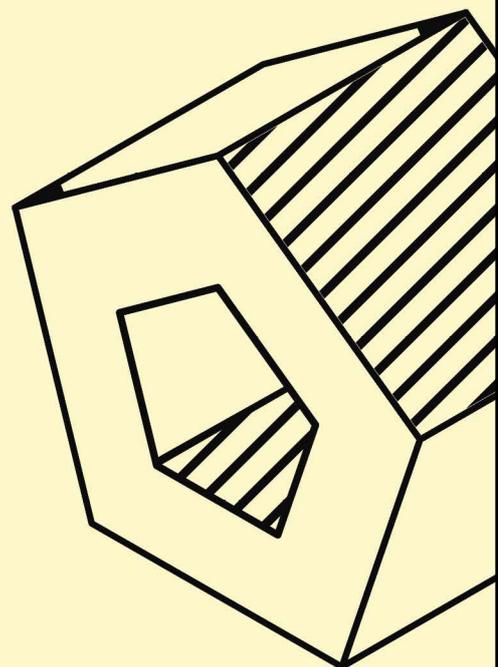


LittleTinyH Books

3D печать

Коротко  
и максимально  
ясно

в ритме минимализма



# 3D печать, коротко и максимально ясно

Данная книга находится под лицензией  
Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-ND 4.0)



Вы можете свободно:

Делиться (обмениваться) — копировать и распространять материал на любом носителе и в любом формате для любых целей, включая коммерческие.

При обязательном соблюдении следующих условий:

«Attribution» («Атрибуция») — Вы должны обеспечить соответствующее указание авторства, предоставить ссылку на лицензию и обозначить изменения, если таковые были сделаны. Вы можете это делать любым разумным способом, но не таким, который подразумевал бы, что лицензиар одобряет вас или ваш способ использования произведения.

«NoDerivatives» («Без производных произведений») — Если вы перерабатываете, преобразовываете материал или берёте его за основу для производного произведения, вы не можете распространять измененный материал.

Подробнее на [creativecommons.org](http://creativecommons.org)

## Важно!

Большая часть медиа (изображения) принадлежит не мне. Пожалуйста, перед их использованием вне книги договоритесь с правообладателем. Также в книге есть логотипы, товарные знаки и марки, фирменные знаки и знаки обслуживания, которые принадлежат их правообладателям, даже если не выделены маркировкой.

Я всегда очень серьезно отношусь к авторским правам, но допускаю возможность собственной ошибки. Пожалуйста, если вы считаете, что я нарушил ваши авторские права, напишите мне на [info@lth-books.ru](mailto:info@lth-books.ru)

Отказ от ответственности.

Автор данной книги не несет ответственности за финансовые и иные потери, возникшие из-за ее прочтения. Автор напоминает, что является человеком и может как допускать ошибки, так и просто забывать что-либо упомянуть, либо делать опечатки.

Автор отдельно подчеркивает, что при любых работах, связанных с риском для здоровья, например, при работе с химическими реактивами или электрическими приборами необходимо, в первую очередь, ориентироваться на здравый смысл и логику, чтобы не причинить себе вред и остаться живым.

Автор также утверждает, что не контролирует содержания внешних ссылок, за время существования книги они могут быть удалены или их содержание может измениться. Кроме того, внешние гиперссылки были предоставлены автором в целях обучения, автор ни в коем случае не рекламирует деятельность компаний и (или) отдельных людей, которые создали данный материал. Любые ваши решения относительно приобретения товаров или услуг не должны быть основаны на том, что автор обозначил их как хороший иллюстрационный материал.

Это редакция книги от 8 апреля 2016 года, включающая в себя пробную (бета) часть. Если сегодня не 8 апреля, пожалуйста, проверьте новую, дополненную редакцию на официальном сайте:

[lth-books.ru](http://lth-books.ru)

или нашей группе вконтакте

[vk.com/littletinyh](https://vk.com/littletinyh)

## ПРЕДИСЛОВИЕ

### Вместо слов об авторе.

Любая книга, даже такая специфичная, должна начинаться словами об авторе, перечислении его великолепных наград и регалий, отметками о профессиональных заслугах и высоком положении в обществе, чтобы вы знали, что можете ему доверять. В данном же случае автор предпочел бы остаться инкогнито во избежание ассоциации бренда собственной компании с книгой и обвинения в наглой и гнусной рекламе. Более того, личность автора в данном случае и вовсе не интересна, так как автором он является весьма посредственно, ведь, по большей части, он лишь собирал и стандартизировал материал. Добавить стоит только две вещи:

- Во-первых, автор очень тесно связан с областью печати, так как когда-то являлся соучредителем небольшой (совсем маааленькой, никому не известной) компании.
- Во-вторых, в создании этой книги принимал участие еще один человек помимо автора, о нем будет написано позже.

