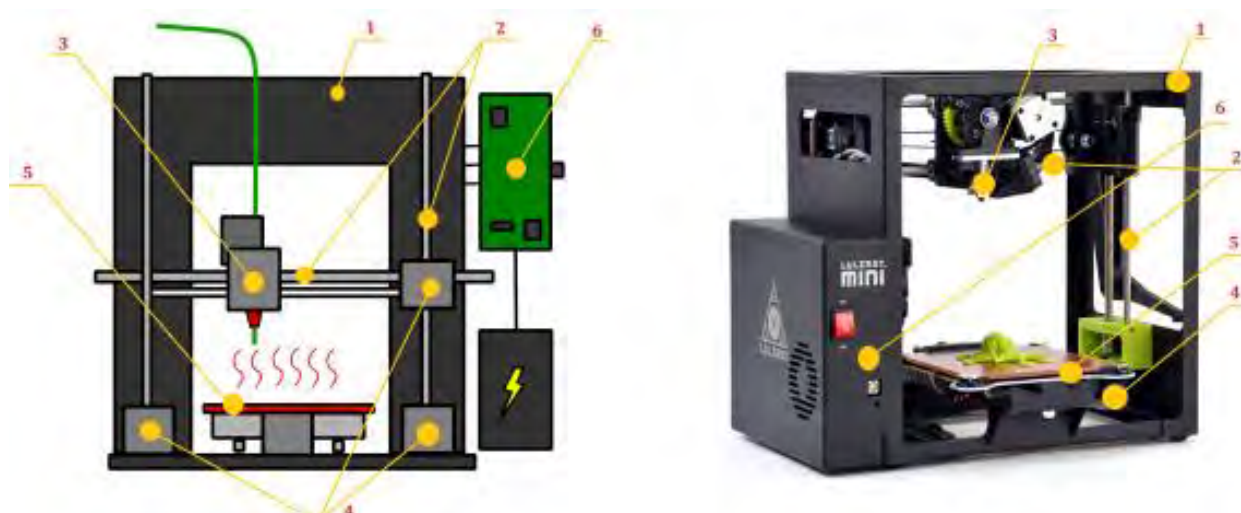


Рис. 3.1. Схема устройства 3D-принтера экструзивного типа:

1 — корпус; 2 — закрепленные на нем направляющие; 3 — печатающая головка;
4 — шаговые двигатели; 5 — рабочий стол; 6 — управляющая электроника

Пластиковая нить разматывается с катушки и подается в экструдер — устройство, оснащенное механическим приводом для подачи нити, нагревательным элементом для ее плавки и соплом, через которое осуществляется экструзия. Нагреватель плавит пластик в сопле, подавая расплавленный материал на строящуюся модель. Верхняя часть сопла обычно охлаждается вентилятором, создавая резкий температурный градиент, необходимый для стабильной подачи материала.

Экструдер перемещается в горизонтальной и вертикальной плоскостях по траектории, заданной системой автоматизированного проектирования (САПР), под управлением алгоритмов, аналогичных ЧПУ. Модель строится слой за слоем, снизу вверх. Движение печатной головки обеспечивают шаговые моторы или сервоприводы. Наиболее распространенная система координат в FDM – декартова с осями X , Y и Z . В некоторых принтерах применяются цилиндрические системы координат, используемые у так называемых «дельта-роботов».

Метод послойного наплавления является самым популярным и коммерчески доступным способом 3D-печати, обладающим широкой линейкой расходных материалов. В качестве филаментов используют различные полимеры: акрилонитрилбутадиенстирол (АБС), поликарбонат (ПК), полилактид (ПЛА), полиэтилен высокого давления (ПЭВД), смеси поликарбоната и АБС, полифениленсульфон и другие. Полимер обычно поставляется в виде чистой пластиковой нити. Краткая характеристика материалов для экструзионной печати представлена в параграфе 6.1 [18].

В сообществе энтузиастов 3D-печати реализуются проекты по переработке использованного пластика в новые филаменты. Для этого применяются шредеры и устройства для переплавки пластика.

Метод послойного наплавления имеет ограничения по сложности создаваемых геометрических форм. Например, навесные конструкции, такие как сталактиты, невозможно напечатать без поддержки. Для их реализации используют временные опоры, которые удаляются после завершения печати. Главным преимуществом технологии остается доступность: собрать домашний экструзионный 3D-принтер можно за 30...40 тыс. руб.

3.2. Стереолитография

Стереолитография (SLA) – технология аддитивного производства изделий из жидких фотополимерных смол. Термин «стереолитография» был придуман в 1986 г. Чарльзом В. Халлом, запатентовавшим метод и аппарат для производства твердых физических объектов за счет последовательного наслоения фотополимерного материала. Патент Халла описывал применение ультрафиолетового лазера, проецируемого на поверхность емкости, заполненной жидким фотополимером. Облучение лазером ведет к затвердеванию материала в точках соприкосновения с лучом, что позволяет вычерчивать контуры заданной модели слой за слоем (рис. 3.2).

В 1986 г. Халл основал собственную компанию, 3D Systems, для коммерческого продвижения новой технологии. На сегодняшний день 3D Systems является одним из мировых лидеров среди компаний-разработчиков и поставщиков технологий аддитивного производства, а технология стереолитографии является первой запатентованной и получившей коммерческое распространение трехмерной печати.

Выделяют два основных вида фотополимеризации: радикальную и ионную.

Радикальная полимеризация – это процесс образования полимера, когда стадии инициирования и роста цепи протекают с участием радикалов. Поскольку одним из основных способов получения свободных радикалов является фотоинициированная диссоциация, то соответственно фотоинициированная полимеризация мономеров и олигомеров, или просто фотополимеризация, является одной из основных разновидностей радикальной полимеризации как в производственных технологиях, так и при проведении научных экспериментов.

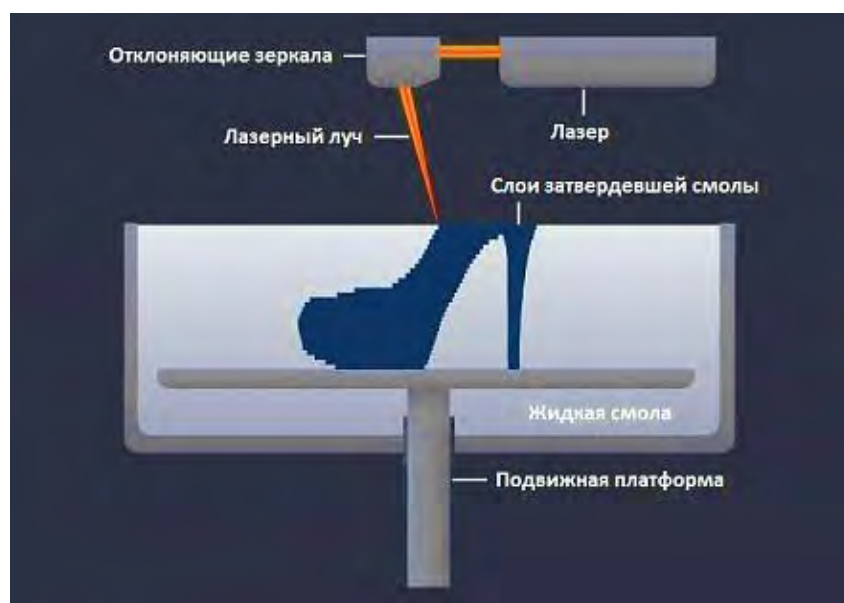


Рис. 3.2. Схема работы принтера по методу стереолитографии

Метод основан на эффекте фотополимеризации (рис. 3.3). Кинетическая схема процесса фотоинициированной радикальной полимеризации выглядит следующим образом. Сначала происходит процесс поглощения света молекулой фотоинициатора. Поглотившая свет молекула переходит в возбужденное состояние и далее происходит процесс разрыва химической связи. Разрушается, как правило, самая слабая (либо одна из самых слабых) связей в молекуле. Соединения,

используемые как фотоинициаторы, диссоциируют на два радикала или за счет внутримолекулярной перегруппировки образуется бирадикал – молекула, имеющая в разных частях две свободных валентности. В ряде случаев вместо фотоинициатора используются специальные добавки, фотосенсибилизаторы, которые поглощают свет в данной области спектра. Возбужденный сенсибилизатор либо передает поглощенную энергию инициатору, либо взаимодействует с ним, образуя пару свободных радикалов.

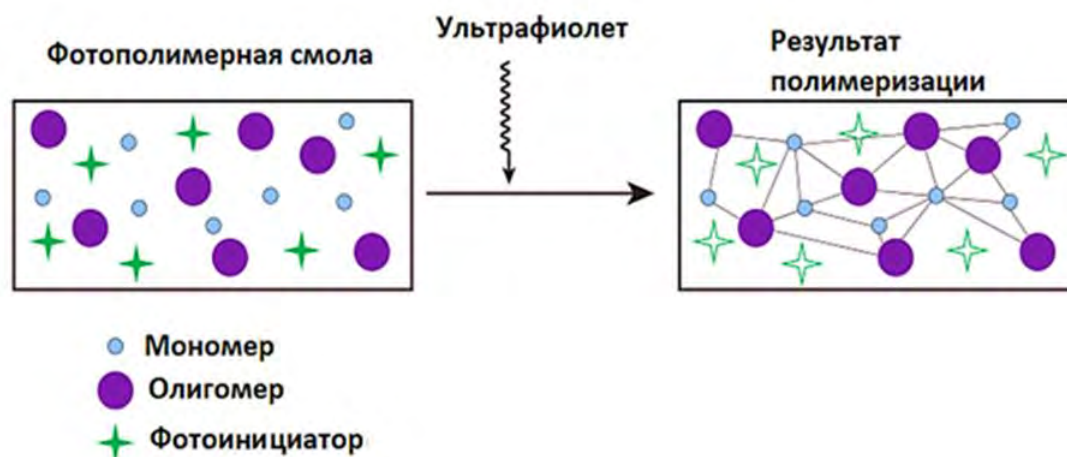


Рис. 3.3. Схема процесса фотополимеризации

Обрыв цепной радикальной реакции происходит либо в случае, когда радикал рекомбинирует с другим радикалом, либо когда радикал взаимодействует с ингибитором радикальной полимеризации. В последнем случае образуется радикал с очень низкой реакционной способностью. Классическим ингибитором является кислород, проникающий из атмосферы в реакционную смесь, если не проводить процедуру дегазации смеси перед началом процесса. Взаимодействуя с кислородом, активные радикалы создают стабильные и малоактивные перокси-радикалы. Также цепная радикальная реакция полимеризации прекращается, когда радикал оказывается изолированным в матрице полимерной сетки. Однако в этом случае возможна «миграция» свободной валентности по полимерной цепи за счет ряда внутримолекулярных перегруппировок. Но такой процесс протекает не быстро и, как правило, после завершения облучения.

В зависимости от типа иона выделяют анионную и катионную полимеризации. *Катионная полимеризация* является разновидностью ионной полимеризации, которая подразумевает, что цепная реакция инициируется взаимодействием иона с реакционноспособной группой в мономере или олигомере.

Более исследованными и более широко используемыми фотоинициаторами являются именно катионные инициаторы. Так как при фотодиссоциации известных ионных инициаторов образуется активный катион и малоактивный анион, то под ионной фотополимеризацией подразумевают, как правило, катионную фотоиницированную полимеризацию. Наиболее широкое применение в 3D-печати находит именно катионная фотополимеризация. По катионному механизму могут полимеризоваться виниловые и диеновые мономеры и олигомеры, акрилаты и их производные, соединения с гетероциклами. Полимеризация последних протекает с раскрытием цикла в процессе получения полимера.

Кинетическая схема процесса ионной полимеризации начинается с взаимодействия фотоинициатора с ультрафиолетовым излучением. Под действием поглощенного фотона инициатор образует ионную пару K^+ и A^- . Эта пара может сохраняться как соединение с ионной связью или диссоциировать на катион и анион. Обычно один из ионов проявляет более высокую реакционную способность и инициирует цепную полимеризацию. Катион взаимодействует с молекулой мономера или олигомера, вызывая рост полимерной цепи. Обрыв цепи встречается редко и чаще связан с передачей цепи на другой мономер с отщеплением атома водорода и образованием малоактивного катиона либо прекращением реакции, когда полимерная молекула теряет подвижность и катион оказывается изолированным в полимерной матрице. В случае соединений с гетероциклами катион может инициировать раскрытие циклов в молекуле мономера, что поддерживает цепную реакцию.

Методом стереолитографии модели строятся послойно. Каждый слой формируется лазером в соответствии с цифровой 3D-моделью, и облучение вызывает полимеризацию материала в точках соприкосновения с лучом. Процесс напоминает отверждение эпоксидной смолы: жидкая смола соединяется и застывает, превращаясь в твердый полимер. После построения контура рабочая платформа погружается в бак с жидкой смолой на толщину одного слоя, обычно 0,05...0,15 мм, и поверхность выравнивается для формирования следующего слоя. Цикл повторяется до завершения модели. По окончании печати изделия промываются для удаления остатков материала и при необходимости обрабатываются в ультрафиолетовой печи до полного затвердевания.

Для построения навесных элементов модели требуются поддерживающие структуры, аналогичные используемым в методе послойного

наплавления. Опоры проектируются в цифровой модели и выполняются из того же фотополимерного материала. Они являются временными и удаляются вручную после завершения печати. Главным преимуществом стереолитографии считается высокая точность: слои могут иметь толщину всего 15 микрон, что в несколько раз меньше толщины человеческого волоса. Такая точность делает метод востребованным для прототипирования стоматологических протезов и ювелирных изделий. Скорость печати зависит от размера и сложности модели, а также от количества лазерных головок. Настольные принтеры обычно имеют область построения 50...150 мм, тогда как промышленные установки способны создавать крупногабаритные модели размером в метры. Механические свойства готовых изделий зависят от типа фотополимера, существуют имитаторы твердых термопластов, резины и других материалов.

В стереолитографии используются композиционные полимерные смолы на основе многофункциональных акрилатов и метакрилатов, нередко с добавлением неорганических наполнителей для снижения усадки, а также смеси эпоксидных смол с катионными фотоинициаторами. Фотополимерные смолы обладают различными физическими характеристиками: одни имитируют АБС-пластик, другие – резину. Доступны различные цвета и уровни прозрачности. Некоторые смолы совместимы с разными принтерами, другие рассчитаны на конкретные системы. Работа с фотополимерами требует осторожности: длина волны света для отверждения варьируется, поэтому необходимо использовать защитные очки и перчатки. Промывание готовых моделей часто требует растворителей, которые могут быть опасны для здоровья.

Стереолитография позволяет создавать детали высокой сложности, но расходные материалы и оборудование достаточно дорогие: литр фотополимерной смолы стоит 80...120 долларов, а стоимость устройств колеблется от 10 000 до 500 000 долларов. Популярность технологии стимулирует выпуск более доступных моделей, таких как Form 1 от Formlabs и Pegasus Touch от FSL3D с ценой 2 400...3 500 долларов. В 2011 г. Венский Технологический Университет представил компактный SLA-принтер весом 1,5 кг и стоимостью около 1 200 евро. Скорость печати позволяет создавать большинство объектов за один день, хотя особо сложные модели могут печататься несколько дней. Стандартные аппараты работают с объектами до 50×50×60 см, однако существуют установки для крупных изделий.

3.3. Цифровая светодиодная проекция

Цифровая светодиодная проекция (DLP) – это метод аддитивного производства, близкий к стереолитографической 3D-печати. Технология использует цифровые светодиодные проекторы, что позволяет снижать стоимость оборудования. В отличие от лазерных систем, которые сканируют поверхность материала одной или несколькими лазерными головками, DLP-принтеры проецируют изображение целого слоя до затвердевания полимерной смолы. После этого наносится следующий слой, и процесс повторяется по слоям цифровой модели.

Преимущества того или иного метода сложно оценить однозначно. DLP – относительно новая технология, но уже демонстрирует результаты, сопоставимые по точности и производительности с лазерной стереолитографией, запатентованной Чарльзом Халлом в 1986 г., которая стала первым значительным шагом в развитии трехмерной печати. Основное преимущество DLP перед традиционной стереолитографией – более низкая стоимость проекторов по сравнению с лазерными излучателями.

С момента появления DLP-принтеры составляют прямую конкуренцию стереолитографическим устройствам. Они находят применение в стоматологии, ювелирной промышленности, промышленном дизайне и производстве сувениров.

Как и стандартные стереолитографические установки, DLP-принтеры обеспечивают высокую точность печати – минимальная толщина слоя может достигать 15 микрон. Для сравнения: у более доступных экструзионных принтеров она обычно составляет не менее 50 микрон. При этом разрешение обратно пропорционально скорости нанесения слоев: более высокая точность достигается ценой снижения скорости печати.

Фотополимерные смолы, используемые в DLP-печати, обладают широким диапазоном механических характеристик: доступны как твердые пластики, так и эластичные материалы. Печать чаще всего выполняется материалом одного цвета, но ограничений по палитре нет. Основной недостаток технологии, как и у стереолитографии, – высокая стоимость расходных материалов: литр фотополимера стоит порядка \$80...160, тогда как килограмм пластиковой нити для FDM-печати стоит около \$35. Пользователю приходится искать баланс между качеством и себестоимостью.

К достоинствам DLP-принтеров относятся высокая точность и скорость печати, а также относительно низкая стоимость оборудования. Технология цифрового проецирования активно используется в различных сферах и продолжает развиваться, раскрывая новые возможности 3D-печати.

Среди недостатков: высокая цена и потенциальная токсичность используемых материалов. Тем не менее преимущества метода, включая качество и детализацию печати, часто оправдывают эти ограничения.

3.4. Масочная стереолитография

Масочная стереолитография (SGC) – метод аддитивного производства, во многом схожий с технологией печати методом цифровой светодиодной проекции (DLP). Технология была разработана и внедрена на рынок израильской компанией Cubital Ltd в 1986 г. Компания Cubital закончила свое существование, но интеллектуальные права были сохранены компанией Objet Geometries Ltd, а в 2012 г. перешли к корпорации Stratsasys в результате слияния двух компаний. В связи с этим вариант технологии SGC, используемый на принтерах конкурирующей компании 3D Systems, известен под названием Film Transfer Imaging или FTI.

Технология основана на нанесении тонких слоев фотополимерной смолы с последующим облучением материала ультрафиолетовым светом. Облучение происходит по физическому фотошаблону или «маске» соответствующего контура. Облучение приводит к полимеризации (затвердеванию) материала, после чего лишний материал удаляется из рабочей зоны, а полости заполняются легкоплавким воском. При необходимости производится механическая обработка поверхности, после чего производственный цикл повторяется. После завершения построения модели воск выплавляется, оставляя готовую модель, не требующую дополнительного облучения в ультрафиолетовой печи для полной полимеризации.

В качестве расходных материалов используются фотополимерные смолы. Подбор подходящего материала может потребовать определенного внимания ввиду технологических особенностей производства – при необходимости механической обработки полимер должен обладать соответствующими характеристиками. Как правило, используются фотополимеры, напоминающие по прочности и вязкости АБС-пластик.

Основным преимуществом SGC является отсутствие необходимости в построении поддерживающих структур, как в случае с такими стереолитографическими методами, как SLA или DLP. В дополнение к высокому разрешению по горизонтали механическая обработка каждого наносимого слоя позволяет добиваться высокой точности по оси Z. Наконец технология отличается достаточно высокой производительностью за счет одновременного облучения целых слоев. Среди недостатков следует отметить достаточно высокую шумность и большое количество отходов, повышающее себестоимость печати. Сами же установки достаточно дороги ввиду сложности конструкции. В последнее время метод SGC почти не используется, а его вариация FTI стала практически неотличима от цифровой светодиодной печати (DLP) ввиду внедрения цифровых проекторов.

3.5. Ламинирование

Ламинирование (LOM) – технология быстрого прототипирования, разработанная компанией *Helisys Inc.* 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 (рис. 3.4): 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.).

После того, как печать завершена, объект снимается с платформы, и лишняя часть материала удаляется. Изделия, для печати которых использовалась бумага, после завершения процесса по структуре напоминают дерево и могут быть соответствующим образом (с помощью инструментов для столярных работ) обработаны. Зачастую их покрывают лаком для защиты от влаги.

Компания *Mcor Technologies* использует вариант технологии, получивший название «выборочное ламинирование» или SDL. Этот метод предусматривает нанесение клея только в местах, входящих в состав расчетной модели, что облегчает процесс удаления лишнего материала. В отличие от стандартной технологии на основе лазерной резки, выборочное ламинирование использует механическую резку с помощью лезвия из карбида вольфрама. Это позволяет несколько снизить стоимость устройств.

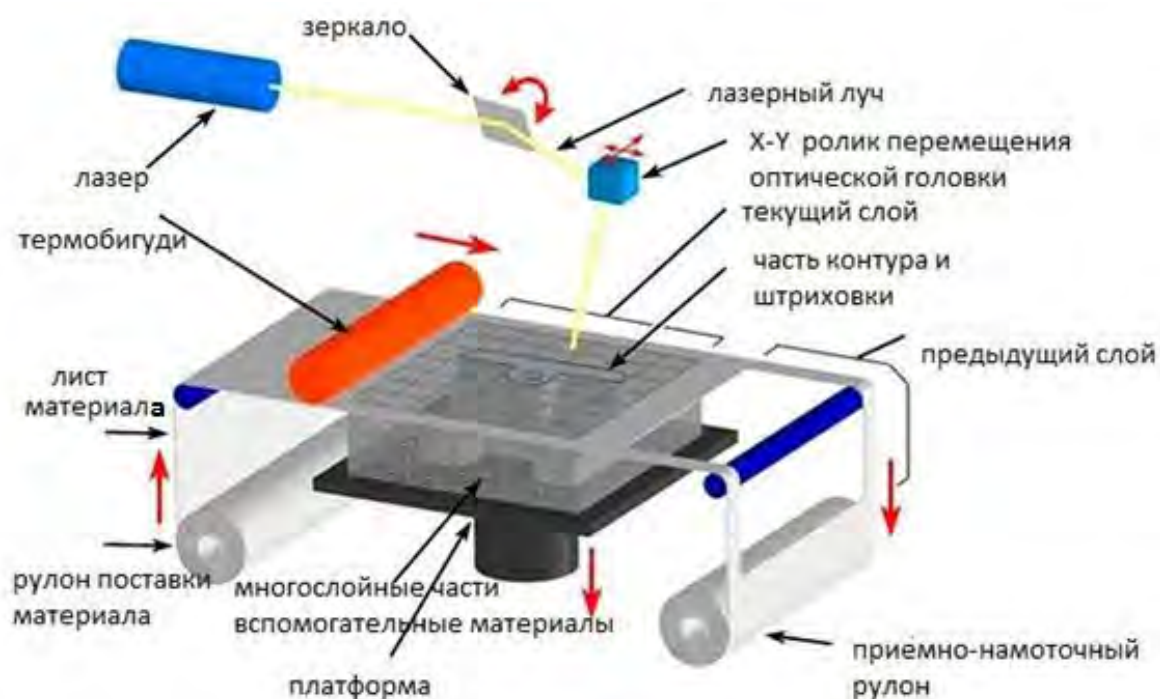


Рис. 3.4. Схема процесса ламинирования

Домашние 3D-принтеры, работающие по технологии ламинирования, – большая редкость. Существует принтер SD300 от *Cubic Technologies*, который можно использовать в домашних условиях, но его стоимость составляет порядка 15 тыс. долларов.