На этом я предлагаю закончить об авторе и начать о книге.

### Для кого эта книга?

Эта книга необычна хотя бы потому, что невозможно до конца разобраться, кому она может быть интересна.

Профессионалы, вероятно, пробегутся глазами, не найдут для себя ничего нового и благополучно вернуться к своим делам.

Зеваки, может, откроют книгу, прочтут предисловие и на этом закончат свое путешествие в удивительный мир, где любая задумка обретает форму. Хотя я надеюсь, что их заинтересуют хотя бы картинки.

Словом, книга рассчитана на того редкого, пытливого читателя, что прочитает каждую строчку, перейдет по каждой ссылке и проверит каждую цифру, а потом еще и на ошибки укажет.

При всем этом мой читатель не должен был сделать это до меня, что вообще является ситуацией экстраординарной. Хотя, по причинам описанным ниже, и вполне вероятной.

### Зачем вообще написал?

Читателю, наверное, любопытно, зачем вообще писать книгу, если может выясниться, что она никому не интересна. Причина столь странного порыва заключается в моей уверенности в обратном. 3D

# 3D печать, коротко и максимально ясно

печать, как область интереса массовой публики, существует достаточно давно, однако материала по ней очень и очень мало. И если в английском интернете можно поискать и что-нибудь найти, то рунет в этом плане выглядит совсем печально.

Основная часть статей с коммерческих ресурсов — переведенные и адаптированные статьи англоязычных коллег. Не то, чтобы это было совсем плохо, но это накладывает существенный отпечаток на их содержание, так как основная их цель — продавать. Кроме этого, невозможно, чтобы в одном месте находился весь материал (даже в пределах одной темы), да и представлен он зачастую убого. В процессе подготовки этой книги мне пришлось перечитать невероятное количество бреда, рожденного в умах коммерсантов, достаточно слабо представляющих чем, в общем-то, занимаются. Не отстают в этом плане и англоязычные друзья. Википедии же, которые должны помогать в сортировке материала и поиске надежных источников, зачастую либо пустые, либо имеют очень уж спорную информацию.

Итак, основной идеей этой книги было собрать вместе самые важные данные, интересные ссылки и стоящие фотографии, поместить это в формат .pdf и распространять максимально свободно. Основной же целью было вывести область из круга профессионалов и дать ей глоток свежего массового воздуха. И наконец, мне бы хотелось, чтобы книга стала для вас путеводителем по этой сложной и удивительной теме.

Тем, кто еще ничего не знает о 3D печати, желаю удачи в открытии целого нового мира, с любовью:



## Как переходить по ссылкам?

Как моряки договариваются на берегу, я предлагаю нам договориться об условных обозначениях со ссылками, которые допускаю в процессе написания книги.

В этой книге вы обнаружите много ссылок на самые разные ресурсы в интернете. Я всегда очень аккуратно подбираю сайты, на которые вы уйдете из книги. И это означает не только то, что я не ссылаюсь на интернет-казино, но и то, что ссылки на профильные материалы я подбираю сверхаккуратно. Я стараюсь избегать скучных ссылок, а также ссылок на иностранном языке. Если все же приходится это делать, я всегда предупреждаю об этом. Условно я делю их на три типа:

- **Домашнее задание.** Так я выделяю все, почти обязательное к просмотру. Обычно это не включает в себя ничего сложного и зачастую состоит из фото и видео файлов. Эти ссылки помогут вам немного разобраться с материалом.

- **Кругозор.** Так называются ссылки, содержащие в себе информацию, не являющуюся обязательной по данной теме, но при этом интересную для развития собственного кругозора.

- **Источник.** Эти ссылки просто помечают правообладателя изображения. Они не являются обязательными, но если вам интересно, то вы всегда можете перейти.

Иногда я могу давать ссылки без подписи, но их содержание ясно из контекста

Я всегда забочусь об удобстве читателя и делаю все ссылки (кроме ссылки на источник) кликабельными, чтобы единственное, что вы должны были сделать — один раз кликнуть мышкой.

## Благодарности.

Я выражаю отдельную благодарность за помощь в подготовке данной книги Лилии, согласившейся помочь мне с организацией сайта, группы вКонтакте, а также проверки книги на соответствие грамматическим нормам.

Она посвятила книге не меньше времени, чем я, и по праву может называться вторым автором. Если бы на обложке были имена создателей книги, ее имя определенно оказалось бы там, ибо работа, которую она проделала, и польза, которую она принесла проекту, неоценимы.



No matter what your application, if you can imagine it, you can print it, and we can help.  
Не важно, какая сфера применения, если вы можете представить это, вы можете это распечатать, и мы можем вам помочь.

(c) 3D Systems

## КАК ПЕЧАТАТЬ. ТЕХНОЛОГИИ.

Учитывая, что книга распространяется в электронном формате, вы не могли не слышать про 3D принтеры вообще. Но, на всякий случай, если коротко, то основная задача 3D принтера — создать из электронной модели трехмерный объект. Чобы достичь результата пришлось придумать огромное количество способов, подождите, не просто придумать, а продолжать придумывать! Способов печати просто великое множество, также с завидной регулярностью появляются новые. Однажды автору даже довелось познакомиться с одним человеком, который разрабатывает свой, уникальный способ печати. Я постараюсь описать основные из них.

# 3D печать, кратко и максимально ясно

## FDM или FFF. Послойное наплавление.



*FDM 3D принтеры — единственные из всех, достойно представлены на фотостоках. Часто с улыбающимися людьми рядом.*

Если вы видели 3D принтер в действии и не связаны с областью профессионально, то, скорее всего, знакомы именно с этим методом печати. Введите запрос «3D печать» в google картинках или на youtube и обнаружите, что FDM/FFF принтеры просто заполнили интернет. Они имеют самое большое количество модификаций, а на профильных ресурсах обсуждения часто касаются только них. Наконец, попробуйте купить 3D принтер и столкнетесь со всем разнообразием моделей.

Чтобы понять, как докатились до жизни такой, давайте перенесемся назад в истории и проследим развитие FDM с самых далеких дней.

## Короткая историческая справка.

А началось все с человека по имени Скот Крамп (S. Scott Crump) и его идеи использовать горячий клеевой пистолет, чтобы сделать маленького лягушонка в качестве игрушки для собственной дочери. За этим последовали идея автоматизации и смешивания пластика с воском, и уже 30 октября 1989 года Мистер Крамп подает заявку, чтобы запатентовать свое новое изобретение: аппарат для создания трехмерных объектов методом послойного наплавления.

Патент опубликован и доступен по ссылке: <https://www.google.com/patents/US5121329>

В том же году он вместе с женой (так по-американски!) основывает компанию под названием Stratasys, которая до сих пор занимается производством и поддержкой принтеров, хотя и список технологий на текущий момент несколько расширился.



Если вам интересно, как выглядит создатель метода и основатель Stratasys.  
<https://www.youtube.com/watch?v=OyJ4plgW1BM>  
<https://investors.stratasys.com/releasedetail.cfm?releaseid=727657>

## Новое дыхание. FFF. PJP.

Теперь мы несколько отойдем от компании Stratasys и обратимся к другому великоллепному проекту, а именно: RepRap.

Проект был основан Эдрианом Боуером (Adrian Bowyer) из университета Бата (Bath University). Впервые представленная в марте 2005 года в блоге проекта RepRap

идея включала в себя создание машины (с чертежами и программным обеспечением в свободном доступе), способной к воспроизведению самой себя. Отсюда и появилось название проекта RepRap (от Replicating Rapid Prototyper, то есть самовоспроизводящийся механизм для быстрого изготовления прототипов). 29 мая 2008 года появился первый принтер, способный к частичному самовоспроизведению, названный Darwin.

Стоит заметить, что принтеры не способны были напечатать себя целиком, например, они не могли создать электронику и металлические части (например, сопло принтера), однако наличие чертежей в свободном доступе подтолкнуло к развитию технологии. С 2008 года стали изготавливаться и продаваться детали, которые как раз нельзя было создать из пластика, и, несмотря на действие патента, Stratasys не стали выдвигать исков, видимо, из-за низких объемов.

В 2009 году после истечения срока действия ключевого патента к созданию 3D принтеров на основе данной технологии приступают другие компании. Но так как аббревиатура FDM принадлежит Stratasys в качестве товарного знака, они используют другую — FFF (Fused Filament Fabrication — Производство методом наплавления нитей). Еще одна аббревиатура — PJP (Plastic Jet Printing) — была придумана другим гигантом индустрии — 3D Systems. Обилие названий путает сторонних людей, но, на самом деле, все они были придуманы лишь для того, чтобы отличать компании друг от друга.