В качестве расходных материалов в трехмерной печати методом ламинирования применяются различные типы бумаги, картона, пластиков, текстильных материалов и фольги. Обязательным условием качественной печати является учет адгезионных свойств используемых расходных материалов.

По точности изготовления ламинирование уступает аналогам, однако имеет и некоторые достоинства. Например, материалы, используемые для печати, в процессе ламинирования являются достаточно недорогими, прочными, доступными, а их свойства – хорошо изучены.

С другой стороны, этот метод не подходит для создания объектов со сложной структурой, а также не позволяет создавать изделия, полые внутри. Из-за не слишком высокой точности его нельзя использовать для создания функциональных прототипов. Подходящие для печати с использованием ламинирования объекты – это, в первую очередь, масштабные модели и прототипы для оценки формы и внешнего вида изделия. Также с его помощью можно изготавливать образцы для использования в промышленности (отливке металла и т. д.).

Особенности метода: низкая себестоимость благодаря общедоступности расходных материалов. 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). Технология ламинирования допускает производство достаточно крупногабаритных моделей.

3.6. Ламинирование методом селективного осаждения

Ламинирование методом селективного осаждения (SDL), или 3D-печать на бумаге, было разработано докторами Конором и Финтаной Маккормак в 2003 г.

Не следует путать SDL с более старой технологией ламинированного изготовления объектов (LOM). В LOM использовались лазеры, ламинированная бумага и клей, при этом склеивались все слои, включая поддерживающие структуры вокруг модели. Извлечение готовой детали часто представляло сложную задачу и могло приводить к повреждению изделия. В технологии Mscor применяются лезвия для резки, а принтер склеивает лишь те участки, которые действительно должны стать частью модели.

Процесс начинается с ручного прикрепления первого листа к сборочной пластине. Точная позиция первого листа не критична, так как первые несколько страниц склеиваются вместе, формируя базовый слой перед началом нарезки (рис. 3.5).

После калибровки глубины лезвия и клеевого слоя принтер готов к приему данных из программы-слайсера. На верхнюю поверхность листа наносится клей – выборочно, именно поэтому метод получил название «селективное осаждение». Клей более высокой плотности применяется на участках, которые станут частью модели, а клеящий материал меньшей плотности – для областей, выполняющих функцию поддержки.



Рис. 3.5. Схема процесса ламинирования методом селективного осаждения

Новый лист бумаги подается в принтер из лотка для бумаги и направляется ровно на то место, куда было нанесено клеящее средство. Сборочная пластина перемещается вверх к раскаленной пластине, после чего к составным частям применяется давление. За счет этого давления достигается прочная связь между двумя листами бумаги.

Когда сборочная пластина возвращается на свое первоначальное положение, регулируемое лезвие из карбида вольфрама разрезает лист бумаги и в то же время следит за контуром объекта для создания формы будущей модели. После того как вся эта последовательность выполнена, устройство начинает наносить следующий слой клея. Весь процесс продолжается до момента, пока все листы не будут разрезаны и склеены между собой, а модель не примет свой окончательный вид. После того, как нанесение последнего слоя завершено, модель может быть извлечена из сборочной камеры.

Главное преимущество ламинирования методом селективного осаждения становится очевидным, когда вы избавляетесь от ненужных, поддерживающих модель частей. Этот процесс называется «извлечение». В связи с тем, что клеящее вещество наносится выборочно, между составными частями модели связь более прочная, чем между поддерживающими материалами. Кроме того, для облегчения процесса извлечения модели поддерживающий материал «разваливается» на маленькие составные части, похожие на игральные кости; это предотвращает разрушение хрупкой 3D-модели.

Принтеры *Mcor* отличаются своей неприхотливостью: для извлечения 3D-моделей из-под поддерживающей структуры погружать

детали в токсичные химические вещества или использовать острые инструменты вовсе не обязательно. При печати на принтере компании *Mscor* ваша модель не раскрошится и не разрушится. На выходе 3D-модель представляет собой прочную и жесткую структуру. Учитывая, что модель создается путем плотного сжатия листов бумаги, конечный продукт – это практически воссозданное дерево. Модель генерирует тепло, вызывает тактильные ощущения и приятна на ощупь.

Модель можно будет обработать любым желаемым способом для того, чтобы она отвечала всем необходимым требованиям.

3.7. Струйная трехмерная печать

Струйная трехмерная печать (3DP) – один из старейших методов аддитивного производства. Эта технология была разработана в Массачусетском технологическом институте (MIT) в 1993 г. Технология получила коммерческое распространение в 1995 г. с помощью компании *Z Corporation*, приобретенной корпорацией *3D Systems* в 2012 г.

Как и другие технологии аддитивного производства, струйная трехмерная печать подразумевает послойное построение физических объектов на основе цифровой трехмерной модели. В качестве расходных материалов используются различные порошки, гипс, пластики, металлические порошки, песчаные смеси, наносимые последовательными тонкими слоями. Контуры модели вычерчиваются печатной головкой, наносящей связующий материал. Таким образом, частицы каждого нового слоя склеиваются между собой и с предыдущими слоями до образования готовой трехмерной модели (рис. 3.6).

Оригинальные устройства использовали в качестве расходного материала гипс, что обуславливает обиходное название технологии – «гипсовая трехмерная печать». Печатные головки экструдировали воду, склеивающую материал. Со временем технология прогрессировала и теперь включает возможность добавки различных агентов: красителей, уплотнителей и пр.

Сегодня для 3D-печати используют не только гипс, но и разнообразные материалы: пластики, песчаные смеси и даже металлы. Технология позволяет создавать трехмерные модели практически из любого порошкового материала, а добавление красителей в связующее обеспечивает возможность цветной печати.

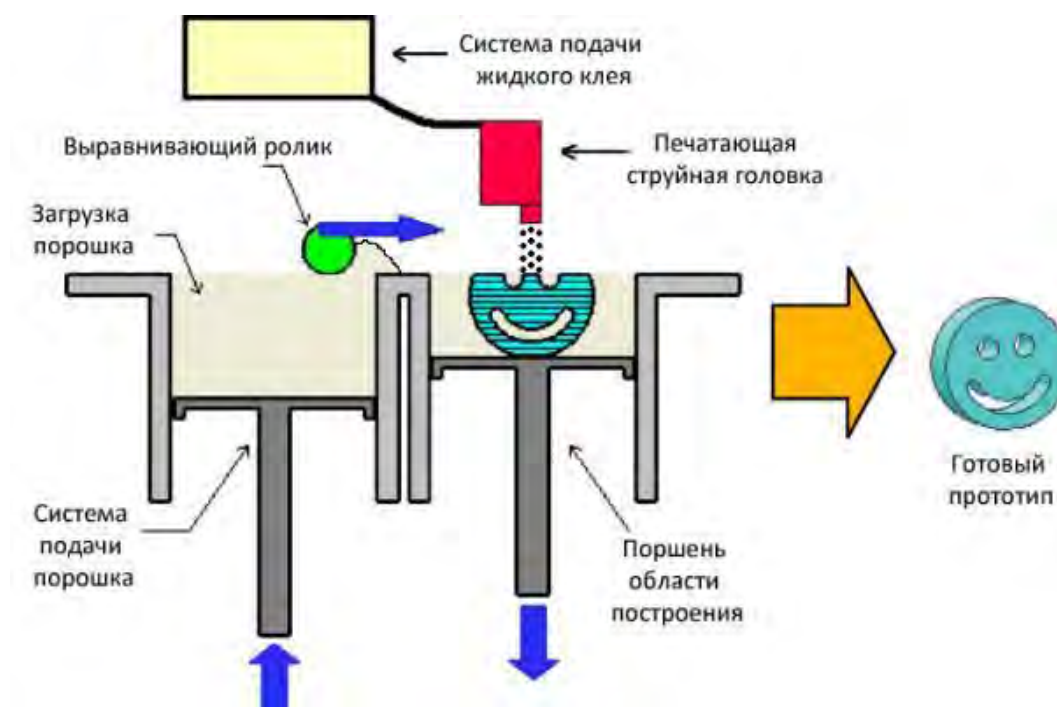


Рис. 3.6. Схема процесса струйной трехмерной печати

Практичность готовых моделей во многом зависит от последующей обработки. Например, изделия из металлического порошка внешне напоминают необработанные металлические детали, однако их прочность ограничена свойствами связующего материала. Для улучшения механических характеристик применяют обжиг в гончарных печах. Обычно он не сводится к спеканию, а подразумевает удаление исходного связующего с последующей пропиткой более твердой субстанцией. Например, можно выплавлять связующие пластики с одновременной пропиткой металлической модели медью или бронзой.

После такой обработки изделия становятся долговечными, однако их прочностные характеристики все еще недостаточны для функциональных прототипов деталей механизмов. Поэтому модели, созданные методом 3DP, чаще всего применяются как сувениры, украшения или макеты – везде, где требуется высокая геометрическая сложность, но не предполагаются значительные механические нагрузки.

Кроме широкой универсальности материалов, технология 3DP отличается отсутствием необходимости печати опорных структур. В популярных методах, таких как FDM или SLA, для стабилизации нависших элементов необходимы дополнительные «опоры». Без них возможны провисание слоев, деформация модели или даже невозможность печати. В 3DP каждый слой порошка служит естественной опорой для следующего, что устраняет необходимость дополнительных

поддержек. При этом технология экономична: остаточный порошок можно собрать и использовать в следующем производственном цикле.

Метод 3DP широко применяется в различных областях и часто используется под другими названиями. Так, в биопечати применяют вариант технологии, известный как капельная или струйная печать (DOD, Drop on Demand), при котором послойно наносятся живые клетки для создания органических тканей. Среди самых необычных применений 3DP – кондитерские принтеры Chef Jet, которые создают трехмерные съедобные модели из сахаросодержащих продуктов, склеивая частицы материала водой по принципу «гипсовой» печати.

3.8. Технология многоструйного моделирования

Технология многоструйного моделирования (MJM) – фирменный метод аддитивного производства, запатентованный компанией *3D Systems*. Технология используется в линейке профессиональных принтеров *ProJet*.

Технология многоструйного моделирования сочетает черты таких методов 3D-печати, как струйная трехмерная печать (3DP), моделирование методом послойного наплавления (FDM/FFF) и стереолитография (SLA). Построение слоев производится с помощью специальной печатной головки, оснащенной массивом сопел. Количество сопел в существующих моделях принтеров варьируется от 96 до 448.

Печать производится термопластичными полимерами, восками и фотополимерными смолами. В первых двух случаях материалы затвердевают за счет постепенного охлаждения. В случае печати фотополимерами каждый нанесенный слой обрабатывается ультрафиолетовым излучателем для полимеризации (затвердевания).

MJM позволяет создавать опоры нависающих элементов моделей из относительно легкоплавкого воска. В случае использования вспомогательных восковых структур по окончании печати готовая модель помещается в печь (встроенную или отдельную) и нагревается до температуры порядка 60 °C для выплавки воска.

Технология позволяет добиваться исключительно высоких показателей точности, сравнимых с лазерной стереолитографией (SLA) – минимальная толщина наносимого слоя может составлять 16 микрон, а разрешение печати в горизонтальной плоскости достигает 750×750×1600 DPI. Ранние модели MJM принтеров использовали обычные термопластичный полимеры. Развитие и совершенствование

фотополимерных материалов привело к постепенной замене термопластичных полимеров фотополимерными смолами и восками.

Принтеры ProJet используют ассортимент материалов марки VisiJet, включающий в себя воски и фотополимерные смолы с различными механическими свойствами. Так, VisiJet DentCast используется в качестве отливочного воска в стоматологии, VisiJet X служит в качестве альтернативы популярному АБС-пластику, VisiJet Crystal применяется для создания высокоточных литейных мастер-моделей и т. д.

Технология MJM используется в различных отраслях, требующих создания высокоточных прототипов и готовых изделий (рис. 3.7).



Рис. 3.7. Изделия, полученные с помощью технологии многоструйного моделирования¹⁵

Среди областей применения можно назвать стоматологию, ювелирное дело, промышленный и архитектурный дизайн, разработку электронных компонентов и пр.

3.9. Селективное лазерное спекание полимеров

Селективное лазерное спекание (SLS, Selective Laser Sintering) является одной из ключевых технологий аддитивного производства, широко применяемой для изготовления функциональных деталей из полимеров. В отличие от методов, основанных на экструзии или фотополимеризации, процесс *SLS* позволяет получать изделия с высокой

¹⁵ Изображение взято с сайта: maketer.ru. URL: <http://maketer.ru/stomaprint/> (дата обращения: 22.03.2026).

прочностью, стабильностью и эксплуатационными характеристиками, близкими к изделиям, изготовленным традиционными методами литья или механической обработки. Благодаря этому технология стала основным инструментом при производстве не только прототипов, но и полноценных функциональных деталей, используемых в промышленности.

Принцип работы селективного лазерного спекания заключается в послойном нанесении тонкого слоя полимерного порошка на рабочую платформу, после чего лазерный луч выборочно сканирует поверхность в соответствии с цифровой моделью. Под действием тепловой энергии частицы порошка частично спекаются, образуя твердую структуру. Несвязанный порошок остается сыпучим и играет роль поддерживающего материала, что позволяет изготавливать детали любой сложности без необходимости в дополнительных поддержках. После завершения печати изделие извлекается из порошковой ванны, очищается от излишков материала и при необходимости проходит дополнительную обработку.

Главным преимуществом технологии является высокая степень свободы проектирования, возможность создания сложных геометрий, внутренних каналов и решетчатых структур. Кроме того, SLS обеспечивает отличное соотношение прочности и массы, что делает ее востребованной в авиакосмической промышленности, медицине, автомобилестроении и производстве функциональных прототипов. Детали, изготовленные методом селективного лазерного спекания, обладают высокой термостойкостью, химической устойчивостью и долговечностью.

Исторически наиболее распространенным материалом для SLS был полиамид (нейлон, ПА-11 и ПА-12), обладающий хорошей прочностью, износостойкостью и технологичностью. Он и сегодня остается базовым выбором при изготовлении функциональных пластиковых деталей. Однако развитие технологий и запросы промышленности стимулировали появление новых полимеров с улучшенными характеристиками. Среди них особое место занимают полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) и полиэфиркетонкетон (ПЭКК). Эти высокотемпературные полимеры (рис. 3.8) относятся к классу суперконструкционных материалов и обладают уникальными свойствами: высокой механической прочностью, термостойкостью до 250...300 °С, устойчивостью к агрессивным химическим средам и биосовместимостью. Благодаря этому они находят применение в медицине, в частности для создания хирургических имплантатов и протезов, в авиакосмической отрасли для

формирования объектов, например, экструзию полимера или послойное спекание порошка, то современные системы все чаще применяют гибридные подходы, совмещающие несколько методов для достижения оптимального результата. Одной из таких инновационных технологий является P^3 (*Projection Powder Printing*), которая объединяет принципы порошковой печати и оптической проекции. Наряду с ней активно развиваются и другие гибридные методы, представляющие собой будущее аддитивного производства.

Технология *Projection Powder Printing* (P^3) была предложена как альтернатива традиционным методам порошковой печати, таким как селективное лазерное спекание (SLS) и струйное связывание порошков (*binder jetting*). В отличие от них, в P^3 используется цифровой проектор (DLP), который одновременно засвечивает целый слой порошка, скрепляя частицы специальным фотополимерным связующим. Процесс выглядит следующим образом: на рабочую платформу наносится тонкий слой порошка, чаще всего полимерного, керамического или композитного. Затем на поверхность проецируется изображение слоя, сформированное цифровым микрозеркальным устройством. Свет инициирует полимеризацию связующего, которое выборочно склеивает частицы порошка. Несвязанный порошок остается сыпучим и выполняет функцию поддержки. Процесс повторяется до полного построения объекта. После завершения печати изделие освобождается от лишнего порошка, а затем проходит постобработку термообжиг, инфльтрацию смолой или металлом, шлифование.

Главными преимуществами P^3 считаются высокая скорость формирования объектов, поскольку засвечивается сразу вся плоскость слоя, а не отдельные точки, а также высокая детализация, обусловленная использованием DLP-проекции. Кроме того, технология позволяет работать с широким спектром материалов, включая керамику и композиты, и снижает стоимость печати по сравнению с SLS, так как не требует применения мощного лазера. Ее недостатками являются необходимость постобработки, ограничение в выборе фотополимерных связующих и сложность калибровки проекционной системы. На практике P^3 применяется для изготовления керамических фильтров и катализаторов, прототипов с высокой детализацией, медицинских имплантатов из биосовместимых материалов, а также композитных изделий с градиентной структурой.

Помимо P^3 , существует целый ряд других гибридных методов, сочетающих преимущества разных технологий. Одним из них является *Multi Jet Fusion (MJF)*, разработанный компанией *HP*. В этой технологии используется порошок, на который наносятся связывающие и детализирующие жидкости. После этого поверхность облучается инфракрасным излучением. Такой подход обеспечивает высокую скорость и точность печати, а также позволяет изготавливать детали с улучшенными механическими свойствами. *Multi Jet Fusion* применяется для производства корпусов электронных устройств, серийных пластиковых деталей и в прототипировании.

Другим примером является *CLIP (Continuous Liquid Interface Production)*, предложенный компанией *Carbon*. Этот метод основан на фотополимеризации жидкой смолы, из которой объект как бы «вырастает» благодаря непрерывному засвечиванию через кислородопроницаемую мембрану. В отличие от классической стереолитографии, процесс не прерывается между слоями, что позволяет значительно увеличить скорость и прочность деталей. *CLIP* широко используется в медицине для изготовления зубных протезов, в автомобильной промышленности, а также в производстве обуви.

К гибридным технологиям относится и так называемое гибридное производство, при котором совмещаются аддитивные и традиционные методы обработки. Сначала объект создается методом 3D-печати, после чего он подвергается доработке при помощи фрезерования, шлифования или сверления. Такой подход позволяет получать изделия со сложной геометрией и одновременно с высоким качеством поверхности и точными размерами. Он особенно востребован в авиации, машиностроении и при изготовлении пресс-форм.

Отдельное место занимают технологии *PolyJet* и *Material Jetting*, которые по принципу работы напоминают струйную печать, только вместо чернил используются фотополимеры. Капли материала наносятся на платформу и сразу же отверждаются ультрафиолетовым светом. Благодаря этому становится возможным печатать многоматериальные изделия, которые совмещают в себе, например, жесткие и гибкие компоненты или различные цветовые решения. Данные технологии активно применяются при создании прототипов для дизайна, медицинских моделей и архитектурных макетов. Для лучшего понимания возможностей P^3 и других гибридных методов целесообразно провести их сравнительный анализ (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Сравнительный анализ гибридных методов

Метод	Материалы	Скорость	Точность	Постобработка	Применение
P ³	Полимеры, керамика, композиты	Высокая	Высокая	Обязательна	Прототипы, фильтры, медтехника
MJF	Пластики, композиты	Очень высокая	Средняя	Минимальная	Серийное производство
CLIP	Фотополимеры	Очень высокая	Высокая	Небольшая	Медицина, промышленный дизайн
Hybrid Manufacturing	Металлы, композиты	Средняя	Очень высокая	Обязательна (механическая)	Авиация, машиностроение
PolyJet	Фотополимеры	Высокая	Очень высокая	Минимальная	Модели, прототипы, макеты

Анализ показывает, что каждая из рассмотренных технологий имеет собственные сильные и слабые стороны. *Projection Powder Printing* выгодно отличается скоростью и точностью при работе с керамикой и композитами, но требует постобработки. *Multi Jet Fusion* обеспечивает высокую производительность и лучше подходит для серийного производства пластиковых деталей. *CLIP* отличается беспрецедентной скоростью печати и применяется там, где важна высокая прочность и гладкость изделий. Гибридное производство позволяет объединить свободу проектирования 3D-печати с точностью традиционной обработки. *PolyJet* предоставляет уникальные возможности для печати многокомпонентных и цветных объектов, что делает его особенно полезным в прототипировании.

Гибридные методы, включая P³, открывают новые горизонты для промышленности и науки. Они позволяют расширять диапазон применяемых материалов, снижать себестоимость изделий, повышать точность печати, комбинировать разные свойства в одном объекте и ускорять переход от прототипирования к серийному производству. В ближайшие годы ожидается активное внедрение этих технологий в таких отраслях, как авиакосмическая промышленность, медицина, микроэлектроника и производство потребительских товаров. Их универсальность и эффективность позволяют рассматривать гибридные методы как одно из ключевых направлений развития аддитивных технологий в XXI в.

3.11. Технология Multi Jet Fusion

Одной из наиболее значимых инноваций последних лет в области аддитивного производства стала технология *Multi Jet Fusion (MJF)*, разработанная компанией HP. Она появилась в 2016 г. и сразу привлекла внимание промышленности благодаря высокой скорости печати, качественной поверхности деталей и возможности массового производства изделий из полимерных порошков. По своей сути MJF является развитием методов порошковой печати, но использует иной принцип связывания частиц материала, что и обеспечивает ее преимущества.