[http://blog.reprap.org/2005\\_03\\_01\\_archive.html](http://blog.reprap.org/2005_03_01_archive.html)



Подробнее о Stratasys и RepRap вы сможете прочитать в четвертом издании данной книги или на официальных сайтах: [stratasys.com](http://stratasys.com) и [reprap.org](http://reprap.org)

## Суть работы.

### Домашнее задание

Посмотреть



<https://www.youtube.com/watch?v=N2iXio9vuz0>

Смотреть до конца необязательно, просто уловите суть.

<http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/technology/>

Страница на английском языке, но зайти стоит, чтобы посмотреть gif-анимацию, объясняющую, что происходило на видео выше.

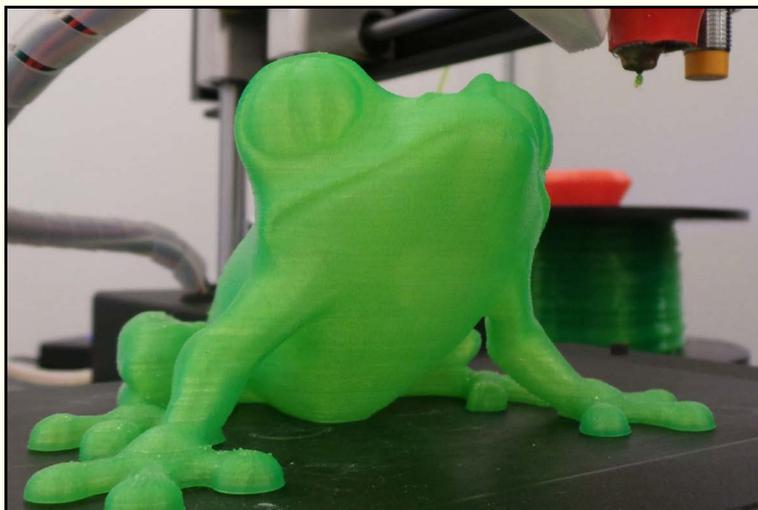
# 3D печать, коротко и максимально ясно

FDM печать не просто так является самым распространенным методом. «Патенты» - скажите вы. «Простота» - скажу я. А потом тихонько добавлю: «и цена». Действительно, самые недорогие из этого класса устройств могут стоить меньше \$100, но и качество с ценой в данном случае коррелирует.

Метод настолько же прост, насколько широко описан, задокументирован и отснят.

В детстве многие из нас забавлялись со свечками. Когда пламя свечи топит воск, он становится жидким, и каплю воска можно оставить на бумаге. Когда капля остывает, она становится твердой. Если сверху оставить еще одну каплю, то она затвердеет уже поверх предыдущей. К сожалению, нормировать воск в данном случае очень проблематично и вряд ли можно создать что-нибудь стоящее. Другое дело, когда это делает техника, распределяя жидкий пластик в разных точках, создавая слой за слоем трехмерный объект. Другая великолепная аналогия, которую мне довелось прочитать — с хлебом. Если разрезать хлеб на тонкие части и выкладывать их друг на друга, то мы сможем собрать батон заново!

Тем не менее, я бы не стал писать книгу, чтобы ограничиться только этим определением. Давайте рассмотрим конструкцию принтера, проследив путь от твердого пластика и 3D модели до готового изделия.



Эта милая лягушка является одной из самых распространенных для печати и любимых тусовкой моделей. Изображение: Creative tools<sup>1</sup>

Что мы имеем изначально? Кроме машинки и сырья у нас есть 3D модель, на профессиональном языке CAD (Computer-aided design) файл. Его формат может быть самым разнообразным, но в основном это .stl или .obj, иногда .3Ds.

Можем ли мы распечатать любую модель? Нет! Многие модели просто непригодны для печати конкретным принтером, часть из них нуждается в небольшой обработке. Например, вам может понадобится увеличить толщину стенок или отодвинуть друг от друга две части модели. В некоторых случаях модель даже необходимо будет разрезать. Но так как глава все-таки про печать, а не про моделирование, я не считаю важным раскрывать этот аспект подробно, тем более про него уже и так много написано.