Принцип работы MJF основан на нанесении на поверхность порошкового слоя специальных жидких агентов с помощью струйных печатающих головок. Эти агенты выполняют две функции: связывающую и детализирующую. Связывающий агент наносится в тех областях слоя, где должен сформироваться объем детали, а детализирующий – по краям, чтобы обеспечить высокую точность и четкость контуров. После нанесения агентов слой порошка облучается инфракрасным излучением, в результате чего частицы в зонах с активным агентом спекаются, образуя прочную структуру. Несвязанный порошок остается сыпучим и используется как поддержка, аналогично технологии селективного лазерного спекания (SLS).

Цикл повторяется послойно, пока не будет построена вся деталь. По завершении печати изделия извлекаются из порошковой ванны, очищаются от несвязанного порошка и при необходимости подвергаются дополнительной обработке, например, окрашиванию, инфильтрации или механическому шлифованию.

Главным преимуществом *Multi Jet Fusion* является скорость. Благодаря использованию печатающих головок, которые одновременно наносят агенты на всю поверхность слоя, процесс протекает значительно быстрее, чем при лазерном сканировании в SLS, где требуется последовательное прохождение лазерного луча по всей площади. Это делает технологию особенно привлекательной для серийного производства.

Не менее важным достоинством является качество поверхности. За счет применения детализирующих агентов удается достичь высокой четкости границ, минимальной шероховатости и высокой точности размеров. Поверхность изделий, полученных методом MJF, как правило, более гладкая и равномерная, чем у аналогов, созданных с помощью SLS. Сравнительная характеристика технологий MJM и SLS приведена в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Сравнительная характеристика технологий MJM и SLS

Характеристика	MJF (Multi Jet Fusion)	SLS (Selective Laser Sintering)
Принцип работы	Нанесение связывающих и детализирующих агентов на слой порошка с последующим облучением ИК-излучением	Лазерное сканирование поверхности порошка и выборочное спекание частиц
Скорость печати	Очень высокая, так как агенты наносятся сразу на всю поверхность слоя	Ниже, поскольку лазер сканирует слой точка за точкой
Качество поверхности	Более гладкая и равномерная поверхность, четкие контуры	Поверхность шероховатая, требует постобработки
Прочность и однородность	Высокая прочность во всех направлениях, равномерные свойства по объему	Хорошая прочность, но возможна анизотропия свойств
Материалы	В первую очередь ПА-12, постепенно добавляются композиты и огнестойкие полимеры	Широкий выбор: ПА-11, ПА-12, ТПУ, ПЭЭК, ПЭКК и др.
Стоимость оборудования	Выше, чем у стандартных SLS-принтеров	Широкий диапазон цен: от промышленных систем до относительно доступных
Применение	Серийное производство деталей, прототипирование с высоким качеством поверхности, корпуса электроники, медицина	Прототипирование, изготовление функциональных деталей из широкого спектра материалов, авиация, медицина
Необходимость постобработки	Минимальная (в основном очистка и окрашивание)	Часто требуется шлифование и дополнительная обработка поверхности

Технология также позволяет изготавливать функциональные детали с хорошими механическими характеристиками. Прочность изделий при этом сохраняется равномерной по всем направлениям, что особенно важно для инженерных и промышленных применений. Наиболее часто для печати используется полиамид PA12, однако постепенно расширяется ассортимент материалов, включая наполненные композиты и огнестойкие полимеры.

Multi Jet Fusion активно применяется в автомобильной промышленности, медицине, производстве корпусов электронных устройств, а также в изготовлении прототипов и мелкосерийных партий продукции. Высокая скорость и качество поверхности делают эту технологию удобной для перехода от прототипирования к полноценному серийному производству.

Таким образом, MJF от HP представляет собой современную и перспективную технологию аддитивного производства, которая сочетает в себе преимущества порошковой печати и струйного нанесения материалов. Высокая производительность, точность и качество поверхности позволяют рассматривать ее как один из ключевых инструментов для массового производства функциональных полимерных деталей.

Глава 4. Технологии печати металлических материалов

Металлические материалы занимают особое место в аддитивных технологиях, поскольку позволяют создавать изделия, обладающие высокой прочностью, термостойкостью и долговечностью, сопоставимой или превосходящей традиционные методы литья и механообработки. Благодаря 3D-печати металлами стало возможным производство деталей со сложной геометрией, внутренних каналов и решетчатых структур, ранее недоступных стандартным технологиям.

В данной главе рассматриваются ключевые технологии печати металлических материалов: селективное лазерное спекание (SLS), селективное лазерное плавление (SLM), электронно-лучевая плавка (EBM), прямое осаждение энергии (DED), а также перспективные методы на основе связывающих агентов и последующего спекания. Для каждой технологии представлены принцип действия, применяемые металлы и сплавы, особенности технологического процесса, а также области практического применения.

Понимание возможностей и ограничений аддитивных технологий обработки металлов является основой для выбора оптимального метода при проектировании изделий для авиационно-космической техники, медицины, энергетики и других отраслей, где предъявляются повышенные требования к качеству и надежности деталей.

4.1. Прямое лазерное спекание металлов

Прямое лазерное спекание металлов (DMLS) – технология аддитивного производства металлических изделий, разработанная компанией EOS из Мюнхена. DMLS зачастую путают со схожими технологиями выборочного лазерного спекания (Selective Laser Sintering, или SLS) и выборочной лазерной плавки (Selective Laser Melting, или SLM).

Процесс печати включает использование трехмерных моделей в формате STL в качестве чертежей для построения физических моделей. Трехмерная модель подлежит цифровой обработке для виртуального разделения на тонкие слои с толщиной, соответствующей толщине слоев, наносимых печатным устройством. Готовый «построечный» файл используется как набор чертежей во время печати. В качестве нагревательного элемента для спекания металлического порошка используются оптоволоконные лазеры относительно высокой мощности – порядка

200 Вт. Некоторые устройства используют более мощные лазеры с повышенной скоростью сканирования (т. е. передвижения лазерного луча) для более высокой производительности. Как вариант, возможно повышение производительности за счет использования нескольких лазеров.

Порошковый материал подается в рабочую камеру в количествах, необходимых для нанесения одного слоя. Специальный валик выравнивает поданный материал в ровный слой и удаляет излишний материал из камеры, после чего лазерная головка спекает частицы свежего порошка между собой и с предыдущим слоем согласно контурам, определенным цифровой моделью. После завершения вычерчивания слоя процесс повторяется: валик подает свежий материал и лазер начинает спекать следующий слой (рис. 4.1). Привлекательной особенностью этой технологии является очень высокое разрешение печати – в среднем около 20 микрон. Для сравнения: типичная толщина слоя в любительских и бытовых принтерах, использующих технологию послойного наплавления, составляет порядка 100 микрон.

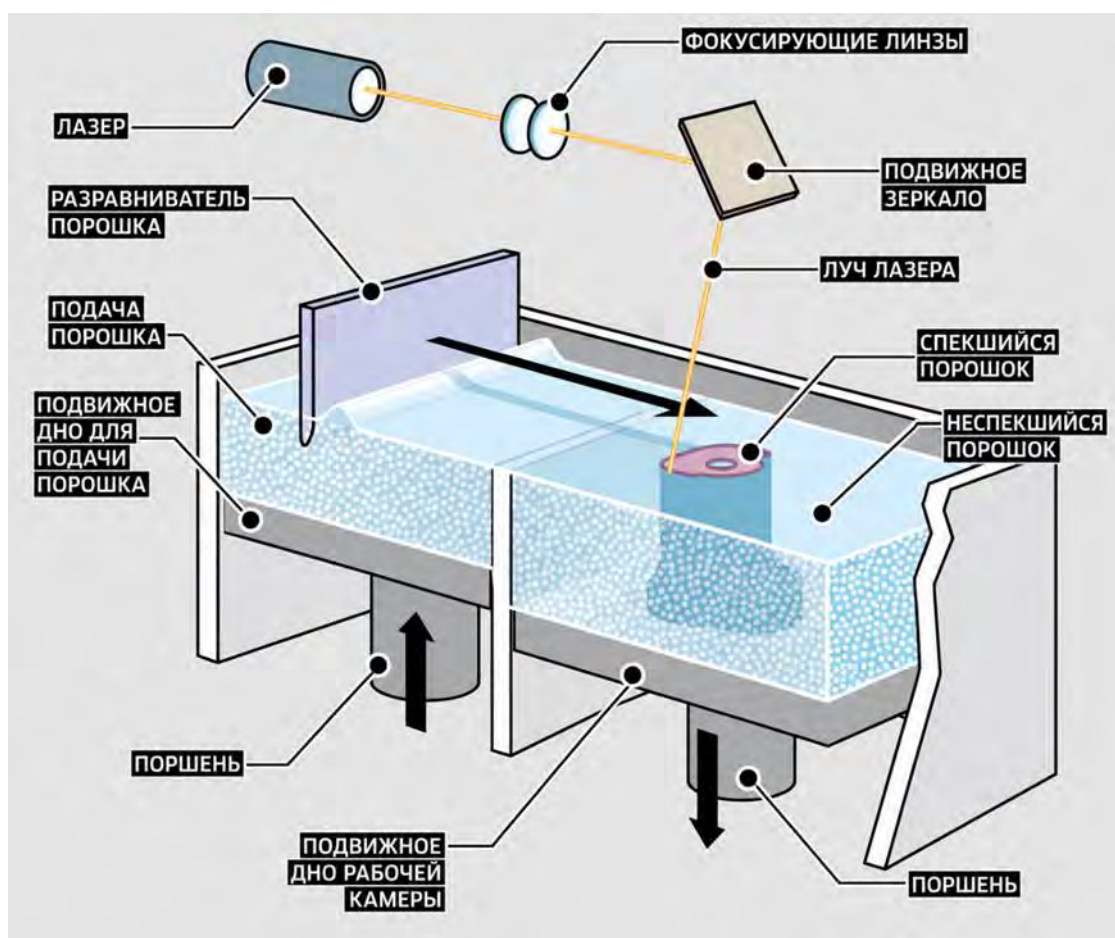


Рис. 4.1. Схема процесса прямого лазерного спекания

Другой интересной особенностью процесса является отсутствие необходимости построения опор для нависающих элементов конструкции. Не спеченный порошок не удаляется во время печати, а остается в рабочей камере. Таким образом, каждый последующий слой имеет опорную поверхность. Кроме того, неизрасходованный материал может быть собран из рабочей камеры по завершении печати и использован заново. Производство методом прямого лазерного спекания можно считать фактически безотходным, что немаловажно при использовании дорогих материалов – например, драгоценных металлов.

Одним из важных условий при лазерной печати является создание защитной среды, предотвращающей окисление порошка. Для выполнения этого условия используют аргон или азот. Однако применение азота как инертного газа несколько ограничено из-за возможности образования нитридов (например, нитридов алюминия или титана при изготовлении изделий из алюминиевых и титановых сплавов), которые приводят к понижению пластичности материала.

Технология практически не имеет ограничений по геометрической сложности построения, а высокая точность исполнения минимизирует необходимость механической обработки напечатанных изделий.

Технология прямого лазерного спекания обладает несколькими достоинствами по сравнению с традиционными методами производства. Наиболее очевидным ее достоинством является возможность быстрого производства геометрически сложных деталей без необходимости механической обработки («субтрактивных» методов – фрезеровки, сверления и пр.). Производство практически безотходно, что выгодно отличает прямое лазерное спекание от субтрактивных технологий. Технология позволяет создавать несколько моделей одновременно с ограничением лишь по размеру рабочей камеры. Построение моделей занимает порядка нескольких часов, что несоизмеримо более выгодно, чем литейный процесс, который может занимать до нескольких месяцев с учетом полного производственного цикла. С другой стороны, детали, произведенные лазерным спеканием, не обладают монолитностью, а потому не достигают тех же показателей прочности, что и отлитые образцы, или детали, произведенные субтрактивными методами.

Прямое лазерное спекание активно используется в промышленности ввиду возможности построения внутренних структур цельных деталей, недоступных по сложности традиционным методам производства. Детали со сложной геометрией могут быть выполнены целиком,

а не из составных частей, что благоприятно влияет на качество и стоимость изделий. Так как прямое лазерное спекание не требует специальных инструментов (например, литейных форм) и не предполагает образования большого количества отходов (как в случае с субтрактивными методами), производство мелкосерийных партий с помощью этой технологии значительно выгодней, чем с помощью традиционных методов.

Технология прямого лазерного спекания применяется для производства готовых изделий малого и среднего размера в различных отраслях, включая аэрокосмическую, стоматологическую, медицинскую и другие (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Изделия, полученные по технологии прямого лазерного спекания¹⁶

Типичный размер области построения существующих установок составляет $250 \times 250 \times 250$ мм, хотя технологических ограничений размеров не существует – это лишь вопрос стоимости устройства. Прямое лазерное спекание используется для быстрого прототипирования, что снижает время разработки новых продуктов, а также в производстве, что позволяет сокращать себестоимость мелких партий и упрощать сборку изделий сложной геометрической формы.

¹⁶ Изображение взято с сайта: www.researchgate.net. URL: <https://clck.ru/awHGW> (дата обращения: 25.03.2026).

Северо-западный политехнический университет Китая использует DMLS системы для производства элементов конструкции самолетов. Исследования, проведенные EADS, также указывают на снижение себестоимости и отходов при использовании технологии DMLS для производства сложных конструкций в единичных экземплярах или мелкими партиями. 5 сентября 2013 г. Илон Маск опубликовал фотографии детали ракетного двигателя *Super Draco*, созданной из никель-хромового жаропрочного сплава *Inconel* с помощью принтера EOS.

В качестве расходных материалов могут использоваться практически любые металлы и сплавы в порошковой форме. На сегодняшний день успешно применяется нержавеющая сталь, кобальт-хромовые сплавы, титан и прочие материалы.

4.2. Непрямое лазерное спекание металлов

Процесс, получивший название не прямое лазерное спекание металлов (IMLS), был разработан компанией DTMcorp of Austin в 1995 г. С 2001 г. DTMcorp принадлежит компании 3D Systems. В процессе непрямого лазерного спекания используют смесь порошка и полимера или порошок, покрытый полимером, где полимер выступает в роли связки и обеспечивает необходимую прочность для проведения дальнейшей термической обработки. На стадии термической обработки проводится отгонка полимера, спекание каркаса и пропитка пористого каркаса металлом-связкой, в результате которой получается готовое изделие.

Для непрямого лазерного спекания можно использовать порошки как металлов, так и керамики или их смесей. Приготовление смеси порошка с полимером проводят механическим смешиванием, при этом содержание полимера составляет около 2...3 % (по массе), а в случае использования порошка покрытым полимером толщина слоя на поверхности частицы составляет около 5 мкм. В качестве связки используют эпоксидные смолы, жидкое стекло, полиамиды и другие полимеры. Температура отгонки полимера определяется температурой его плавления и разложения и в среднем составляет 400...650 °С. После отгонки полимера пористость изделия перед пропиткой составляет около 40 %. При пропитке печь нагревают на 100...200 °С выше точки плавления пропитывающего материала, поскольку с повышением температуры уменьшается краевой угол смачивания и понижается вязкость расплава, что благоприятно влияет на процесс пропитки. Обычно пропитку будущих изделий проводят в засыпке из оксида алюминия,

которая играет роль поддерживающего каркаса, поскольку в период от отгонки полимера до образования прочных межчастичных контактов существует опасность разрушения или деформации изделия. Защиту от окисления организуют с помощью создания в печи инертной или восстановительной сред. Для пропитки можно использовать довольно разнообразные металлы и сплавы, которые удовлетворяют следующим условиям. Материал для пропитки должен характеризоваться полным отсутствием или незначительным межфазным взаимодействием, малым краевым углом смачивания и иметь температуру плавления ниже, чем у основы. Например, в случае если компоненты взаимодействуют между собой, то в процессе пропитки могут происходить нежелательные процессы, такие как образование более тугоплавких соединений или твердых растворов, что может привести к остановке процесса пропитки или негативно сказаться на свойствах и размерах изделия. Обычно для пропитки металлического каркаса используют бронзу, при этом усадка изделия составляет 2...5 %.

4.3. Электронно-лучевая плавка металлов

Электронно-лучевая плавка (*electron beam melting* или *EBM*) – метод аддитивного производства металлических изделий. Данная технология зачастую классифицируется как метод быстрого производства. Электронно-лучевая плавка (EBM) схожа с выборочной лазерной плавкой (SLM) – главное отличие заключается в использовании электронных излучателей (т. н. электронных пушек) вместо лазеров в качестве источников энергии для плавки. В основе технологии лежит использование электронных пучков высокой мощности для сплавления металлического порошка в вакуумной камере с образованием последовательных слоев, повторяющих контуры цифровой модели (рис. 4.3). В отличие от технологий спекания, электронно-лучевая плавка позволяет создавать детали особо высокой плотности и прочности.

Этот метод производства деталей произвольных форм позволяет создавать металлические модели высокой плотности из металлического порошка. Готовые изделия практически не отличаются от литых деталей по механическим свойствам. Устройство считывает данные с файла, содержащего трехмерную цифровую модель, и наносит последовательные слои порошкового материала. Контуры слоев модели вычерчиваются электронным пучком, плавящим порошок в местах соприкосновения. Плавка производится в вакуумных рабочих камерах,

что позволяет работать с материалами, чувствительными к окисдации — например, с чистым титаном.

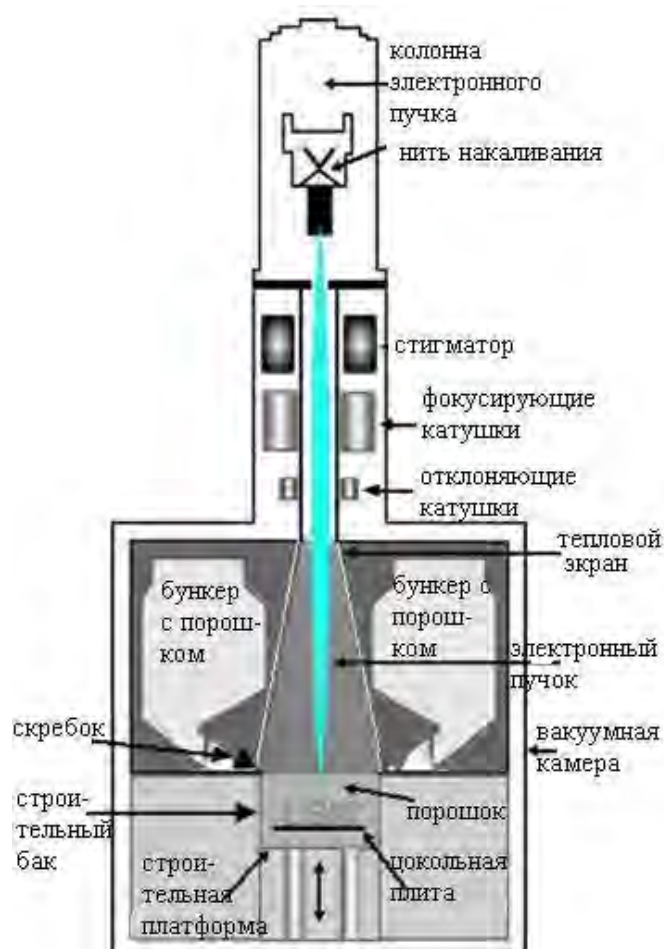


Рис. 4.3. Схема процесса электронно-лучевой плавки

Расходные материалы состоят из чистого металлического порошка без связующего полимера, а готовые модели не отличаются пористостью. Таким образом, не требуется обжигание напечатанной модели для достижения необходимой механической прочности. Этот аспект позволяет классифицировать электронно-лучевую плавку в одну группу с выборочной лазерной плавкой (SLM) и противопоставить технологиям выборочного лазерного спекания (SLS) и прямого лазерного спекания металлов (DMLS), зачастую требующих обжига после печати для достижения максимальных прочностных характеристик. В сравнении с методами SLS, SLM и DMLS, электронно-лучевая плавка обладает более высокой скоростью построения за счет более высокой мощности излучателей и электронного, а не электромеханического, отклонения пучков.

Электронно-лучевая плавка проводится при повышенных фоновых температурах, достигающих порядка 700...1000 °С, что позволяет создавать детали, не страдающие от остаточного механического напряжения, вызываемого градиентом температур между уже охлажденными и еще горячими слоями. Кроме того, полная плавка расходного порошка позволяет производить монолитные изделия – отсюда максимальная прочность и отсутствие необходимости обжига. Технология была разработана и впервые применена шведской компанией Arcam AB.

Использование в качестве расходных материалов титановых сплавов позволяет применять технологию ЕВМ для производства медицинских имплантатов. Начиная с 2007 г., две европейские компании, Adler Ortho и Lima Corporate, а также американская компания Exactech используют технологию электронно-лучевой плавки для производства ацетабулярных чашек (имплантатов тазобедренного сустава).

Технология получила применение в аэрокосмической отрасли: Boeing, Lockheed Martin и NASA используют технологию электронно-лучевой плавки для производства деталей реактивных и ракетных двигателей, а также несущих элементов конструкции летательных аппаратов.

4.4. Селективное лазерное плавление

Селективное (выборочное) лазерное плавление (SLM) – метод аддитивного производства, использующий лазеры высокой мощности (как правило, иттербиевые волоконные лазеры) для создания трехмерных физических объектов за счет плавки металлических порошков.

Разработка технологии селективного лазерного спекания велась В. Майнерсом и К. Виссенбахом из Института лазерной техники (ILT) Общества Фраунгофера (Ахен) совместно с Д. Шварце и М. Фокеле из компании F&S Stereolithographie-technik GmbH (Падерборн). В 2000 г. компания F&S заключила коммерческое соглашение с MCP HEK GmbH (впоследствии переименованной в MTT Technology GmbH, а затем в SLM Solutions GmbH). На сегодняшний день Дитер Шварце сотрудничает с SLM Solutions GmbH, а Маттиас Фокеле основал конкурирующую компанию ReaLizer GmbH.

Процесс печати начинается с разделения цифровой трехмерной модели на слои толщиной от 20 до 100 микрон. Готовый файл в стандартном формате STL используется в качестве чертежей для построения физической модели.