## Кругозор

Статьи



<https://habrahabr.ru/post/196182/>

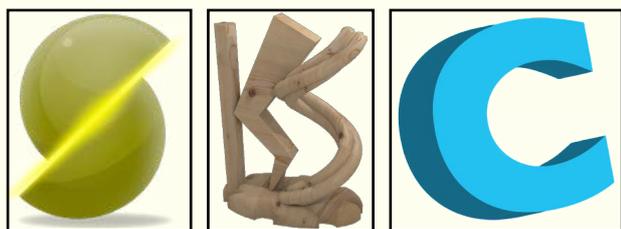
Короткая и занимательная статья с хабрахабр о том, как нужно подготавливать модель.

<http://prototypster.ru/help/>

Раздел помощи у коллег с прототайпстер, где нас интересует информация по нашей теме до «Описание свойств материалов для лучшего выбора при 3D печати».

# LittleTinyH Books

Итак, после того, как модель готова, мы загружаем ее в специальную программу (слайсер), которая перерабатывает ее в код для принтера (так называемый g-code). Он включает в себя положение печатающей головки, температуру и еще множество других параметров. Слайсеров существует очень много, кроме тех, что разрабатываются компаниями, производящими принтеры, существуют и отдельные проекты. G-code содержит невероятное количество команд, так что одну модель можно распечатать многими способами, поэтому разные программы справляются с этим по-разному. В сети можно найти множество сравнений их между собой.



Самые популярные слайсеры слева направо:

- Slic3r (читается слайсер)
- Kisslicer
- Cura.

Существуют и платные варианты программ.

Это, в первую очередь, Simplify3D, нацеленный больше на домашнее использование, и Netfabb, нацеленный на профессионалов.



## Кругозор

Посмотреть



<http://reprap.org/wiki/G-code>

RepRapWiki. На английском, но мне очень уж хочется показать вам количество возможных команд G-code'a (просто посмотрите оглавление).

<https://solidoodletips.wordpress.com/2012/12/07/slicer-shootout-pt-4/>

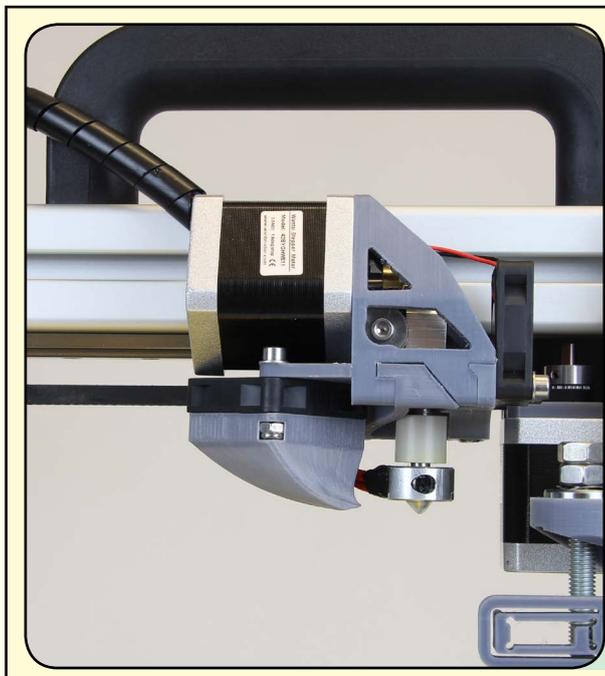
Здесь можно посмотреть сравнение работы разных слайсеров. Страница на английском, но тут все понятно и без слов.

# 3D печать, коротко и максимально ясно



Мы отправляем G-code в принтер и начинается техническая часть. Обратим внимание на сырье. Чаще всего, это пластик, который представлен в виде катушки нити<sup>а</sup> (филамента). Катушка может быть закреплена на принтере, быть вне него или закреплена внутри принтера. Кроме этого некоторые компании помещают саму катушку в дополнительную оболочку — картридж. Словом, обычно не ограничивают себя в фантазии.

На фото: принтер с двумя катушками пластика, закрепленными на задней стороне корпуса, для печати сразу в двух цветах!  
Принтер: WanHao Duplicator 4S.  
Изображение: Creative Tools<sup>2</sup>

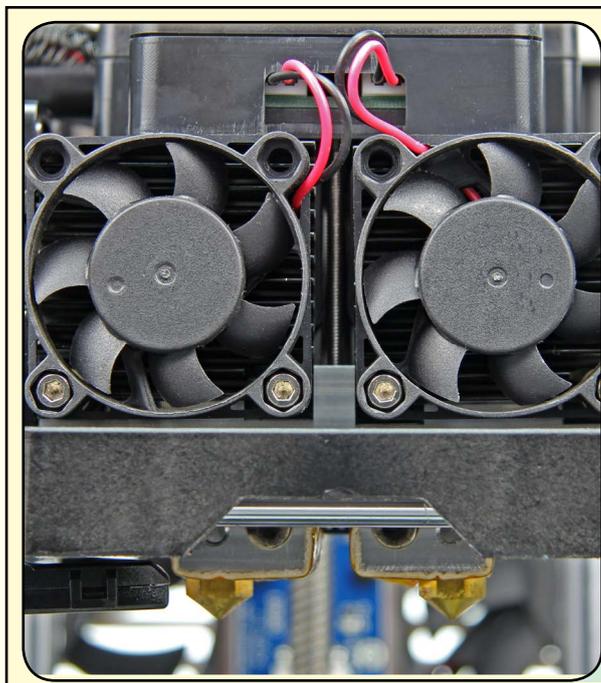


Конец пластиковой нити помещается внутри экструдера, механизма, получившего свое название от процесса под названием экструзия (extrusion — выталкивание, выдавливание). Второе название экструдера — печатающая головка.

На фото: печатающая часть принтера — экструдер.

Принтер: FelixPrinter Felix 1.5  
Изображение: Creative Tools<sup>3</sup>

# LittleTinyH Books



Экструдеров может быть и больше одного для печати разными материалами или в разных цветах. В этом случае одна модель печатается ими поочередно.

Принтер: Flashforge Dreamer desktop 3D printer.  
Источник: Creative Tools<sup>4</sup>

## Домашнее задание

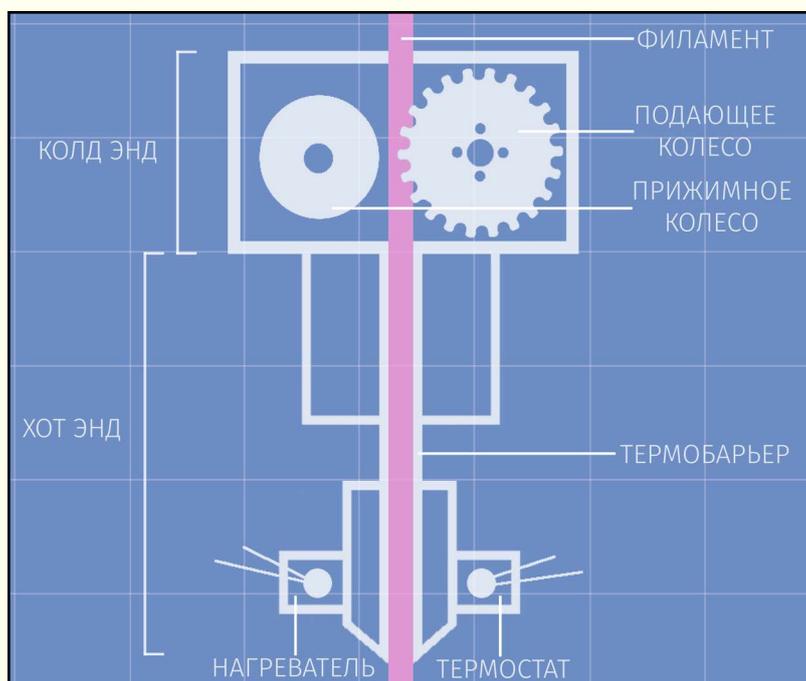
Посмотреть



<https://youtu.be/yPV9o3TqE4M?t=7m22s>

Посмотрите, как происходит печать с использованием двойного экструдера. Желтый цвет печатается одним, красный — другим концами.

# 3D печать, коротко и максимально ясно



Давайте познакомимся с этой важной деталью поближе. Экструдеры принято делить на две важные составные части: хот-энд (калька с англ. hot-end) и колд-энд (cold-end).

Самое первое, что должен сделать наш принтер — доставить нить в зону нагрева, чтобы ее расплавить. Как было видно на фотографиях, сами катушки пластика не снабжены никакими механизмами, ведь они находятся в экструдере, а именно: в колд-энде. Обычно он состоит из механизма, вращающего подающий ролик и упорного колеса, позволяющего нити проходить дальше. В этом случае он будет называться прямым (direct). Возможен и несколько иной вариант, нежели на изображении, так называемый экструдер Уэйда (Wade's extruder), когда двигатель связан с роликом не напрямую, а через

большое колесо. Такой метод позволяет обеспечивать большее давление на пластик, хотя и делает конструкцию колд-энда несколько массивнее. Основная задача колд-энда — обеспечить стабильную подачу филамента (нити) и избежать его проскальзывания. Для этой цели подающее колесо делается зубчатым (хотя зубья, конечно же, меньше, чем на картинке).