Производственный цикл состоит из нанесения тонкого слоя порошка на рабочую поверхность – как правило, металлический стол, способный передвигаться в вертикальном направлении. Процесс печати протекает в рабочей камере, заполняемой инертными газами (например, аргоном). Отсутствие кислорода позволяет избежать оксидации расходного материала, что делает возможной печать такими материалами, как титан. Каждый слой модели сплавляется, повторяя контуры слоев цифровой модели. Плавка производится с помощью лазерного луча, направляемого по осям X и Y двумя зеркалами с высокой скоростью отклонения. Мощность лазерного излучателя достаточно высока для плавки частиц порошка в гомогенный материал (рис. 4.4).

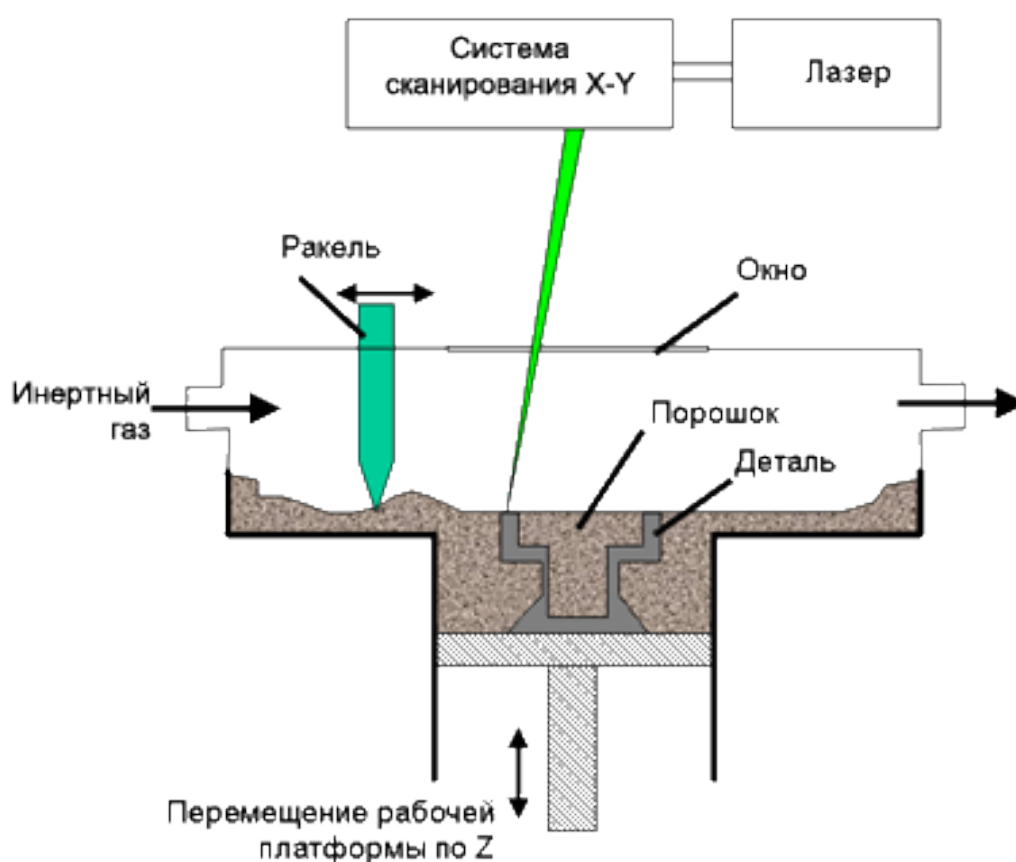


Рис. 4.4. Схема процесса селективного лазерного плавления

Технология выборочной лазерной плавки применяется для построения объектов сложной геометрической формы, зачастую с тонкими стенками и полостями. Возможность комбинирования гомогенных и пористых структур в одном объекте полезна при создании имплантов – например, ацетабулярных чашек или других ортопедических

имплантатов с пористой поверхностью, способствующей остеоинтеграции (сращиванию с костной тканью). Кроме того, селективное лазерное плавление успешно применяется в аэрокосмической отрасли, позволяя создавать высокопрочные элементы конструкций, недостижимые по геометрической сложности для традиционных механических методов изготовления и обработки (фрезеровки, резки и т. д.). Качество готовых изделий настолько высоко, что механическая обработка готовых моделей почти не требуется. Побочным положительным эффектом служит экономия материалов, так как селективное лазерное плавление в силу своей специфики является практически безотходным производством.

В ходе испытаний NASA было установлено, что детали для ракетных двигателей J-2X и RS-25, изготовленные из никелевых сплавов методом SLM, несколько уступают по плотности материала аналогам, изготовленным литьем с последующей сваркой компонентов. С другой стороны, отсутствие сварочных швов благоприятно влияет на прочность изделий.

4.5. Селективное тепловое спекание

Селективное (выборочное) тепловое спекание (SHS) – метод аддитивного производства. Технология основана на плавке слоев термопластического или металлического порошка с помощью теплового излучателя.

По окончании формирования слоя рабочая платформа передвигается вниз на дистанцию, соответствующую толщине одного слоя, после чего новый слой порошка наносится с помощью автоматизированного ролика, а затем проводится спекание нового слоя по контурам, заданным цифровой трехмерной моделью (рис. 4.5). Лучше всего технология SHS подходит для производства недорогих функциональных прототипов.

Селективное тепловое спекание схоже с селективным лазерным спеканием (SLS). Единственное существенное различие между этими двумя методами заключается в использовании тепловой печатающей головки вместо лазерной. Такое решение позволяет снизить стоимость и габариты печатающих устройств вплоть до возможности создания настольных принтеров. С другой стороны, энергетическая отдача SHS-устройств мала по сравнению с лазерными 3D-принтерами, что существенно ограничивает выбор материалов.

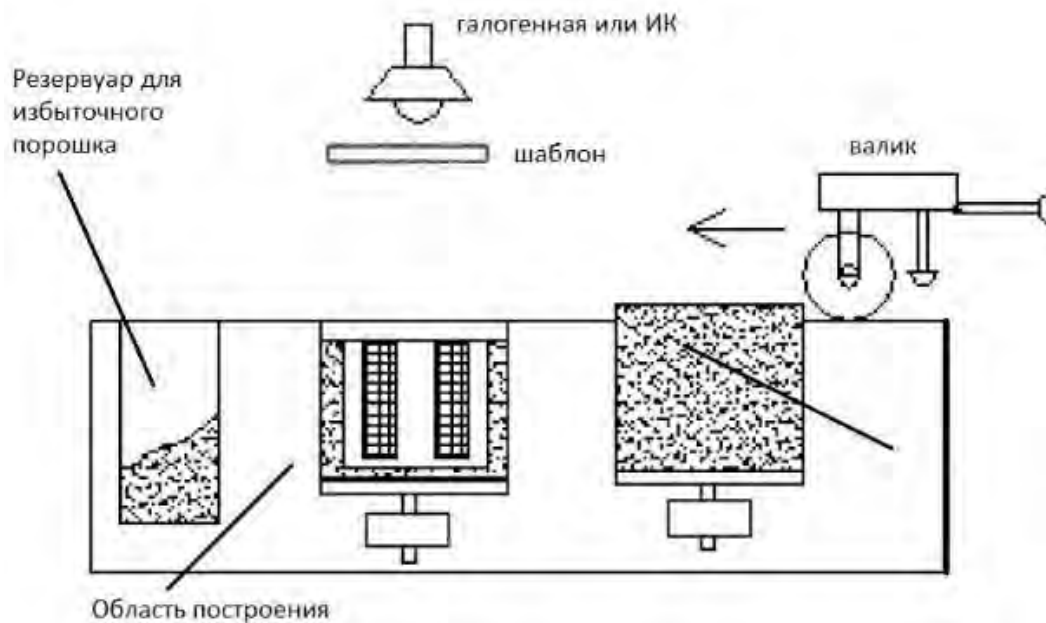


Рис. 4.5. Схема процесса селективного теплового спекания

Одним из основных преимуществ метода теплового спекания является то, что для определенной длины волны ИК-излучения всегда существует возможность подобрать 2 вида материала: один из которых будет пропускать тепло, а другой будет его поглощать. Таким образом, комбинируя эти материалы при производстве изделия, можно достичь значительной сложности и многообразия его форм.

Селективное лазерное спекание – это настоящий прорыв в скоростной трехмерной печати. Важно подчеркнуть, что модель формируется из порошка, причем весь неиспользованный порошок можно использовать повторно. Данная технология позволяет изготавливать модели самых сложных геометрических форм, а также печатать несколько деталей одновременно.

Как правило, в качестве расходных материалов используются термопластичные полимеры или достаточно легкоплавкие металлы. В последнем случае модели зачастую требуют дополнительного обжига для повышения прочности.

4.6. Селективное лазерное спекание

Селективное (выборочное) лазерное спекание (SLS) – 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. SLS зачастую ошибочно принимают за схожий процесс, называемый выборочной лазерной плавкой (SLM). Разница заключается в том, что SLS обеспечивает лишь частичную плавку, необходимую для спекания материала, в то время как выборочная лазерная плавка подразумевает полную плавку, необходимую для построения монолитных моделей.

Технология выборочного (селективного) лазерного спекания (SLS) была разработана Карлом Декардом и Джозефом Биманом из Университета Техаса в Остине в середине 1980-х гг. Исследования финансировались Агентством передовых оборонных исследовательских проектов США (DARPA). Впоследствии Декард и Биман были вовлечены в компанию DTM, образованную для продвижения технологии SLS на рынок. В 2001 г. DTM была выкуплена конкурирующей компанией 3D Systems. Последний из патентов по технологии SLS был заявлен 28 января 1997 г. Его срок действия истек 28 января 2014 г., что делает технологию общедоступной.

Аналогичный метод был запатентован Р. Ф. Хаусхолдером в 1979 г., но не получил коммерческого распространения.

Технология (SLS) подразумевает использование одного или нескольких лазеров (как правило, углекислотных) для спекания частиц порошкообразного материала до образования трехмерного физического объекта (рис. 4.6). В качестве расходных материалов используются пластики, металлы, керамика или стекло. Спекание производится за счет вычерчивания контуров, заложенных в цифровой модели (т. н. «сканирования») с помощью одного или нескольких лазеров. По завершении сканирования рабочая платформа опускается, и наносится новый слой материала. Процесс повторяется до образования полной модели.

Так как плотность изделия зависит не от продолжительности облучения, а от максимальной энергии лазера, в основном используются пульсирующие излучатели. Перед началом печати расходный материал подогревается до температуры чуть ниже точки плавления, чтобы облегчить процесс спекания.

В отличие от таких методов аддитивного производства, как стереолитография или моделирование методом послойного наплавления, селективное лазерное спекание не требует построения опорных структур. Навесные части модели поддерживаются неизрасходованным материалом. Такой подход позволяет добиться практически неограниченной геометрической сложности изготавливаемых моделей.

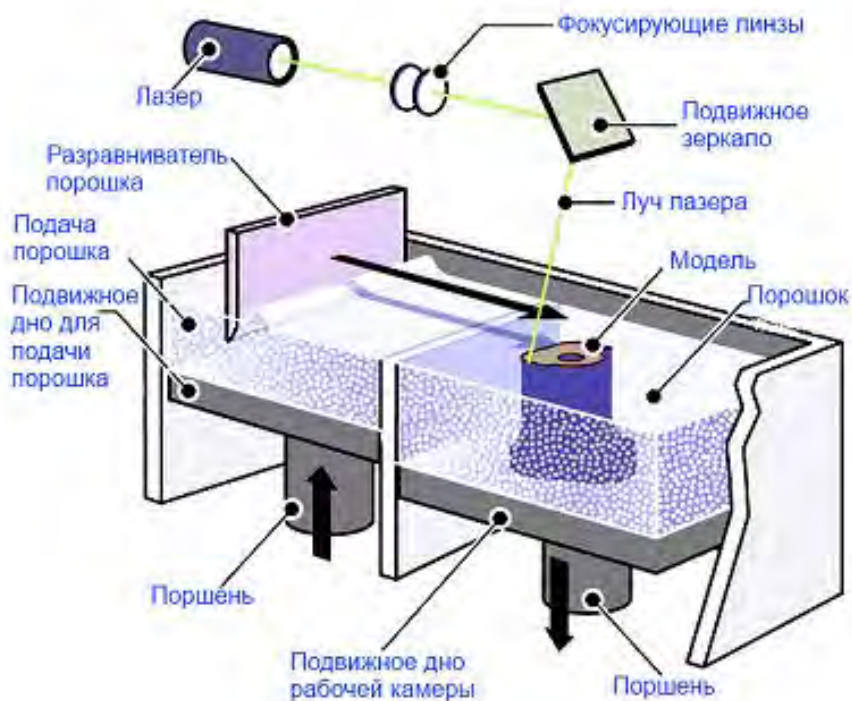


Рис. 4.6. Схема метода SLS

Некоторые SLS-устройства используют однородный порошок (как при прямом лазерном спекании металлов), производимый с помощью барабанно-шаровых мельниц, но в большинстве случаев используются композитные гранулы с тугоплавким ядром и оболочкой из материала с пониженной температурой плавления.

В сравнении с другими методами аддитивного производства, селективное лазерное спекание отличается высокой универсальностью в плане выбора расходных материалов. Сюда входят различные полимеры (например, нейлон или полистирол), металлы и сплавы (сталь, титан, драгоценные металлы, кобальт-хромовые сплавы и др.), а также композиты и песчаные смеси.

Технология селективного лазерного спекания получила широкое распространение по всему миру благодаря способности производить функциональные детали сложной геометрической формы. Несмотря на то, что технология создавалась для быстрого прототипирования, в последнее время селективное лазерное спекание применяется для мелкосерийного производства готовых изделий (рис. 4.7). Достаточно неожиданным, но интересным применением SLS стало его использование для создания предметов искусства.



Рис. 4.7. Изделие, полученное по методу SLS¹⁷

В то же время твердофазное селективное лазерное спекание имеет ряд недостатков: поскольку для более полного протекания объемной и поверхностной диффузии, вязкого течения и других процессов, имеющих место при спекании порошка, требуется относительно длительная выдержка под лазерным излучением, то это приводит к длительной работе лазера и малой производительности процесса, что делает этот процесс экономически не целесообразным. Помимо этого, возникают сложности с поддержанием температуры процесса в интервале между точкой плавления и температурой твердофазного спекания. Преимуществом твердофазного селективного лазерного спекания является возможность использования более широкого круга материалов для изготовления изделий.

4.7. Струйное нанесение связующего

Технология *Binder Jetting (BJ)*, или струйное нанесение связующего, является одним из наиболее перспективных методов аддитивного производства металлических изделий. Она была разработана в 1990-е гг. в Массачусетском технологическом институте (MIT)

¹⁷ Изображение взято с сайта: www.additivalab.com. URL: <https://clck.ru/iRVpk> (дата обращения: 25.03.2026).

и на сегодняшний день активно применяется для изготовления сложных металлических деталей с высокой производительностью. В отличие от методов селективного лазерного плавления (SLM) или электронно-лучевого плавления (EBM), процесс *Binder Jetting* не требует локального плавления порошка мощным источником энергии, а основан на послойном нанесении жидкого связующего материала на порошковый слой (рис. 4.8).

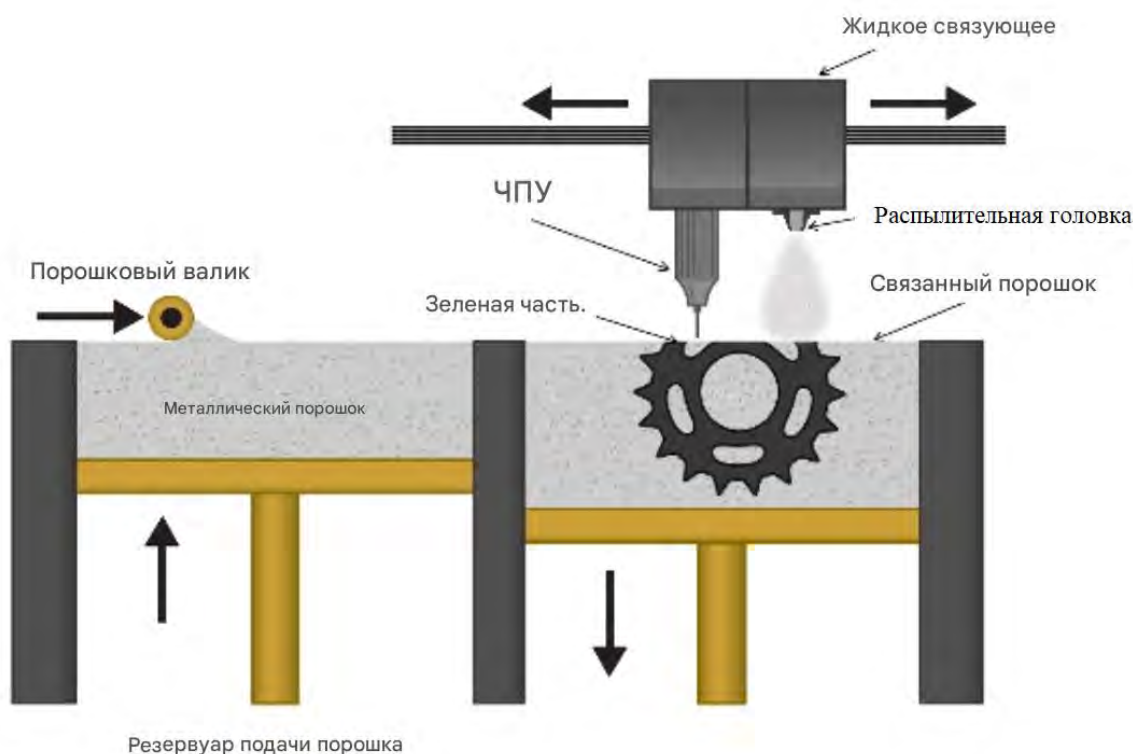


Рис. 4.8. Схема метода Binder Jetting

Принцип работы технологии заключается в следующем. На рабочую платформу наносится тонкий слой металлического порошка, который разравнивается *рекоутером*. Затем печатающая головка распыляет связующее вещество по заданной траектории в тех областях, где должна формироваться часть будущей детали. Несвязанный порошок остается в рабочей камере и служит естественной поддержкой, что позволяет печатать изделия сложной формы без дополнительных структур. После завершения печати всех слоев изделие извлекается из порошковой ванны и подвергается постобработке.

Постобработка является обязательным этапом при *Binder Jetting* и может включать два основных подхода. Первый – инфильтрация (пропитка): «зеленая» деталь, содержащая значительное количество пор, помещается в печь и пропитывается жидким металлом (например,

бронзой), который заполняет поры и придает детали прочность. Второй – спекание: изделие помещается в высокотемпературную печь, где под действием температуры частицы основного порошка спекаются между собой, формируя монолитную структуру. При необходимости применяется горячее изостатическое прессование (HIP) для уменьшения остаточной пористости и повышения прочности.

Одним из главных преимуществ технологии *Binder Jetting* является высокая производительность. Так как процесс основан на струйной печати и не требует сканирования поверхности лазером или плавления электронным пучком, печать может осуществляться значительно быстрее, чем при методах порошкового плавления. Это делает ВЈ особенно привлекательным для серийного и массового производства металлических деталей. Кроме того, отсутствие интенсивных тепловых процессов снижает внутренние напряжения и деформации изделий, характерные для SLM и EBM.

По качеству поверхности детали, полученные методом *Binder Jetting*, имеют более высокую точность и меньшую шероховатость, чем при традиционном порошковом спекании, хотя после спекания возможна усадка, требующая компенсации на этапе проектирования. Прочностные характеристики зависят от выбранного метода постобработки: инфильтрация обеспечивает быстрое получение функциональных деталей, но с меньшей однородностью структуры, тогда как спекание позволяет достичь более высоких механических свойств, приближенных к кованным или литым сплавам.

В промышленности технология *Binder Jetting* применяется в первую очередь для изготовления деталей сложной геометрии из стали, нержавеющей стали, медных сплавов и никелевых суперсплавов. Она находит применение в автомобильной отрасли, производстве инструментов, медицинской имплантологии и аэрокосмической промышленности. Использование ВЈ позволяет создавать небольшие и средние партии деталей в короткие сроки, а также экономить материал за счет точного дозирования порошка и отсутствия необходимости в поддерживающих структурах.

Таким образом, *Binder Jetting* представляет собой эффективный метод аддитивного производства металлических изделий, который сочетает высокую скорость печати, экономичность и возможность серийного выпуска деталей. Благодаря дальнейшему развитию технологий постобработки и расширению номенклатуры порошковых материалов ВЈ может занять важное место в цепочке промышленного производства, дополняя или даже заменяя традиционные методы литья и механической обработки.

Глава 5. Специализированные методы 3D-печати

Помимо базовых технологий аддитивного производства, таких как экструзия термопластов, фотополимеризация или спекание порошков, в последние годы активно развиваются специализированные методы 3D-печати. Эти технологии направлены на решение узкопрофильных задач и позволяют расширить функциональные возможности аддитивного производства за счет применения нетрадиционных материалов, комбинированных процессов или гибридных подходов.

К специализированным методам относят печать биоматериалами и живыми клетками (биопринтинг), многоматериальную печать, комбинирование аддитивных и субтрактивных технологий, печать крупногабаритных конструкций, а также методы, основанные на использовании уникальных связующих и наполнителей. Такие технологии открывают перспективы в медицине, строительстве, микроэлектронике, энергетике и других высокотехнологичных отраслях.

Изучение специализированных методов 3D-печати позволяет понять, как развивается современное аддитивное производство и каким образом оно выходит за рамки классического прототипирования и промышленного изготовления деталей, формируя новые направления науки и промышленности.

5.1. Методы непрерывной печати

Одним из наиболее значимых направлений в развитии аддитивных технологий стало создание методов непрерывной печати, позволяющих существенно увеличить скорость построения объектов без потери качества. Наибольшую известность среди них получила технология *CLIP* (*Continuous Liquid Interface Production*), разработанная американской компанией *Carbon* в 2015 г. В отличие от традиционной стереолитографии (SLA), которая работает послойно, технология CLIP обеспечивает практически непрерывный рост детали из жидкой смолы, что делает ее процесс в десятки раз быстрее [19].