Подающий механизм экструдера не так требователен к материалам, как хот-энд, так что многие его части можно изготавливать на другом принтере. Даже учитывая, что в этом случае они производятся на таких же FFF принтерах и обладают ограниченной прочностью, их обычно хватает для длительной работы механизма без нареканий.

Теперь перейдем ко второй части экструдера: так называемому хот-энду, где обеспечивается расплавление нити и выдавливание ее на платформу. Самыми важными частями в его конструкции являются нагревательный элемент, датчик для контроля температуры, ствол экструдера, термобарьер и сопло. Как работает дуэт из первых двух частей достаточно очевидно, а вот на трех последних неплохо было бы остановиться подробнее. Начнем с термобарьера и ствола.

Зачем они нужны? Дело в том, что во время работы принтера температура экструзии часто достигает 200 и более градусов. Если она будет распространяться на нить выше по стволу, то сможет поплавить пластиковые элементы подающей части. Но это, в целом, не так страшно, ведь экструдер можно сделать целиком из металла. Другое дело, что нить станет мягкой и проталкивать ее дальше будет невозможно, что, по факту, сделает печать неосуществимой. Поэтому в конструкцию хот-энда включают специальную вставку, чтобы обеспечить отсутствие перегрева. По тому, как этого добиваются, хот-энды можно условно поделить на две части:

Первый способ.

Почему бы не сделать между частями экструдера неплавящуюся вставку? В этом случае хот-энд называется традиционным, либо по названию материала, например, РЕЕК-хотэнд.

Второй способ.

Почему бы не сделать всю конструкцию только из металла и охлаждать вентиляторами и радиаторами? В этом случае хот-энд называется цельнометаллическим.

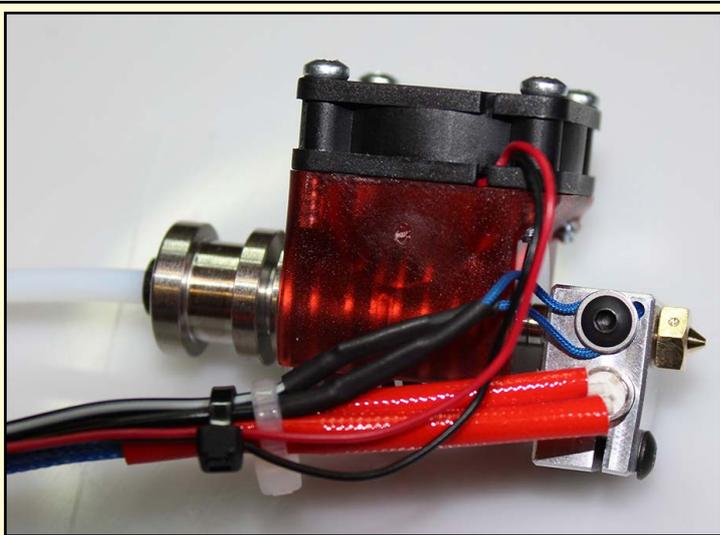
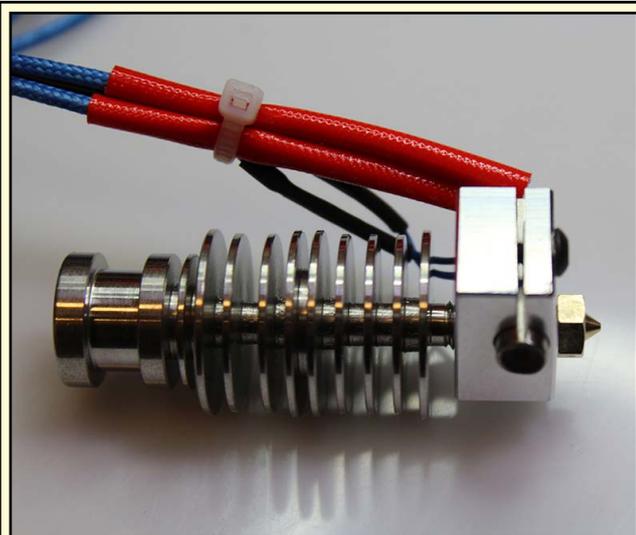
Оба этих метода нам все-таки удастся объяснить на представленном изображении. В первом случае для ствола хот-энда мы решаем использовать жесткий, плохо проводящий материал. Чаще всего, им будет являться РЕЕК (полиэфирэфиркетона). Мы с ним обычно в жизни не сталкиваемся, так что и примеров я привести не смогу, но если вам это поможет, то из него можно изготавливать подшипники скольжения и много-много других вещей. Внутри него обычно находится трубка из PTFE (политетрафторэтилен), более известная под маркой Тефлон (да-да, тот самый). Кроме функции термобарьера, тефлон обеспечивает еще и скольжение пластика. Вопрос «зачем нужно дополнительное скольжение?» возникает до тех пор, пока вы не попробовали цельнометаллические хот-энды, но об этом немного позже.