Принцип работы CLIP основан на фотополимеризации смолы с использованием ультрафиолетового излучения. Ключевой элемент системы – это кислородопроницаемая мембрана, расположенная внизу кюветы со смолой. Через мембрану в зону печати поступает кислород, создавая так называемую «мертвую зону» – тонкий слой, в котором полимеризация не происходит. Это предотвращает прилипание модели к дну кюветы и позволяет объекту непрерывно вытягиваться вверх

из смолы под действием лифтового механизма. В результате процесс печати превращается в плавный и быстрый рост объекта, а не в последовательное формирование отдельных слоев.

Главными преимуществами CLIP являются высокая скорость и качество поверхности. Детали печатаются в 25...100 раз быстрее, чем при SLA или DLP, при этом поверхность остается гладкой и не требует дополнительной постобработки. Еще одной особенностью является высокая прочность изделий: благодаря непрерывному процессу отсутствуют четко выраженные границы слоев, что снижает риск расслоения и делает механические свойства деталей более однородными.

Материалы для CLIP – это в первую очередь фотополимеры, специально разработанные компанией Carbon. Они включают как жесткие, так и эластичные смолы, огнестойкие и биосовместимые материалы. Это открывает возможности для применения технологии в самых разных областях: от производства стоматологических протезов и ортопедических изделий до изготовления промышленных деталей, обуви и элементов дизайна. Известен пример сотрудничества компании Carbon с Adidas, для которой были разработаны серийные подошвы для спортивной обуви, изготовленные методом CLIP.

Помимо CLIP, существуют и другие методы непрерывной печати, направленные на повышение производительности аддитивного производства. Один из них – *LSPc (Lubricant Sublayer Photo-curing)*, применяемый в некоторых современных установках. Этот метод также использует кислородопроницаемую или смазывающую прослойку, которая предотвращает прилипание полимера к кювете, обеспечивая непрерывность процесса. LSPc является технологическим развитием идей CLIP и реализуется в коммерческих принтерах компаний *EnvisionTEC* и *Nexa3D*.

Другим направлением является непрерывная экструзия в технологиях FDM/FFF. В традиционных системах печать прерывается на каждом слое, тогда как новые решения предлагают плавный переход материала без остановки, что ускоряет процесс и делает поверхность более ровной. Хотя такие методы пока находятся на стадии развития, они обладают высоким потенциалом для крупногабаритного производства.

Еще одним вариантом можно считать системы, использующие непрерывное лазерное спекание порошка с параллельным нанесением новых слоев. В таких установках печать и распределение порошка происходят одновременно, что позволяет существенно ускорить процесс по сравнению с классическим SLS.

Таким образом, CLIP и другие методы непрерывной печати знаменуют новый этап в эволюции аддитивных технологий. Они позволяют преодолеть одно из главных ограничений 3D-печати – низкую скорость построения – и обеспечивают возможность серийного и массового производства изделий. В перспективе именно такие технологии могут сыграть ключевую роль в интеграции аддитивных методов в традиционные производственные цепочки, обеспечив сочетание высокой производительности, качества и разнообразия применяемых материалов.

5.2. Струйная печать керамикой и металлическими пастами

Струйная печать керамикой и металлическими пастами является одним из направлений аддитивного производства, ориентированным на создание изделий из высокопрочных и термостойких материалов. В отличие от технологий, основанных на порошковых слоях или фотополимерах, этот метод использует суспензии и пасты, содержащие высокую концентрацию частиц керамики или металла, которые дозируются и формируются с помощью печатающих головок или экструзионных систем.

Принцип работы заключается в послойном нанесении пастообразного материала на рабочую платформу. Керамические или металлические частицы в составе пасты удерживаются связующими компонентами (органическими или полимерными), которые придают ей необходимую вязкость и пластичность. После завершения печати изделие имеет форму, близкую к конечной, но остается «зеленым телом» – непрочным и содержащим значительное количество связующего. Для превращения в функциональный продукт требуется постобработка, включающая сушку, выгорание органических компонентов и последующее высокотемпературное спекание.

Керамические пасты позволяют изготавливать изделия из таких материалов, как оксид алюминия (Al_2O_3), оксид циркония (ZrO_2), карбид кремния (SiC) и гидроксиапатит (табл. 5.1). Эти материалы находят применение в медицине (например, для создания биосовместимых имплантатов и протезов), электронике (подложки, изоляторы), а также в авиационно-космической промышленности (теплозащитные элементы).

Таблица 5.1

Сравнение струйной печати керамикой и металлическими пастами

Характеристика	Керамические пасты	Металлические пасты
Основные материалы	Алюминий-оксид (Al_2O_3), цирконий-оксид (ZrO_2), карбид кремния (SiC), гидроксиапатит	Сталь, медь, титан, вольфрам, никелевые и другие сплавы
Применение	Медицина (имплантаты, протезы), электроника (подложки, изоляторы), авиация (теплозащита)	Автомобилестроение, машиностроение, аэрокосмос, инструментальное производство
Постобработка	Сушка, выгорание связующего, высокотемпературное спекание	Сушка, выгорание связующего, спекание в печи, при необходимости горячее изостатическое прессование (HIP)
Механические свойства	Высокая твердость, износостойкость, химическая стойкость, но хрупкость	Высокая прочность, пластичность, термостойкость, хорошие механические свойства
Особенности печати	Сложность контроля усадки и растрескивания при спекании	Возможность получения прочных деталей, но требуется учет усадки и плотности
Преимущества	Биосовместимость, устойчивость к высоким температурам и химическим воздействиям	Прочность, пригодность для функциональных металлических деталей сложной формы

Металлические пасты включают сталь, медь, вольфрам, титан и сплавы на их основе. Они применяются для производства деталей сложной формы, которые после спекания приобретают высокую прочность и термостойкость. В отличие от методов порошковой плавки (SLM, EBM), струйная печать пастами позволяет работать без мощных лазеров или электронных пушек, что снижает себестоимость оборудования и делает процесс более доступным.

Главным преимуществом данной технологии является возможность печати высокодетализированных объектов из материалов, которые традиционно трудно поддаются обработке. Керамика и тугоплавкие металлы плохо поддаются механической обработке, но при использовании паст можно получать изделия со сложной геометрией, каналами и тонкими стенками. Еще одним плюсом является относительная экономичность: оборудование для струйной печати пастами проще и дешевле, чем установки для лазерного плавления порошков.

Однако существуют и ограничения. Процесс требует тщательной подготовки пасты, контроля ее вязкости и равномерности распределения частиц. Кроме того, этапы сушки и спекания сопровождаются усадкой материала, что необходимо учитывать при проектировании изделий. Также механические свойства готовых деталей зависят от качества спекания и могут уступать характеристикам, получаемым при традиционных методах порошковой металлургии или горячего прессования.

В промышленности струйная печать керамикой и металлическими пастами активно используется в медицине, электронике, энергетике и приборостроении. В перспективе ожидается расширение ассортимента паст и улучшение систем печати, что позволит перейти от опытных образцов к массовому производству функциональных деталей.

Таким образом, технология струйной печати пастами представляет собой важное дополнение к уже существующим методам аддитивного производства. Она открывает новые возможности для работы с керамикой и металлами, обеспечивая гибкость проектирования и доступность по сравнению с более сложными лазерными или электронно-лучевыми установками.

5.3. Печать строительных конструкций

Одним из наиболее ярких направлений развития аддитивных технологий в последние десятилетия стала печать строительных конструкций, или *Contour Crafting*. Этот метод был предложен в начале 2000-х гг. профессором Бехроком Хошневисом (*Behrokh Khoshnevis*) из Университета Южной Калифорнии и получил широкое признание благодаря перспективе автоматизации и ускорения возведения зданий. Основная идея технологии заключается в использовании принципов 3D-печати для работы с цементными и бетонными смесями, что позволяет послойно формировать крупные строительные элементы или целые сооружения (табл. 5.2).

Принцип работы *Contour Crafting* заключается в подаче строительного раствора через специальный экструдер, закрепленный в роботизированной руке. Экструдер движется по заранее заданной траектории, формируя слои материала, которые постепенно складываются в стеновые конструкции или другие элементы здания. Для обеспечения точности формы используется система направляющих и сопел, которые уплотняют и выравнивают нанесенный слой. Таким образом, создается

непрерывная оболочка (контур), а внутреннее пространство может заполняться менее прочными материалами или теплоизоляцией.

Таблица 5.2

Сравнение традиционного строительства и 3D-печати

Характеристика	Традиционное строительство	3D-печать (Contour Crafting)
Скорость возведения	Недели и месяцы для небольших объектов	Часы или дни для сопоставимых по размеру объектов
Трудозатраты	Большое количество рабочих и специалистов	Минимальное количество персонала, управление автоматизировано
Материалы	Стандартные бетонные смеси, кирпич, блоки	Специальные цементные или композитные смеси с добавками
Архитектурные возможности	Ограничены опалубкой и традиционными формами	Возможность сложных, криволинейных и уникальных форм без опалубки
Стоимость	Высокие затраты на материалы, труд и логистику	Снижение затрат за счет экономии материалов и автоматизации
Экологичность	Большие отходы и перерасход ресурсов	Минимизация отходов, возможность использования геополимеров и вторичных материалов
Качество и точность	Зависит от квалификации строителей и контроля	Высокая точность, повторяемость и предсказуемость качества
Интеграция инженерных систем	Традиционная укладка после возведения стен	Пока ограничена, требует дополнительных решений

Главным преимуществом технологии является высокая скорость возведения объектов. Там, где традиционное строительство требует недель и месяцев, 3D-печать способна сократить сроки до нескольких дней. Например, печать отдельных элементов стен здания площадью 50...100 м² может занять всего 20...30 ч. Еще одним важным преимуществом является снижение затрат на рабочую силу и уменьшение человеческого фактора, поскольку большая часть операций автоматизирована.

Contour Crafting также открывает широкие возможности для архитектурной свободы: криволинейные формы, сложные конструкции и индивидуальные проекты можно реализовать без необходимости

в дорогостоящей опалубке или дополнительных инструментах. Экологический эффект выражается в более рациональном использовании материалов и уменьшении строительных отходов.

При этом технология требует специальных строительных смесей с тщательно подобранной вязкостью и временем схватывания. Обычно применяются цементные композиции с добавками, улучшающими текучесть и ускоряющими отверждение. Некоторые компании также разрабатывают альтернативные материалы: гипсовые смеси, композиты с волокнами, а в перспективе – геополимеры, которые могут снизить углеродный след.

На сегодняшний день *Contour Crafting* и родственные технологии активно тестируются и внедряются в разных странах. Китайская компания Winsun построила целые жилые кварталы с использованием печатных блоков, созданных экструзией бетона. В России компания Apis Cor известна проектами по печати жилых домов площадью до 200 м² прямо на строительной площадке. В Европе и США ведутся разработки для применения технологии при строительстве мостов, промышленных зданий и временных сооружений.

Особый интерес вызывает применение печати строительными смесями в экстремальных условиях. NASA и Европейское космическое агентство рассматривают *Contour Crafting* как потенциальный метод для возведения инфраструктуры на Луне или Марсе с использованием местных реголитов, смешанных с вяжущими компонентами. Это направление делает технологию не только строительным инструментом, но и стратегическим ресурсом для освоения космоса.

Несмотря на очевидные преимущества, технология пока сталкивается с рядом ограничений. Среди них – необходимость в развитии нормативной базы для печатного строительства, вопросы долговечности и сертификации материалов, а также интеграция инженерных коммуникаций (электрика, водоснабжение, вентиляция) в процессе печати. Тем не менее интерес со стороны строительной отрасли и государств продолжает расти, и можно ожидать, что в ближайшие годы печатные здания станут привычной частью городской среды.

Таким образом, печать строительных конструкций по технологии *Contour Crafting* демонстрирует, как идеи аддитивного производства могут изменить одну из самых традиционных сфер – строительство. Она сочетает скорость, экономичность и архитектурную гибкость, открывая путь к созданию новых форм жилья и инфраструктуры как на Земле, так и за ее пределами.

5.4. Биопечать

Биопечать является одним из самых инновационных направлений аддитивных технологий, соединяющих достижения 3D-печати, биоинженерии и медицины. Ее основная идея заключается в создании трехмерных структур с использованием так называемых «биочернил» – смесей, содержащих живые клетки, матриксы и питательные вещества. Эти структуры служат аналогами тканей и органов человека, открывая путь к персонализированной медицине, тестированию лекарственных препаратов и регенеративной терапии.

Принцип работы биопечати во многом схож с традиционной экструзионной 3D-печатью. В качестве материала подаются специальные гидрогели, наполненные живыми клетками, которые послойно формируют заданную архитектуру будущей ткани. Для обеспечения жизнеспособности клеток применяются системы поддержания температуры, влажности и стерильности. После печати структура может подвергаться дополнительному «дозреванию» в биореакторе, где создаются условия для клеточной дифференциации и формирования внеклеточного матрикса.

Современное состояние биопечати характеризуется широким спектром исследовательских проектов и экспериментальных применений (табл. 5.3). На сегодняшний день успешно создаются простые ткани – кожные покровы, хрящи, сосудистые структуры, элементы костей. Такие образцы уже применяются для тестирования новых лекарственных средств, что снижает зависимость от традиционных доклинических исследований на животных. Разрабатываются технологии печати сложных многоклеточных конструкций, включая миниатюрные органы-модели («органоиды»), которые имитируют функции печени, почек или легких.

Таблица 5.3

Современные достижения и перспективы биопечати

Область	Современные достижения	Перспективы
Кожные ткани	Печать кожных покровов для тестирования косметики и лекарств; прототипы кожных трансплантатов	Массовое производство кожных лоскутов для лечения ожогов и ран

Окончание табл. 5.3

Область	Современные достижения	Перспективы
Хрящ и кость	Экспериментальная печать хрящевых имплантатов, костных фрагментов и пористых матриц	Создание полноценных суставных имплантатов, использование в ортопедии и травматологии
Сосудистые структуры	Печать простейших каналов для имитации сосудов	Разработка сложной васкуляризации для питания объемных тканей и органов
Органоиды (мини-органы)	Лабораторные модели печени, почек, легких для фармакологических испытаний	Создание полноценных функциональных органов для трансплантации
Материалы (биочернила)	Использование гидрогелей, коллагена, альгината, фибрина	Разработка «умных» биочернил с возможностью программирования роста и дифференциации клеток
Клиническое применение	Первые прототипы для медицины, применение в фармакологии и токсикологии	Персонализированные органы под заказ, снижение зависимости от доноров

Перспективы биопечати связаны с решением ключевых технологических задач. Одним из главных вызовов остается обеспечение васкуляризации, то есть создание сложной системы сосудов, способных питать клетки внутри объемных тканей. Другой проблемой является интеграция напечатанных структур в организм пациента: необходимо достичь совместимости, устойчивости и полноценного функционирования трансплантатов. Тем не менее прогресс в области биоматериалов, стволовых клеток и методов клеточного программирования постепенно приближает момент, когда биопечать сможет выйти за пределы лабораторий и найти применение в клинической практике.

Особый интерес представляют проекты по созданию «биофабрик будущего», где 3D-принтеры будут производить ткани и органы под заказ, используя собственные клетки пациента. Такая персонализированная терапия способна решить проблему нехватки донорских органов и снизить риск иммунного отторжения. В перспективе биопечать может стать основой регенеративной медицины, обеспечивая новые подходы к лечению травм, дегенеративных заболеваний и врожденных патологий.

Таким образом, биопечать находится на этапе стремительного развития, сочетая в себе потенциал фундаментальной науки и прикладной медицины. Несмотря на сохраняющиеся технические и биологические барьеры, уже сегодня она открывает возможности, которые еще недавно казались фантастикой: от печати тканей для фармакологических испытаний до перспективы создания полноценных органов для трансплантации.

Часть III. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

Материалы играют ключевую роль в аддитивных технологиях, определяя как возможности печати, так и эксплуатационные характеристики готовых изделий. Разнообразие 3D-печати связано не только с методами формирования объектов, но и с особенностями используемых материалов, которые напрямую влияют на точность, прочность, гибкость, термостойкость и другие свойства изделий.

В данной части пособия рассматриваются основные классы материалов для 3D-печати, включая полимеры, композиты, металлы и керамику. Особое внимание уделено их структуре, физико-химическим свойствам и применению в различных аддитивных технологиях. Разделение материалов по функциональному назначению позволяет понять, какие из них подходят для прототипирования, а какие – для производства высоконагруженных или специализированных изделий.

Изучение материальной базы 3D-печати важно не только для выбора подходящего материала под конкретную задачу, но и для понимания возможностей постобработки, обработки поверхности, долговечности и совместимости с различными технологиями печати. Эта часть пособия создает фундамент для практического применения знаний о материалах и подготовки к проектированию изделий с использованием аддитивных технологий.

Глава 6. Полимерные материалы

Полимеры занимают центральное место в аддитивных технологиях благодаря своей универсальности, легкости обработки и широкому спектру механических и химических свойств. В 3D-печати полимерные материалы применяются как для прототипирования, так и для производства функциональных деталей, обеспечивая баланс между точностью печати, прочностью, эластичностью и термостойкостью.

Глава посвящена классификации полимеров, используемых в различных технологиях аддитивного производства, включая термопласты, фотополимерные смолы и композитные материалы. Особое внимание уделено структуре полимеров, способам их переработки и влиянию на свойства готовых изделий.

Знание особенностей полимерных материалов позволяет правильно выбирать материал под конкретную технологию и задачу, прогнозировать эксплуатационные характеристики изделий и использовать возможности постобработки для улучшения функциональных свойств.

6.1. Термопластичные полимеры для экструзионной печати

Полилактид (полимолочная кислота, ПЛА, polylactic acid, PLA) – один из наиболее широко используемых в 3D-печати полимеров. Это биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный, алифатический полиэфир (рис. 6.1), мономером которого является молочная кислота.

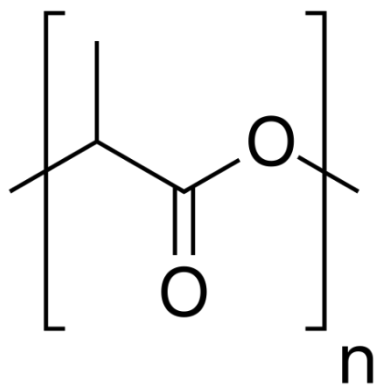


Рис. 6.1. Химическая формула полилактида

Сырьем для производства служат ежегодно возобновляемые ресурсы, такие как кукуруза и сахарный тростник. Используется для производства изделий с коротким сроком службы (пищевая упаковка, одноразовая посуда, пакеты, различная тара), а также в медицине, для производства хирургических нитей и штифтов.

Распространенность полилактида в аддитивном производстве обуславливается сразу несколькими факторами. Во-первых, полилактид полностью безопасен для окружающей среды. Во-вторых, поскольку он является полимером молочной кислоты, полилактид полностью биоразлагаем.

В то же время способностью полилактида к биоразложению обуславливается его недолговечность. Пластик легко впитывает воду и относительно мягок. Как правило, модели из ПЛА не предназначаются

для функционального использования, а служат в качестве дизайнерских моделей, сувениров и игрушек. Среди немногих практических промышленных применений полилактида можно отметить производство упаковки для пищевых продуктов, контейнеров для лекарственных препаратов и хирургических нитей, а также использование в подшипниках, не несущих высокой механической нагрузки (например, в моделировании), что возможно благодаря отличному коэффициенту скольжения материала.

Одним из наиболее важных факторов для применения в 3D-печати служит низкая температура плавления – всего 170...180 °С, что способствует относительно низкому расходу электроэнергии и возможности использования недорогих сопел из латуни и алюминия. Температура плавления материала зависит от степени его кристалличности и может варьироваться в широких пределах. Как правило, экструзия производится при 160...170 °С. В то же время полилактид достаточно медленно застывает (температура стеклования составляет порядка 50 °С), что следует учитывать при выборе 3D-принтера. Оптимальным вариантом является устройство с корпусом открытого типа, подогреваемой рабочей платформой (во избежание деформаций моделей большого размера) и желательно дополнительными вентиляторами для охлаждения свежих слоев модели.

Полилактид обладает низкой усадкой, то есть потерей объема при охлаждении, что способствует предотвращению деформаций. Тем не менее усадка имеет кумулятивный эффект при увеличении габаритов печатаемых моделей. В последнем случае может потребоваться подогрев рабочей платформы для равномерного охлаждения печатаемых объектов.

Плотность ПЛА варьируется от 1200 до 1400 кг/м³. Стоимость полилактида относительно невелика, что добавляет популярности этому материалу. Усредненные эксплуатационные характеристики полилактида представлены в табл. 6.1

Таблица 6.1

Эксплуатационные характеристики полилактида

Показатель	Значение
Температура плавления, °С	170...180
Температура размягчения, °С	50
Твердость (по Роквеллу), R	70...90
Относительное удлинение при разрыве, %	3,8

Окончание табл. 6.1

Показатель	Значение
Прочность при изгибе, МПа	55,3
Прочность на разрыве, МПа	57,8
Модуль упругости при растяжении, ГПа	3,3
Модуль упругости при изгибе, ГПа	2,3
Температура стеклования, °С	60...65
Плотность, г/см ³	1,23...1,38
Минимальная толщина стенок, мм	1
Точность печати, %	± 0,1
Размер мельчайших деталей, мм	0,3
Усадка при изготовлении изделий, %	–
Водопоглощение, %	0,5...50

АБС-пластик (акрилонитрилбутадиенстирол, ABS) – на сегодняшний день это самый популярный полимер из используемых в 3D-печати. АБС-пластик – это ударопрочный термопластичный полимер, полученный сополимеризацией акрилонитрила с бутадиеном и стиролом (название пластика образовано из начальных букв наименований мономеров). Пропорции этих компонентов (рис. 6.2) в составе АБС-пластика могут варьироваться в пределах 15...35 % для акрилонитрила, 5...30 % для бутадиена и 40...60 % для стирола.

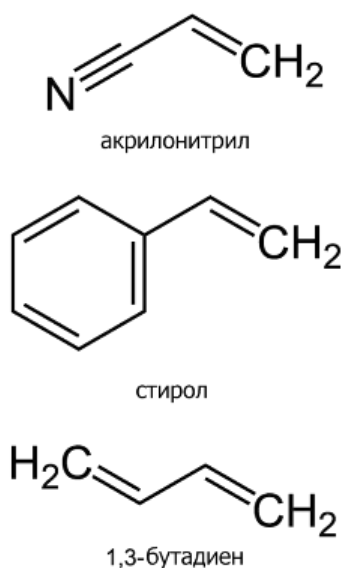


Рис. 6.2. Мономеры для синтеза АБС-пластика

Широкое распространение АБС обуславливается отличными механическими свойствами (см. табл. 6.1), долговечностью и низкой стоимостью этого материала. АБС-пластик получил широкое применение в промышленности. Он применяется для изготовления:

- деталей автомобилей (приборных щитков, элементов ручного управления, радиаторной решетки);
- корпусов крупной бытовой техники, радио- и телеаппаратуры, деталей электроосветительных и электронных приборов, пылесосов, кофеварок;
- пультов управления;
- телефонов, факсовых аппаратов, компьютеров, мониторов, принтеров, калькуляторов, другой бытовой и оргтехники;
- корпусов промышленных аккумуляторов;
- спортивного инвентаря;
- деталей оружия;
- мебели (рис. 6.3);
- сантехники;
- выключателей и тумблеров;
- канцелярских изделий;
- музыкальных инструментов;
- игрушек и детских конструкторов;
- чемоданов и контейнеров;
- деталей медицинского оборудования и медицинских принадлежностей;
- смарт-карт.



Рис. 6.3. Стулья из АБС-пластика¹⁸

¹⁸ Изображение взято с сайта: satu.kz. URL: <https://clck.ru/aVfVf> (дата обращения: 25.03.2026).

Кроме того, АБС-пластик применяется как добавка, повышающая теплостойкость и улучшающая перерабатываемость композиционных материалов на основе поливинилхлорида (ПВХ), как добавка, повышающая ударную вязкость полистирола, а также как добавка, снижающая цену поликарбонатов.

АБС-пластик устойчив к влаге, кислотам и маслу, имеет достаточно высокие показатели термоустойчивости: от 90 °С до 110 °С. К сожалению, некоторые виды материала разрушаются под воздействием прямого солнечного света, что несколько ограничивает применение. В то же время АБС-пластик легко поддается окраске, что позволяет наносить защитные покрытия на немеханические элементы.

Несмотря на относительно высокую температуру стеклования порядка 100 °С, АБС-пластик имеет относительно невысокую температуру плавления (табл. 6.2). Ввиду аморфности материала, АБС-пластик не имеет точки плавления как таковой, но приемлемой для экструзии считается температура в пределах 180...200 °С (примерно на одном уровне с полилактидом). Низкий интервал между температурами экструзии и стеклования способствует более быстрому застыванию АБС-пластика по сравнению с полилактидом.

Таблица 6.2

Свойства АБС-пластиков для 3D-печати

Показатель	Значение
Температура стеклования, °С	~ 105
Прочность на изгиб, МПа	41
Предел прочности на разрыв, МПа	22
Модуль упругости при растяжении, МПа	1627
Относительное удлинение, %	6
Усадка при охлаждении, %	До 0,8
Плотность материала, г/см ³	~ 1,05

Основным минусом АБС-пластика можно считать высокую степень усадки при охлаждении: материал может потерять до 0,8 % объема. Этот эффект может привести к значительным деформациям модели, закручиванию первых слоев и растрескиванию. Для борьбы с этими неприятными явлениями используются два основных решения.

Во-первых, применяются подогреваемые рабочие платформы, способствующие снижению градиента температур между нижними и верхними слоями модели. Во-вторых, 3D-принтеры для печати АБС-пластиком зачастую используют закрытые корпуса и регулировку фоновой температуры рабочей камеры. Это позволяет поддерживать температуру нанесенных слоев на отметке чуть ниже порога стеклования, снижая степень усадки. Полное охлаждение производится после получения готовой модели.

Относительно низкая «липучесть» АБС-пластика может потребовать дополнительных средств для схватывания с рабочей поверхностью, таких как клейкая лента, полиимидная пленка или нанесение раствора АБС-пластика в ацетоне на платформу непосредственно перед печатью.

В то время как при комнатной температуре АБС не представляет угрозы здоровью, при нагревании пластика выделяются пары акрилонитрила – ядовитого соединения, способного вызвать раздражение слизистых оболочек и отравление. Хотя объемы производимого акрилонитрата при маломасштабной печати незначительны, рекомендуется печатать в хорошо проветриваемых помещениях или предусмотреть вытяжку. Не рекомендуется использовать АБС-пластик для производства пищевых контейнеров и посуды (особенно для хранения горячей пищи или алкогольных напитков) или игрушек для маленьких детей.

Хорошая растворимость АБС-пластика в ацетоне весьма полезна, так как позволяет производить большие модели по частям с последующим склеиванием, что значительно расширяет возможности недорогих настольных принтеров. Некоторые виды АБС-пластика могут разрушаться под воздействием солнечного света.

Поливиниловый спирт (ПВС, poly(vinyl alcohol), PVA, PVAI) – искусственный, водорастворимый, термопластичный полимер (рис. 6.4). Синтез поливинилового спирта осуществляется реакцией щелочного либо кислотного гидролиза или алкоголиза сложных поливиниловых эфиров. ПВС – твердый полимер белого цвета без вкуса и запаха, нетоксичен. ПВС может кристаллизоваться при термообработке в интервале 80...225 °С, достигая степени кристалличности 68 %. Макромолекулы поливинилового спирта обычно содержат 1,0...2,5 % звеньев, присоединенных по типу «голова к голове», и имеют атактическое строение. Молекулярная масса ПВС в зависимости от способа получения лежит в пределах 5000...1000000.

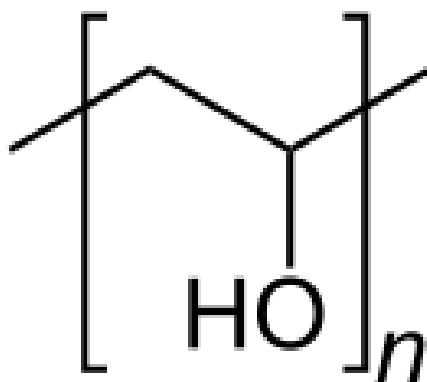


Рис. 6.4. Химическая формула ПВС

В отличие от большинства полимеров на основе виниловых мономеров, ПВС не может быть получен непосредственно из соответствующего винилового спирта (ВС). Основным сырьем для получения ПВС служит поливинилацетат (ПВА).

Помимо трехмерной печати, поливиниловый спирт так же широко применяется в различных отраслях промышленности, например, в качестве:

- клея для бумаги и плит;
- загустителя и модификатора клеев на основе поливинилацетата;
- клея для текстильных материалов;
- покрытий;
- водорастворимых пленок;
- глазных капель и смазок жестких контактных линз;
- армирующих добавок в бетоны;
- сырья для поливинилнитрата;
- поверхностно-активных веществ (ПАВ);
- защитных перчаток;
- агента эмболизации в медицинских процедурах.

Поливиниловый спирт обладает уникальными свойствами и особой областью применения. Главной особенностью ПВС является его водорастворимость. 3D-принтеры, оснащенные двойными экструдерами, имеют возможность печати моделей с опорными структурами из ПВС (рис. 6.5).

После завершения печати опоры могут быть растворены в воде, оставляя готовую модель, не требующую механической или химической обработки. Подобным образом поливиниловый спирт можно применять для создания водорастворимых мастер-моделей для литейных форм и самих литейных форм.

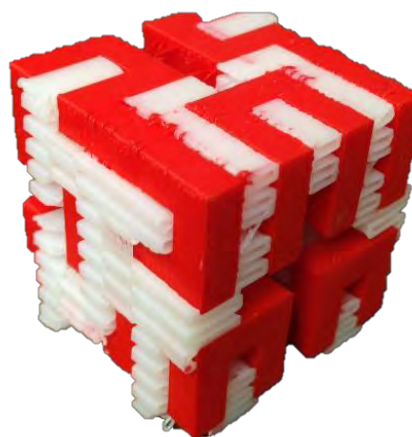


Рис. 6.5. Модель, распечатанная из АБС-пластика (красный) и ПВС-пластика (белый). Опорные конструкции из ПВС подлежат удалению простым растворением в воде¹⁹

Механические свойства ПВС достаточно интересны (табл. 6.3). При низкой влажности пластик обладает высокой прочностью на разрыв. При повышении влажности уменьшается прочность, но возрастает эластичность. Температура экструзии составляет 160...175 °С, что позволяет использовать ПВС в принтерах, предназначенных для печати АБС и ПЛА-пластиков.

Таблица 6.3

Свойства поливинилового спирта

Показатель	Значение
Молекулярная масса, а. е.	5000...200000
Степень кристалличности, %	30...70
Плотность, г/см ³	1,27...1,3
Температура плавления, °С	220...230
Температура стеклования, °С	85...90
Температура деструкции, °С	230
Теплостойкость по Мартенсу, °С	140
Теплостойкость по Вика, °С	160
Предел прочности при растяжении, МПа	60...120
Относительное удлинение при растяжении, %	10...30

¹⁹ Изображение взято с сайта: 3dtoday.ru. URL: <https://clck.ru/OoiSz> (дата обращения: 25.03.2026).

Так как материал легко впитывает влагу, рекомендуется хранение ПВС-пластика в сухой упаковке и при необходимости просушка перед использованием. Сушку можно производить в гончарной печи или обыкновенной духовке. Как правило, просушка стандартных катушек занимает 6...8 ч при температуре 60...80 °С. Нагревание выше температуры 220 °С приведет к разложению пластика, что необходимо учитывать при печати.

Нейлоном называют представителей семейства синтетических полиамидов, используемых преимущественно в производстве волокон. Под этим термином чаще всего понимаются полигексаметиленадипинамид (анид или нейлон-66) либо поли-ε-капроамид (капрон или нейлон-6). Химические формулы основных разновидностей нейлона показаны на рис. 6.6. Две эти разновидности нейлона очень схожи. С точки зрения 3D-печати основным различием является температура плавления: нейлон-6 плавится при температуре 220 °С, а нейлон-66 – при 265 °С (табл. 6.4). Наиболее популярным в трехмерной печати является нейлон-66. Этот полимер был разработан американской компанией DuPont в 1935 г.

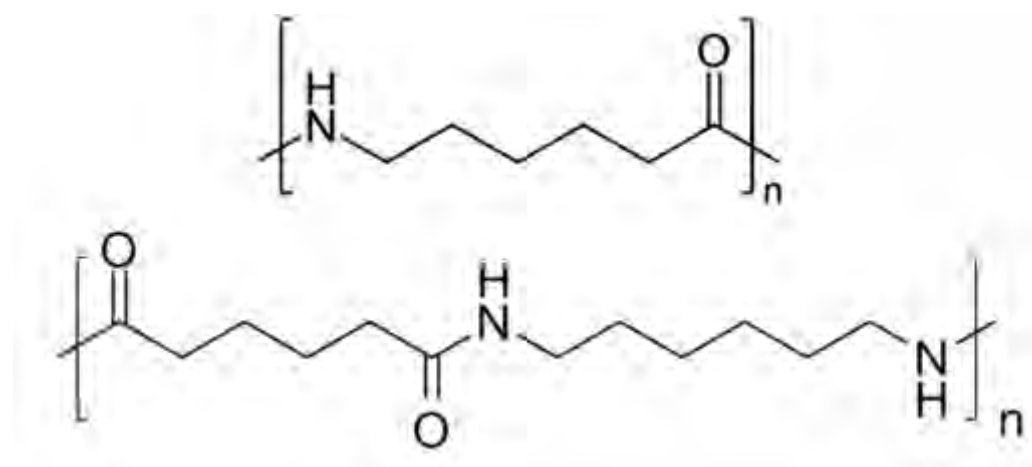


Рис. 6.6. Химическая формула нейлона
(капрон – сверху, анид – снизу)

В кристаллических участках макромолекулы нейлонов имеют конформацию плоского зигзага с образованием с соседними молекулами водородных связей между атомами кислорода карбонила и атомами водорода соседних амидных групп. Вследствие этого нейлоны обладают более высокими по сравнению с полиэфирами и полиолефинами физико-механическими свойствами, более высокой степенью кристалличности (40...60 %) и температурами стеклования и плавления.

Таблица 6.4

Свойства нейлона

Свойства	ПА-66	ПА-6
Степень кристалличности, %	40...60	
Плотность, г/см ³	1,14...1,15	1,13...1,15
Модуль упругости, МПа	1700	1100
Ударная вязкость с надрезом при, по Шарпи, кДж/м ²	12	20
Температура плавления, °С	260	222
Относительное удлинение при растяжении, %	16...60	
Водопоглощение, %	2,50	3,00
Плотность сухого материала, г/см ³	1,14	1,14

При повышении степени кристалличности нейлонов их прочностные характеристики улучшаются. Такое повышение кристалличности происходит и при холодной вытяжке волокна на 400...600 %. Происходящая при этом ориентация макромолекул в направлении вытяжки ведет к повышению кристалличности и упрочнению волокна в 4...6 раз.

В промышленности нейлон применяется для изготовления втулок, вкладышей, пленок и тонких покрытий. Нейлон, нанесенный на трущиеся поверхности в виде облицовки или тонкослойного покрытия на тонкие металлические втулки, вкладыши и корпуса подшипников, повышает их эксплуатационные качества. В подшипниковых узлах трения удельные давления, диапазон рабочих температур примерно такие же, как у баббита. Нейлон имеет низкий коэффициент трения и низкую температуру на трущихся поверхностях. Коэффициент трения у нейлона при работе по стали без смазки или при недостаточной смазке равен 0,17...0,20, с масляной смазкой – 0,014...0,020, с водой в качестве смазки – 0,02...0,05. Хорошие антифрикционные свойства позволяют применять нейлон в парах трения без смазки или при недостаточной смазке. Лучшим смазывающим материалом для композитов на основе нейлона являются минеральные масла, эмульсии и вода. При температурах до 150° на нейлон не влияют минеральные масла, консистентные смазки. Он не растворяется в большинстве органических растворителей, не поддается воздействию слабых растворов кислот, щелочей и соленой воды.

Нейлон привлекателен своей высокой износоустойчивостью и низким коэффициентом трения. Так, нейлон зачастую используется для покрытия трущихся деталей, что повышает их эксплуатационные

качества и зачастую позволяет функционировать без смазки. Вслед за широким применением нейлона в промышленности материалом заинтересовались и в сфере аддитивного производства. Попытки печатать нейлоном предпринимались практически с первых дней технологии послойного наплавления.

Многие любители предпочитают использовать нейлоновые нити, доступные в широкой продаже, такие как проволока для садовых триммеров. Диаметр таких нитей зачастую соответствует диаметру стандартных экструзионных расходных материалов, что делает их использование весьма заманчивым. В то же время подобные продукты, как правило, не являются чистым нейлоном. В случае с прутками для триммеров материал состоит из нейлона и стеклопластика для оптимального сочетания гибкости и жесткости. Высокая прочность нейлона делает его незаменимым при изготовлении парашютных тканей, строп и лямок. Во время Второй мировой войны большая часть нейлона использовалась именно для этих целей. Высокая прочность и хорошая гибкость дают возможность использовать нейлон в качестве швейных ниток, лент и канатов (рис. 6.7). Существует множество и других областей, где нейлон находит применение, однако в наибольшей степени превосходные свойства нейлона проявляются в трикотажных изделиях и дамских чулках. Предполагается, что нейлон в возрастающих количествах будет использоваться также в ковровом производстве. Нейлоновые ковры обладают продолжительным сроком службы даже в тяжелых условиях эксплуатации, меньше загрязняются и легко чистятся.



Рис. 6.7. Нейлоновая лента²⁰

²⁰ Изображение взято с сайта: profibeg.by. URL: <https://profibeg.by/polipropilenovaya-stropa> (дата обращения: 26.03.2026).

В последнее время предпринимаются попытки коммерческой разработки печатных материалов на основе нейлона специально для устройств печати эрозионного типа, в том числе Nylon-РА6 и Taulman 680. Указанные марки подлежат экструзии при температуре 230...260 °С.

Так как нейлон легко впитывает влагу, расходный материал следует хранить в вакуумной упаковке или контейнере с абсорбирующим агентом. Признаком чрезмерно влажного материала является пар, исходящий из сопла во время печати. Это не опасно, однако может значительно ухудшить качество модели.

При печати нейлоном не рекомендуется использовать полиимидное покрытие рабочего стола, так как эти материалы легко сплавляются друг с другом. В этом случае в качестве покрытия рекомендуется применять липкую ленту с восковой пропиткой (*masking tape*). Использование подогреваемой платформы позволяет снизить возможность деформации модели аналогично печати АБС-пластиком. В связи с низким коэффициентом трения нейлона следует использовать экструдеры с шипованными протягивающими механизмами.

Слои нейлона, наносимые принтером, имеют отличную адгезию друг к другу, что минимизирует вероятность расслоения моделей. Однако после застывания нейлон плохо поддается склеиванию, поэтому печать крупных моделей из составных частей затруднительна. Альтернативой склеиванию может являться сплавка. Так как при нагревании нейлона возможно выделение токсичных паров, рекомендуется производить печать в хорошо вентилируемых помещениях или с использованием вытяжки.

Поликарбонаты – термопластичные полимеры, представляющие собой сложные полиэфиры угольной кислоты и различных двухатомных спиртов. Общая формула поликарбонатов имеет следующий вид: $(-O-R-O-CO-)_n$. Наибольшее промышленное значение имеют ароматические поликарбонаты, в первую очередь, поликарбонат на основе бисфенола А (рис. 6.8). Это объясняется широкой доступностью бисфенола А, который может быть синтезирован конденсацией фенола и ацетона [20].

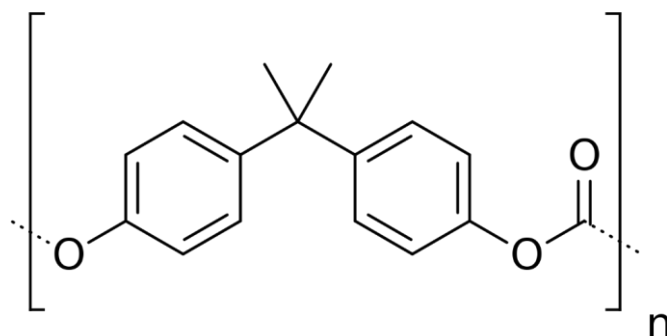


Рис. 6.8. Химическая формула поликарбоната, полученного на основе бисфенола А

Поликарбонаты привлекательны за счет своей высокой прочности и ударной вязкости, а также устойчивости к высоким и низким температурам (табл. 6.5). Стоит отметить потенциальный риск для здоровья при печати: в качестве сырья зачастую используется токсичное и потенциально карциногенное соединение бисфенол А. Остаточный бисфенол А может содержаться в готовых изделиях из поликарбоната и испаряться при нагревании. Поэтому печать моделей из поликарбоната рекомендуется производить в хорошо вентилируемых помещениях.

Таблица 6.5

Свойства поликарбоната на основе бисфенола А

Показатель	Значение
Молекулярная масса, а. е.	20000...120000
Степень кристалличности, %	Аморфный
Плотность, г/см ³	1,2
Температура размягчения, °С	220
Температура стеклования, °С	150
Температура деструкции, °С	310...320
Теплостойкость по Вика, °С	150...155
Предел прочности при растяжении, МПа	65...70
Предел прочности при изгибе, МПа	95

Температура экструзии поликарбоната зависит от скорости печати. Высокие скорости при низких температурах могут стать причиной растрескивания изделий. Минимальной температурой при скорости печати 30 мм/с можно считать 265 °С. При печати рекомендуется

использование полиимидной пленки для лучшего схватывания с поверхностью рабочего стола. Высокая склонность поликарбоната к деформации требует использования подогреваемой платформы и при возможности закрытого корпуса с подогревом рабочей камеры.

Поликарбонат обладает высокой гигроскопичностью (легко поглощает влагу из атмосферы), поэтому требуется хранение материала в сухих условиях во избежание образования пузырьков в наносимых слоях. В случае длительной печати во влажном климате может потребоваться хранение рабочей катушки во влагозащитном контейнере.

Полиэтилен – термопластичный полимер этилена, относящийся к классу полиолефинов (рис. 6.9). Полиэтилен – самый распространенный синтетический термопласт в мире.

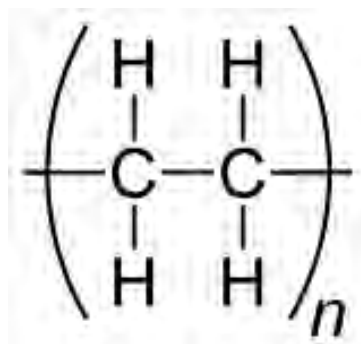


Рис. 6.9. Химическая формула полиэтилена

В зависимости от способа получения различают полиэтилен высокого давления, или низкой плотности (ПЭВД), и полиэтилен низкого давления, или высокой плотности (ПЭНД). Они отличаются друг от друга структурой макромолекул (наличием у полиэтилена высокого давления длинноцепочечных ответвлений), следовательно, и свойствами (табл. 6.6).

Таблица 6.6

Свойства полиэтилена

Показатель	Значение	
	ПЭВД	ПЭНД
Молекулярная масса, а. е.	30000...40000	50000...5000000
Степень кристалличности, %	60	70...90
Плотность, г/см ³	0,913...0,930	0,910...0,970
Температура плавления, °С	105...120	125...140
Твердость по Бринеллю, МПа	15...25	50...70

Окончание табл. 6.6.

Показатель	Значение	
	ПЭВД	ПЭНД
Ударная вязкость с надрезом, кДж/м ²	–	2...45
Предел прочности при растяжении, МПа	9...16	10...30
Относительное удлинение при растяжении, %	100...800	50...1200

Полиэтилен легко плавится (при температуре 130...145 °С) и быстро застывает (при температуре 100...120 °С), вследствие чего наносимые слои зачастую не успевают схватываться. Кроме того, полиэтилен отличается высокой усадкой, что провоцирует закрутку первых слоев и деформацию моделей в целом при неравномерном застывании. Печать полиэтиленом требует использования подогреваемой платформы и рабочей камеры с аккуратной регулировкой температурного режима для замедления остывания нанесенных слоев. Кроме того, потребуется производить печать на высокой скорости.

Полиэтилен относительно мало представлен среди материалов для трехмерной печати. Причиной тому служат сложности при послойном изготовлении моделей.

Трудности в использовании легко компенсируются дешевизной и общедоступностью этого материала. В последнее время были разработаны несколько устройств для переработки пластиковых отходов ПЭНД (бутылок, пищевой упаковки и пр.) в стандартные нити для печати на экструзионных принтерах. Примерами служат *FilaBot* и *RecycleBot*. За счет простоты конструкции устройства *RecycleBot* зачастую собираются силами энтузиастов. При плавлении полиэтилена происходит эмиссия паров вредных веществ, поэтому рекомендуется производить печать в хорошо вентилируемых помещениях.

Полипропилен (ПП) – термопластичный полимер пропилена (рис. 6.10). Полипропилен широко применяется в производстве упаковочных материалов, посуды, шприцов, труб нетканых материалов и электроизоляции. Полипропилен имеет низкую плотность, нетоксичен, обладает высокой химической стойкостью, устойчив к влаге и износу и достаточно дешев (табл. 6.7). Среди недостатков полипропилена следует отметить низкую морозостойкость (при отрицательных температурах материал становится хрупким) и уязвимость к прямому воздействию солнечного света.

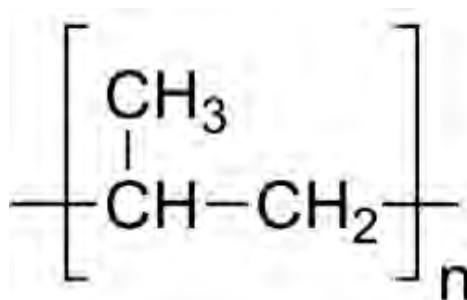


Рис. 6.10. Химическая формула полипропилена

Главной трудностью при печати полипропиленом является высокая усадка материала при охлаждении – до 2,4 %. Для сравнения: усадка АБС-пластика достигает 0,8 %. Несмотря на то, что полипропилен хорошо прилипает к холодным поверхностям, рекомендуется производить печать на подогреваемой платформе для предотвращения деформации моделей. Минимальная рекомендуемая температура экструзии полипропилена составляет 220 °С.

Таблица 6.7

Свойства полипропилена

Показатель	Значение
Молекулярная масса, а. е.	75000...300000
Степень кристалличности, %	До 75 %
Плотность, г/см ³	0,90...0,91
Температура плавления, °С	160...180
Температура стеклования, °С	от –10 до –20
Морозостойкость, °С	от –5 до –25
Теплостойкость по Вика, °С	95...110
Предел прочности при растяжении, МПа	30...35
Ударная вязкость с надрезом, кДж/м ²	5...12

Полипропиленовые нити для печати предлагаются на продажу компаниями *Orbi-Tech*, *German RepRap*, *Qingdao TSD*. Компания *Stratasys* разработала имитатор полипропилена, оптимизированный для 3D-печати, под названием *Endur*.

Поликапролактон – биоразлагаемый полиэфир, синтезируемый из ε-капролактона (рис. 6.11). Главной отличительной чертой поликапролактона является чрезвычайно низкая температура плавления –

60 °С. Благодаря этому материал идеально подходит для моделирования и быстрого прототипирования. Управлением по контролю качества пищевых продуктов и лекарственных препаратов США поликапролактон разрешен для биомедицинского применения. Перспективным направлением применения материала является производство саморассасывающихся имплантов и хирургических нитей.

Легкоплавкость поликапролактона приводит к определенным трудностям при трехмерной печати, так как далеко не все 3D-принтеры можно настроить для работы при столь низких температурах. Нагревание поликапролактона до привычных экструзионных температур (около 200 °С) вызывает потерю механических свойств и может привести к поломке экструдера.

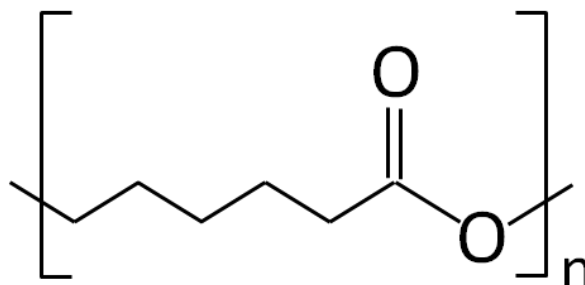


Рис. 6.11. Химическая формула поликапролактона

Поликапролактон нетоксичен, что обуславливает его применение в медицинской отрасли, и биоразлагаем. При попадании в организм поликапролактон распадается, что делает печать этим материалом безопасной. Благодаря низкой температуре плавления отсутствует опасность ожогов при прикосновении к свежим моделям. Высокая пластичность материала делает возможным многократное использование. Плотность поликапролактона составляет 1,15 г/см³.

Поликапролактон малоприспособен для создания функциональных механических моделей ввиду вязкости (температура стеклования составляет 60 °С) и низкой теплостойкости. С другой стороны, этот материал прекрасно подходит для производства макетов и пищевой упаковки. Материал легко слипается с поверхностью даже холодного рабочего стола и легко поддается окраске.

Полифенилсульфон – высокопрочный термопластичный полимер (рис. 6.12), активно применяемый в авиационной промышленности. Материал имеет прекрасную химическую и тепловую устойчи-

вость и практически не горит. Полифенилсульфон биологически инертен, что позволяет использовать этот материал для производства посуды и пищевых контейнеров. Диапазон эксплуатационных температур полифенилсульфона составляет от -50 до 180 °С. Материал устойчив к воздействию растворителей и горюче-смазочных материалов. Плотность полифенилсульфона составляет $1,29$ г/см³, предел текучести – 76 МПа.

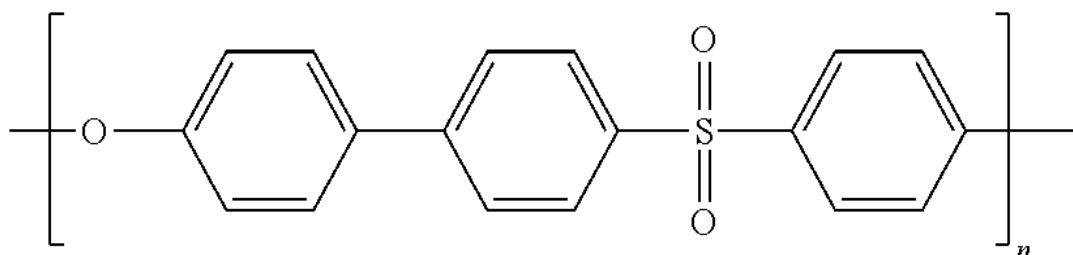


Рис. 6.12. Химическая формула полифенилсульфона

При всех своих достоинствах полифенилсульфон редко используется в 3D-печати ввиду высокой температуры плавления, достигающей 370 °С. Такие температуры экструзии не под силу большинству настольных принтеров, хотя теоретически печать возможна при использовании керамических сопел. В настоящее время единственным активным пользователем материала является компания Stratasys, предлагающая промышленные установки Fortus.

Полиметилметакрилат (ПММА) – синтетический виниловый полимер метилметакрилата (рис. 6.13), термопластичный прозрачный пластик, широко известен как оргстекло. Полиметилметакрилат прочен, влагуустойчив, безопасен для окружающей среды, легко поддается склеиванию, достаточно пластичен и устойчив к воздействию прямого солнечного света. Технические характеристики ПММА представлены в табл. 6.8.

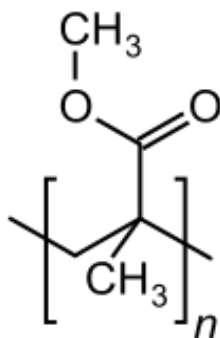


Рис. 6.13. Химическая формула полиметилметакрилата

Таблица 6.8

Характеристики полиметилметакрилата

Показатель	Значение
Молекулярная масса, а. е.	400000...500000
Степень кристалличности, %	Аморфный
Плотность, г/см ³	1,2
Температура плавления, °С	160...180
Температура размягчения, °С	95...105
Относительное удлинение при растяжении, %	4...5
Предел прочности при растяжении, МПа	70
Ударная вязкость, кДж/м ²	18...20
Модуль упругости при растяжении, МПа	3000...3500

Полиметилметакрилат плохо подходит для экструзионной 3D-печати в силу ряда причин. ПММА плохо хранится в виде катушек с нитью, так как постоянное механическое напряжение приводит к постепенному разрушению материала. Чтобы избежать образования в печатном изделии пузырьков, разрешение печати должно быть очень высоким. Такое разрешение практически недоступно для домашних принтеров. Быстрое застывание полиметилметакрилата же требует жесткого климатического контроля рабочей камеры и высокой скорости печати. Показатели скорости печати принтеров экструзионного типа обратно пропорциональны разрешению, что усугубляет проблему.

Тем не менее попытки печати полиметилметакрилатом предпринимаются регулярно. Некоторые из них дают положительные результаты. Однако при создании достаточно прочных моделей избежать образования пузырьков и достигнуть привычной прозрачности материала пока не удается.

На данный момент наилучшие результаты с полиметилметакрилатом показывает другая технология печати – многоструйное моделирование (MJM) от компании 3D Systems. В данном случае используется фотополимерный вариант акрила. Значительных успехов достигла и компания Stratasys, использующая собственный фотополимерный имитатор акрила VeroClear на принтерах марки Objet Eden. Остается надеяться, что высокий спрос на акрил приведет к появлению композитных материалов на основе полиметилметакрилата, предназначенных специально для печати методом послойного наплавления.

Полиэтилентерефталат (ПЭТФ) – продукт поликонденсации этиленгликоля с терефталевой кислотой или ее диметиловым эфиром (рис. 6.14). Это твердое, бесцветное, прозрачное вещество в аморфном состоянии и белое, непрозрачное в кристаллическом состоянии. Материал используется для производства пластиковых бутылок и другой пищевой и медицинской тары. Полиэтилентерефталат имеет высокую химическую устойчивость к кислотам, щелочам и органическим растворителям. Полиэтилентерефталат (табл. 6.9) обладает высокой износоустойчивостью и стойкостью к широкому диапазону температур – от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кроме того, ПЭТФ легко поддается механической обработке.

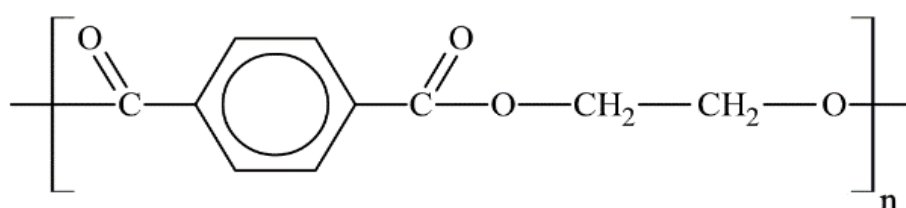


Рис. 6.14. Химическая формула ПЭТФ

Таблица 6.9

Свойства полиэтилентерефталата

Показатель	Значение
Молекулярная масса, а. е.	20000...50000
Степень кристалличности, %	2,5...65
Плотность, г/см ³	1,4
Температура размягчения, $^{\circ}\text{C}$	240
Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$	260
Температура разложения, $^{\circ}\text{C}$	340
Температура стеклования, $^{\circ}\text{C}$	70
Морозостойкость, $^{\circ}\text{C}$	-60
Предел прочности при растяжении, МПа	170
Ударная вязкость, кДж/м ²	9
Модуль упругости при растяжении, МПа	3500

Печать с использованием ПЭТФ несколько проблематична ввиду сравнительно высокой температуры плавления, достигающей $260\text{ }^{\circ}\text{C}$, и значительной усадки при остывании, составляющей до 2 %. Использование ПЭТФ в качестве расходного материала требует примерно тех

же условий, что и печать АБС-пластиком. Для достижения прозрачности моделей необходимо быстрое охлаждение при прохождении порога стеклования, составляющего 70...80 °С.

Материал стал предметом внимания умельцев, применяющих использованную тару в качестве сырья для бытового производства расходных материалов для 3D-печати. Для изготовления нитей используются такие перерабатывающие устройства, как FilaBot или RecycleBot.

Полистирол – термопластичный полимер (рис. 6.15), продукт полимеризации стирола (винилбензола). Полистирол обладает линейной структурой. Материал широко используется в промышленности для производства различных бытовых изделий, строительных материалов, одноразовой посуды, игрушек, медицинских инструментов и пр.

При трехмерной печати полистирол демонстрирует физические свойства (табл. 6.10), схожие с АБС-пластиком, что делает этот материал все более популярным среди потребителей.

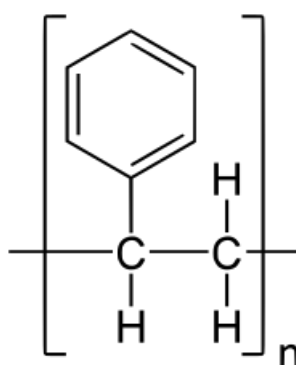


Рис. 6.15. Химическая формула полистирола

Таблица 6.10

Свойства полистирола

Показатель	Значение
Молекулярная масса, а. е.	60000...26000
Степень кристалличности, %	Аморфный
Плотность, г/см ³	1,069...1,125
Теплостойкость по Мартенсу, °С	93
Температура плавления, °С	240
Температура разложения, °С	290
Температура стеклования, °С	93
Твердость по Бринеллю, МПа	140...200
Предел прочности при растяжении, МПа	40...50
Ударная вязкость с надрезом, по Шарпи, кДж/м ²	1,5...2,0
Модуль упругости при изгибе, ГПа	3,2

Наиболее привлекательной особенностью полистирола являются его специфические химические свойства: полистирол легко поддается растворению в органическом растворителе – лимонене. Так как АБС-пластик в лимонене не растворяется, возможно использование полистирола в качестве материала для построения растворимых поддерживающих структур, что исключительно полезно при построении сложных, переплетенных моделей с внутренними опорами. В сравнении с водорастворимым поливиниловым спиртом, полистирол выгодно отличается относительно низкой стоимостью и устойчивостью к влажному климату, затрудняющему работу с ПВС.

Стоит иметь в виду, что некоторые производители филаментов из АБС-пластика используют в своей продукции несколько более дешевый полистирол. Соответственно, модели из таких материалов могут раствориться в лимонене вместе с опорными структурами.

При нагревании полистирола до температуры экструзии возможно выделение токсичных испарений, поэтому рекомендуется осуществлять печать в хорошо проветриваемых помещениях.

Древесно-полимерные композиционные материалы (ДПК) – недавняя разработка компании LAYWOO-D3 (рис. 6.16), предназначенная для печати моделей, которые напоминают деревянные изделия. Материал на 40 % состоит из натуральных древесных опилок микроскопического размера и на 60 % из связующего полимера (полимерной матрицы). В качестве полимерных матриц для LAYWOO-D3 он весьма прост в обращении, будучи практически неподверженным деформациям и не требующим использования подогреваемой платформы. Согласно производителям, материал нетоксичен и полностью безопасен.



Рис. 6.16. Филамент LAYWOO-D3²¹

²¹ Изображение взято с сайта: www.mc-fact.eu. URL: <https://clck.ru/dEhEE> (дата обращения: 26.03.2026).

Уникальные свойства материала позволяют добиваться различных визуальных результатов при печати с разными температурами сопла. Диапазон рабочих температур составляет 180...250 °С. По мере увеличения температуры экструзии оттенок материала становится прогрессивно более темным, позволяя имитировать разные сорта древесины или годовые кольца.

Готовые модели (рис. 6.17) прекрасно поддаются механической обработке – шлифовке, сверлению и пр. Кроме того, изделия легко окрашиваются, а неокрашенные модели даже имеют характерный древесный запах.



Рис. 6.17. Модели, полученные из ДПК-филамента²²

В настоящее время ведется разработка и тестирование альтернативных материалов, таких как *BambooFill* (рис. 6.18) от голландской компании *ColorFabb*. В состав композита входит примерно 80 % полилактида и 20 % мас. вторичного бамбукового волокна.



Рис. 6.18. Модели, полученные из филамента *BambooFill*²³

²² Изображение взято с сайта: www.acc.com. URL: <https://clck.ru/MXbEt> (дата обращения: 26.03.2026).

²³ Изображение взято с сайта: 3dinusmos.com.ar. URL: <https://clck.ru/GJyjK> (дата обращения: 26.03.2026).

К сожалению, стоимость древесно-полимерных композитов значительно превышает цену на такие популярные печатные материалы, такие как полилактид и АБС-пластик. По мере роста популярности древесно-полимерных композиционных материалов в трехмерной печати ожидается снижение их стоимости.

Композиты, имитирующие минералы. Представленный изобретателем Каем Парти композитный материал является собой сочетание полимерной матрицы и минерального наполнителя. Различные комбинации компонентов материалов позволяют производить объекты с различной текстурой поверхности. При низких температурах экструзии порядка 165...190 °С готовые изделия имеют гладкую поверхность. Повышение температуры печати делает материал более шершавым. При температуре экструзии свыше 210 °С материал обретает высокую степень сходства с натуральным песчаником.

Материал легок в работе, не требует подогрева рабочей платформы, не демонстрирует существенных деформаций при усадке и не выделяет токсичных испарений при нагревании. Единственным недостатком материала можно считать его достаточно высокую стоимость, что обусловлено малыми масштабами производства.

Композиты, имитирующие металлы. Металлы привлекают сторонников аддитивного производства с ранних дней технологий 3D-печати. К сожалению, печать чистыми металлами и сплавами вызывает массу трудностей, непреодолимых для большинства методов 3D-печати. Полностью функциональные металлические изделия можно произвести только с помощью таких технологий, как селективное лазерное спекание, прямое лазерное спекание металлов или электронно-лучевая плавка, требующих использования промышленных установок, чья стоимость исчисляется сотнями тысяч долларов. В то же время имитаторы металлов успешно используются в струйной 3D-печати (3DP), где формирование изделий происходит из металлических порошков, частицы которых скрепляются наносимым связующим материалом. В экструзионной печати металлические имитаторы лишь появляются на свет.

Интересным примером служит филамент *BronzeFill* (рис. 6.19) – фактически прозрачный полилактид с наполнителем из микрочастиц бронзы. Материал, в настоящее время проходящий бета-тестирование, должен доказать пригодность для использования в любых принтерах, предназначенных для работы с полилактидом.



Рис. 6.19. Модели, полученные из филамента *BronzeFill*²⁴

Готовые изделия легко поддаются полировке, достигая высокого внешнего сходства с цельнометаллическими изделиями. В то же время стоит учитывать, что связующим элементом материала является термопластичный полимер с соответствующими механическими и температурными ограничениями.

6.2. Полимерные порошки

Полимерные порошки являются основным классом материалов, используемых в технологиях селективного лазерного спекания (SLS) и многоструйного плавления (MJF). Их уникальные свойства определяют качество печати, эксплуатационные характеристики готовых изделий и области применения. Наибольшее распространение получили полиамиды ПА-12 и ПА-11, а также термопластичный полиуретан (ТПУ) (табл. 6.11).

ПА-12 (полиамид-12) – наиболее распространенный материал для SLS и MJF. Он характеризуется хорошим балансом механических свойств: высокой прочностью, износостойкостью и стабильностью размеров. Детали из ПА-12 обладают низким водопоглощением, устойчивы к маслам и химическим веществам, что делает их пригодными для машиностроения, автомобильной и медицинской промышленности. Материал позволяет получать изделия с точной геометрией и однородной поверхностью, что особенно важно для серийного производства.

²⁴ Изображение взято с сайта: learn.adafruit.com. URL: <https://clck.ru/vafov> (дата обращения: 26.03.2026).

Таблица 6.11

Сравнение полимерных порошков для SLS/MJF

Характеристика	ПА-12	ПА-11	ТПУ
Механические свойства	Высокая прочность, жесткость, низкое водопоглощение	Более высокая ударная вязкость, гибкость и эластичность	Эластичность, высокая упругость, стойкость к истиранию
Термостойкость	Хорошая, до 170...180 °С	Сопоставимая с ПА-12, иногда выше	Средняя, ограничена мягкостью материала
Химическая стойкость	Устойчив к маслам, топливу, большинству химикатов	Хорошая химическая стойкость, лучше к ударным нагрузкам	Устойчив к абразивному износу, менее стойкий к маслам
Применение	Автомобилестроение, машиностроение, медицина, серийные функциональные детали	Аэрокосмос, медицина (протезы, ортезы), детали с повышенной гибкостью	Уплотнители, прокладки, гибкие соединения, обувь, спортивный инвентарь
Особенности	Универсальный баланс свойств, эталонный материал для SLS/MJF	Экологичность, высокая ударная вязкость, гибкость	Максимальная эластичность и амортизация, ограниченная жесткость

ПА-11 (полиамид-11) является материалом, производимым из касторового масла, что делает его более экологичным и устойчивым к сырьевым ограничениям. По сравнению с ПА-12 он обладает большей гибкостью и ударной вязкостью, лучше выдерживает динамические нагрузки. ПА-11 часто применяется в аэрокосмической и автомобильной промышленности, а также в медицине – для производства ортопедических изделий и протезов, где требуется сочетание прочности и эластичности.

ТПУ (термопластичный полиуретан) представляет собой эластомерный материал, отличающийся высокой гибкостью, упругостью и устойчивостью к истиранию. Его ключевое преимущество заключается в способности восстанавливать форму после деформации, что делает ТПУ идеальным выбором для гибких соединений, амортизирующих элементов, уплотнителей и прототипов изделий, требующих эластичности. В аддитивном производстве ТПУ используется для печати деталей с заданными амортизационными характеристиками, что расширяет возможности индивидуализации продукции.

Объединяет эти материалы высокая пригодность к серийному производству: порошки хорошо поддаются переработке, допускают повторное использование части несформованного материала и обеспечивают стабильное качество при больших тиражах. Выбор между ПА-12, ПА-11 и ТПУ зависит от требуемого баланса прочности, жесткости и эластичности изделия.

Таким образом, полиамидные и полиуретановые порошки формируют основу полимерного аддитивного производства в SLS и MJF, обеспечивая широкий диапазон свойств – от жестких и прочных до гибких и упругих. Развитие этих материалов, включая модификации с наполнителями, позволяет расширять области применения и адаптировать технологии под конкретные задачи промышленности.

6.3. Фотополимерные смолы

Фотополимерные смолы являются одним из ключевых классов материалов, применяемых в аддитивных технологиях на основе стереолитографии (SLA), цифровой проекционной печати (DLP) и сопоставимых методов. Их особенность заключается в том, что под действием света определенной длины волны (обычно ультрафиолетового) смолы полимеризуются, формируя твердую структуру с высокой точностью и качеством поверхности. Разнообразие смол позволяет адаптировать печать под конкретные задачи: от прототипирования и литьевых форм до производства функциональных изделий (табл. 6.12).

К базовым видам смол относятся стандартные фотополимеры, которые обеспечивают хорошее качество печати и точность, но обладают ограниченными механическими свойствами и сравнительно высокой хрупкостью. Они широко применяются для визуальных прототипов, макетов и демонстрационных моделей.

Для задач, связанных с изготовлением мастер-моделей в литьевых процессах, используются литьевые (*castable*) смолы. Их особенность заключается в способности полностью выгорать без остаточной золы, что делает их подходящими для ювелирного производства и стоматологии при создании литейных форм.

Гибкие смолы позволяют имитировать эластичные материалы, такие как силиконы и резины. Они применяются при производстве мягких элементов протезов, амортизирующих вставок, уплотнителей и деталей, требующих определенной степени деформации. Однако долговечность таких смол пока уступает промышленным эластомерам.

Таблица 6.12

Сравнение фотополимерных смол

Тип смолы	Свойства	Применение	Особенности
Стандартные	Высокая точность, гладкая поверхность, умеренная прочность	Визуальные прототипы, макеты, демонстрационные модели	Доступные, но хрупкие
Литьевые (<i>castable</i>)	Полностью выгорают без золы, высокая детализация	Ювелирное производство, стоматология, литье по выплавляемым моделям	Требуют точного температурного контроля при выгорании
Гибкие	Эластичность, деформируемость, мягкость	Протезирование, уплотнители, амортизирующие элементы	Ограниченная долговечность по сравнению с промышленными эластомерами
Ударопрочные	Повышенная прочность и вязкость разрушения, стойкость к нагрузкам	Функциональные детали, корпуса, прототипы, испытывающие механические нагрузки	Могут уступать по жесткости традиционным инженерным пластикам
Керамо-наполненные	Высокая твердость, термостойкость после спекания	Биомедицина, электроника, конструкционные детали	Требуют дебиндинга и спекания, возможна усадка
Металло-наполненные	Прочность и долговечность после спекания, свойства близки к металлическим сплавам	Машиностроение, медицина, аэрокосмическая отрасль	Высокие требования к постобработке, контролю температуры и усадки

Для задач, где требуется устойчивость к ударам и нагрузкам, разработаны ударопрочные смолы. Эти материалы обеспечивают повышенную вязкость разрушения и пригодны для создания функциональных деталей, корпусов и элементов, работающих в условиях динамических нагрузок.

Новым направлением в развитии фотополимеров стали смолы с наполнителями, прежде всего керамическими и металлическими. В таких материалах частицы порошка (оксиды, карбиды или металлические порошки) равномерно распределены в полимерной матрице. После печати изделие подвергается процессам дебиндинга (удаления

органической связки) и последующего высокотемпературного спекания. В результате получается полностью керамическая или металлическая деталь, обладающая высокой прочностью, термостойкостью и долговечностью. Этот подход фактически превращает фотополимерные технологии в инструмент для производства функциональных компонентов из традиционных инженерных материалов.

Появление керамо- и металлонаполненных смол открывает новые возможности для машиностроения, медицины, электроники и других отраслей, где требуются сложные геометрии и высокие эксплуатационные характеристики. Вместе с тем технология предъявляет высокие требования к постобработке, точности поддержания температурных режимов при спекании и контролю усадки.

Таким образом, эволюция фотополимерных смол движется в сторону повышения функциональности: от базовых прототипов к материалам, способным обеспечивать производство готовых изделий. Особенно перспективными выглядят наполненные смолы, которые расширяют границы применения фотополимерной печати и позволяют сочетать точность аддитивных технологий с традиционными свойствами керамики и металлов.

Глава 7. Металлические и керамические материалы

Металлические и керамические материалы занимают важное место в современном аддитивном производстве, обеспечивая изделиям высокие эксплуатационные характеристики, недостижимые при использовании полимеров. Металлы востребованы там, где требуется прочность, износостойкость и термостойкость, в то время как керамика ценится за химическую инертность, биосовместимость и способность работать в условиях экстремальных температур.

Развитие технологий 3D-печати позволило значительно расширить возможности обработки этих материалов. Металлы активно применяются в аэрокосмической, энергетической, автомобильной и медицинской промышленности, а керамика – в биомедицине, электронике, химическом машиностроении и защите от высоких температур.

В данной главе рассматриваются основные виды металлических и керамических материалов, используемых в аддитивных технологиях, их свойства, особенности взаимодействия с технологиями печати, а также перспективы развития в промышленности и науке. Особое внимание уделено композитным и наполненным системам, которые объединяют достоинства различных классов материалов.

7.1. Порошки для SLM/EBM

Металлические порошки являются ключевым классом материалов для аддитивного производства методами селективного лазерного (SLM) и электронно-лучевого плавления (EBM). Качество порошков, их химический состав и физические характеристики напрямую определяют надежность, прочность и функциональные свойства напечатанных изделий. Основные группы порошковых материалов включают нержавеющие и инструментальные стали, титановые, алюминиевые и никелевые сплавы (табл. 7.1) [21].

Нержавеющие стали являются одними из наиболее востребованных материалов для аддитивных технологий. Наиболее широко применяется сталь марки 316L, отличающаяся высокой коррозионной стойкостью, биосовместимостью и хорошей свариваемостью. Она используется в медицине (имплантаты, инструменты), пищевой промышленности, машиностроении и энергетике. Благодаря однородной микроструктуре, получаемой при SLM/EBM, изделия обладают высокой плотностью и стабильными механическими свойствами.

Таблица 7.1

Сравнение основных групп металлических порошков для 3D-печати

Группа материалов	Свойства	Применения	Особенности
Нержавеющие стали (316L и др.)	Коррозионная стойкость, биосовместимость, высокая плотность	Медицина (имплантаты, инструменты), пищевая промышленность, машиностроение	Хорошая свариваемость, стабильные механические свойства
Инструментальные стали	Твердость, износостойкость, высокая прочность	Пресс-формы, штампы, режущий инструмент	Возможность печати каналов охлаждения, повышенная долговечность
Титановые сплавы (Ti-6Al-4V)	Высокая удельная прочность, легкость, коррозионная стойкость, биосовместимость	Авиация, космос, медицина (протезы, имплантаты)	Возможность пористых структур для остеоинтеграции
Алюминиевые сплавы (AlSi10Mg)	Малый вес, теплопроводность, достаточная прочность	Автомобилестроение, авиация, электроника (радиаторы, теплообменники)	Высокая производительность печати, эффективное охлаждение
Никелевые сплавы (Inconel 625, 718)	Жаропрочность, стойкость к окислению и агрессивным средам	Газотурбины, энергетика, химическая промышленность	Работа при температурах $> 700^{\circ}\text{C}$, детали турбин и камер сгорания

Инструментальные стали применяются для изготовления пресс-форм, штампов и режущего инструмента. Ключевым преимуществом является возможность локальной оптимизации свойств и получения изделий со встроенными каналами охлаждения, что невозможно при традиционном производстве. Такие детали обеспечивают повышенную износостойкость и долговечность в условиях циклических нагрузок.

Титановые сплавы, в первую очередь Ti-6Al-4V, занимают ведущее место в аэрокосмической и медицинской промышленности. Они сочетают высокую удельную прочность, коррозионную стойкость

и биосовместимость. Благодаря аддитивным технологиям стало возможным производить сложные топологически оптимизированные конструкции, которые обеспечивают значительное снижение массы без потери прочности. В медицине титановые порошки применяются для изготовления индивидуальных имплантатов и протезов с пористой структурой, способствующей остеоинтеграции.

Алюминиевые сплавы, такие как AlSi10Mg, востребованы в автомобильной, аэрокосмической и электронной промышленности. Они отличаются малым весом, высокой теплопроводностью и достаточной прочностью для широкого спектра конструкционных применений. Использование SLM позволяет изготавливать сложные радиаторные и теплообменные структуры, обеспечивая эффективное охлаждение при минимальной массе.

Никелевые сплавы, включая Inconel 625 и 718, применяются в условиях экстремальных температур и агрессивных сред. Они сохраняют прочность и устойчивость к окислению при температурах свыше 700...800 °С, что делает их незаменимыми в газотурбинных установках, энергетике и химической промышленности. Напечатанные детали из никелевых сплавов обладают высокой плотностью и могут использоваться для производства как прототипов, так и серийных элементов, включая лопатки турбин и камеры сгорания.

Особое значение в аддитивном производстве металлов имеют параметры порошков: сферичность частиц, размерной состав, текучесть и низкое содержание примесей (кислорода, азота, водорода). Именно они определяют стабильность процесса плавления и качество получаемых изделий.

Таким образом, нержавеющие и инструментальные стали, титановые, алюминиевые и никелевые сплавы формируют основу материалов для SLM и EBM. Их разнообразие позволяет реализовывать широкий спектр задач – от легких деталей для авиации до жаропрочных компонентов для энергетики. Развитие технологий производства порошков и их адаптация под аддитивные процессы открывает путь к дальнейшему расширению применения металлопечати в промышленности.

7.2. Специальные сплавы

Развитие аддитивных технологий открыло возможности для применения не только традиционных конструкционных металлов, но и целого класса специальных сплавов, обладающих уникальными свойствами (табл. 7.2). Среди них особый интерес представляют жаропрочные материалы, сплавы с эффектом памяти формы и так называемые градиентные материалы, которые невозможно или крайне сложно получить методами традиционной металлургии.

Таблица 7.2

Сравнение специальных сплавов для аддитивного производства

Тип сплава	Основные свойства	Применение	Особенности
Жаропрочные (никелевые суперсплавы, кобальтовые сплавы)	Высокая прочность при 700...1100 °С, стойкость к окислению и ползучести	Газотурбинные двигатели, энергетика, авиация, детали камер сгорания	Возможность печати сложных каналов охлаждения, высокая плотность
С памятью формы (NiTi, CuAlNi и др.)	Эффект восстановления формы при нагреве, высокая упругость, биосовместимость (для NiTi)	Медицина (стенты, имплантаты), робототехника, аэрокосмос	Возможность печати решетчатых и тонкостенных структур, уникальные функциональные свойства
Градиентные материалы	Изменение свойств в разных частях изделия (твердость/пластичность, жаропрочность/теплопроводность)	Инструментальное производство, аэрокосмос, медицина	Реализуются только методами АМ, послойная подача разных порошков или легирующих элементов

Жаропрочные сплавы представляют собой материалы, способные сохранять механическую прочность, устойчивость к ползучести и окислению при высоких температурах. Наиболее известными являются никелевые суперсплавы (например, Inconel 718, René 41), которые широко применяются в газотурбинных двигателях, энергетике и авиации. Аддитивное производство позволяет создавать детали

сложной геометрии с внутренними каналами охлаждения, что значительно повышает их эксплуатационные характеристики. Благодаря послойному формированию можно также оптимизировать микроструктуру и достичь высокой плотности материала, что критически важно для работы в экстремальных условиях.

Сплавы с памятью формы (*Shape Memory Alloys*, SMA) – еще одна категория перспективных материалов. Наиболее известен нитинол (NiTi), обладающий способностью восстанавливать исходную форму при нагреве после пластической деформации. Такие материалы находят применение в медицине (стенты, ортопедические фиксаторы, хирургические инструменты), робототехнике и аэрокосмической технике. Использование аддитивных технологий позволяет изготавливать изделия из SMA со сложной геометрией, а также создавать тонкостенные или решетчатые структуры, обладающие уникальными комбинациями гибкости и функциональности.

Градиентные материалы – особый класс сплавов и композитов, в которых состав и свойства изменяются в разных частях изделия. Например, в одной детали можно совместить твердость и износостойкость с одной стороны, и вязкость или пластичность – с другой. Такие материалы востребованы в инструментальном производстве, аэрокосмосе и медицине. Аддитивные технологии, особенно многолучевая лазерная плавка и системы с несколькими подающими каналами для порошков, позволяют реализовывать подобные конструкции, послойно изменяя состав сплава. Это открывает путь к созданию функционально-градиентных деталей, которые невозможно изготовить традиционными методами литья или обработки.

Перспективы применения специальных сплавов в аддитивном производстве чрезвычайно широки. Жаропрочные материалы обеспечивают надежность в энергетике и авиации, сплавы с памятью формы находят все больше применений в медицине и смарт-системах, а градиентные материалы становятся новым уровнем в проектировании изделий с учетом реальных эксплуатационных условий. Ограничениями пока остаются высокая стоимость порошков, сложность контроля микроструктуры и необходимость в совершенствовании технологических режимов. Однако именно эти материалы демонстрируют, что аддитивное производство способно выйти за рамки традиционной металлургии, открывая путь к созданию принципиально новых классов изделий.

7.3. Керамические материалы

Керамические материалы занимают особое место в аддитивном производстве благодаря их уникальным физико-химическим свойствам: высокой твердости, износостойкости, устойчивости к высоким температурам и агрессивным средам (табл. 7.3). При этом традиционные методы обработки керамики – прессование и спекание, литье под давлением или механическая обработка – сильно ограничивают геометрию изделий. Использование технологий 3D-печати позволяет создавать детали сложной формы, решетчатые структуры и индивидуализированные изделия, что особенно важно для медицины, электроники и энергетики [22, 23].

Таблица 7.3

Сравнение керамических материалов для аддитивного производства

Материал	Свойства	Применение	Особенности в аддитивном производстве
Оксид алюминия (Al_2O_3)	Высокая твердость, износостойкость, электрическая изоляция, химическая инертность	Электроизоляция, биомедицинские имплантаты, детали насосов, защитные элементы	Используется в виде порошков или паст; требуется высокотемпературное спекание
Диоксид циркония (ZrO_2)	Высокая прочность и вязкость разрушения, биосовместимость, термостойкость	Стоматология (коронки, мосты, имплантаты), медицина, детали, работающие в условиях ударных нагрузок	Печать суспензиями или порошками; необходимы дебиндинг и спекание при высоких температурах
Техническая керамика (SiC , Si_3N_4 и др.)	Жаропрочность, химическая стойкость, устойчивость к износу	Авиация, энергетика (тепловые барьеры, турбины), насосы, сопла	Ограничена в АМ из-за трудностей плавления; чаще применяется в виде паст и суспензий

Оксид алюминия (Al_2O_3) является наиболее широко применяемой технической керамикой. Он характеризуется высокой твердостью, износостойкостью, электрической изоляцией и устойчивостью к химическому воздействию. Изделия из оксида алюминия находят применение в качестве электрических изоляторов, биомедицинских имплантатов,

элементов насосов и клапанов, а также в защитных покрытиях. В аддитивных технологиях оксид алюминия используется в виде порошков или паст для струйной печати и последующего спекания, а также в методах SLA с фотополимерными смолами, наполненными керамическими частицами.

Диоксид циркония (ZrO_2) отличается высокой прочностью и вязкостью разрушения по сравнению с другими керамиками, а также биосовместимостью. Благодаря этим свойствам циркониевая керамика активно используется в медицине, особенно в стоматологии для изготовления коронок, мостов и имплантатов. В аддитивных процессах применяются порошки или суспензии диоксида циркония, которые после печати проходят стадию дебиндинга и высокотемпературного спекания.

Техническая керамика объединяет широкий класс материалов, включая карбид кремния (SiC), нитрид кремния (Si_3N_4), оксид магния и другие композиции. Эти материалы находят применение в экстремальных условиях: от деталей турбин и тепловых барьеров до износостойких компонентов насосов, сопел и резцов. Высокая термостойкость и химическая инертность делают их незаменимыми в энергетике и машиностроении. В аддитивном производстве техническая керамика используется преимущественно в виде паст или суспензий для струйной печати и экструзии, а также в виде порошков для лазерного спекания, хотя последняя технология пока ограничена из-за сложности равномерного плавления керамических частиц.

Несмотря на выдающиеся свойства, керамические материалы в аддитивном производстве сталкиваются с рядом проблем. Основными из них являются хрупкость, трудности в контроле усадки при спекании и необходимость высокой точности в управлении технологическим процессом. Тем не менее развитие технологий печати керамикой открывает новые возможности: от персонализированных медицинских изделий и сложных микроэлектронных компонентов до деталей для авиации и энергетики, которые ранее было невозможно изготовить традиционными методами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аддитивные технологии продолжают стремительно развиваться, трансформируя традиционные производственные процессы и открывая новые возможности для проектирования и изготовления изделий. Пособие охватило ключевые аспекты этой области: от общих сведений о 3D-печати и классификации технологий до детального рассмотрения материалов – полимеров, металлов, керамики и специализированных композитов.

Изучение материалов и технологий 3D-печати позволяет понять, как свойства исходного материала влияют на качество, функциональность и долговечность изделий, а также на выбор подходящей методики производства. Особое внимание уделялось современным направлениям, включая фотополимерные смолы с наполнителями для спекания, металлические и керамические порошки, гибридные и специализированные технологии печати.

В результате освоения материала пособия читатель получает целостное представление о возможностях и ограничениях аддитивного производства, о взаимосвязи технологий и материалов, а также о перспективах развития отрасли. Эти знания создают основу для грамотного проектирования изделий, оптимизации производственных процессов и внедрения инновационных решений в промышленность, медицину, строительство и науку.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зленко М. А., Нагайцев М. В., Довбыш В. М. Аддитивные технологии в машиностроении // Пособие для инженеров. М. : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.
2. Barnatt C. 3D Printing: The Next Industrial Revolution. 2013. 276 p.
3. Костяков А. Е. Анализ применения различных типов 3D-принтеров в машиностроении // Интерактивная наука. 2023. № 8 (84). С. 7–13.
4. 3D Printing Guide: Types of 3D Printers, Materials, and Applications // formlabs.com : [website]. URL: <https://formlabs.com/3d-printers/> (date of accessed: 02.06.2026).
5. ISO/ASTM 52900:2021. Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary // iso.org : [website]. URL: <https://clck.su/ykRHR> (date of accessed: 02.06.2026).
6. 3D-принтеры: история и технологии трехмерной печати / Н. В. Кушнир, А. В. Кушнир, А. М. Геращенко, А. В. Тыртышный // Научные труды КубГТУ. Краснодар, 2015. № 6. С. 147–155.
7. Энциклопедия 3D-печати // 3dtoday.ru : [сайт]. URL: <http://3dtoday.ru/wiki> (дата обращения: 02.06.2026).
8. Грищенко В. К., Маслюк А. Ф., Гудзера С. С. Жидкие фотополимеризующиеся композиции. Киев : Наукова думка, 1985. 206 с.
9. Radiation Curing Primer I: Inks, Coatings and Adhesives / ed. C. J. Kallendorf. 2nd ed. RadTech International North America, 1991.
10. Технологии 3D-печати. Принципы, возможности, расходные материалы, цены // ixbt.com : [сайт]. URL: <https://clck.su/arAoG> (дата обращения: 02.06.2026).
11. 3D Printing Industry – Additive Manufacturing and 3D Printing News : [website]. URL: <https://3dprintingindustry.com/> (date of accessed: 02.06.2026).
12. Lipson H., Kurman M. Fabricated: The New World of 3D Printing. Wiley, 2013. 280 p.
13. Канесса Э., Фонда К., Зеннаро М. Доступная 3D печать для науки, образования и устойчивого развития. Международный центр теоретической физики Абдус Салам, 2013. 191 с.
14. Kelly J. F. 3D Printing: Build Your Own 3D Printer and Print Your Own 3D Objects. Que Publishing, 2013. 192 p.

15. 3D принтеры: описание, назначение и принцип работы // 3DTool. URL: <https://3dtool.ru/stati/kak-rabotaet-3d-printer/> (дата обращения: 02.06.2026).
16. 3D Print Labs : [сайт]. URL: <https://3dprintlabs.ru/> (дата обращения: 02.06.2026).
17. McMahon C. 3D Printing: Second Edition. Imagine Publishing Ltd., 2013. 116 p.
18. Evans B. Practical 3D Printers: The Science and Art of 3D Printing. Apress, 2013. 332 p.
19. Barnatt C. 3D Printing: Second Edition. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014. 306 p.
20. Шнелл Г. Химия и физика поликарбонатов / пер. с англ. О. В. Смирновой и С. Б. Ерофеевой. М., 1967. 229 с.
21. Additive Manufacturing Technologies / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, M. Khorasani. 3rd ed. Cham : Springer, 2021. 685 p.
22. Sheppard K. 3D Printing – Unabridged Guide. Tebbo, 2012. 174 p.
23. Hausman K. 3D Printing For Dummies. For Dummies, 2014. 384 p.

Учебное издание

*Шкуро Алексей Евгеньевич,
Кривоногов Павел Сергеевич,
Захаров Павел Сергеевич*

ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ 3D-ПЕЧАТИ

ISBN 978-5-94984-990-3



Редактор П. С. Фенина
Оператор компьютерной верстки О. А. Казанцева

Подписано в печать 11.06.2026. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Цифровая печать.

Уч.-изд. л. 8,21. Усл. печ. л. 8,36.

Тираж 300 экз. (1-й завод 7 экз.).

Заказ №

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет».

620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37.

Редакционно-издательский отдел. Тел. 8 (343) 221-21-44.

Типография ООО «ИЗДАТЕЛЬСТВО УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР УПИ».

620062, РФ, Свердловская область, Екатеринбург, пер. Лобачевского, 1, оф. 15.

Тел. 8 (343) 362-91-16.