Другой вариант — цельнометаллический хот-энд. Здесь нет никаких пластиков, никакого тефлона, только металл.

И тут читатель вспоминает, что металлы хорошо проводят тепло. Как же мы не расплавим колд-энд? Мы будем использовать вентиляторы и радиаторные системы. Все это приводит к усложнению и удорожанию конструкции и очевидным вопросом будет: «Зачем?».

Чтобы обеспечить себе доступ к большому выбору пластиков. Да, температура, при которых начинает плавиться традиционный хот-энд кажется внушительной — 250 градусов — но для пластиков это не предел. Выбирая неметаллический хот-энд, вы лишаете себя возможности печатать, например, сверхпрочным нейлоном.

Зато при печати традиционными пластиками вы приобретаете новые проблемы. Тефлоновая трубка гладкая и обеспечивает ровную подачу. А вот металл этому не способствует, поэтому пластик, особенно PLA (смотри подглаву о пластиках), иногда застревает. Чтобы избежать этого, хот-энд чистят, полируют и смазывают маслом, но до конца избежать этого эффекта почти невозможно.

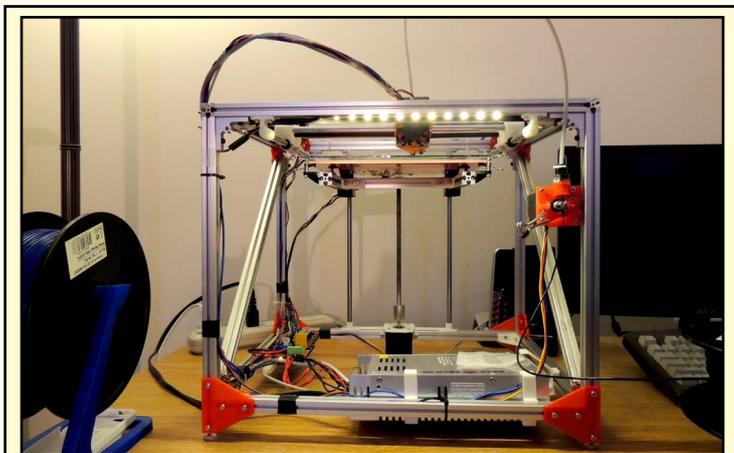


E3D-Lite6 Hot end. На первой фотографии кулер еще не присоединен, вторая — законченный вариант.  
Изображение: E3d online<sup>5</sup>

Тем не менее, и я это отмечу дополнительно, конструкции хот-эндов этим не ограничиваются. Кроме смежных вариантов, например, традиционного хот-энда с вентилятором или цельнометаллического с PTFE трубкой, существуют и экспериментальные варианты, например, с водным охлаждением. Пробуйте, экспериментируйте, находите свое.

# 3D печать, коротко и максимально ясно

## Экструдер Боудена



Один из вариантов подобного принтера.  
Изображение: AlexY<sup>6</sup>

Наконец, существует еще одна разновидность экструдеров под названием Боуден экструдеры. Конструктивное отличие от обычных принтеров заключается в разделении составных частей экструдера и связи их с помощью полой тефлоновой трубки. Пластик проталкивается колд-эндом с помощью трубки в хот-энд, где плавится и выталкивается на платформу. Снова вопрос: зачем?

В данном случае это позволяет снять часть лишнего веса с осей и перенести их в неподвижную часть, что позволяет увеличить скорость и точность печати при высокой скорости. Скорость вообще большая тема всей сферы, поэтому, даже несмотря на все недостатки, конструкция остается достаточно популярной. А какие можно отметить недостатки?

Трубка порождает множество сложностей. Самый основной из них — так называемый гистерезис или зависимость системы от ее текущего состояния (запаздывание). Выражаясь простым языком, при начале печати на определенный отрезок времени подача пластика в хот-энд будет меньше, а после ее конца некоторое время будет продолжаться. Это происходит из-за того, что пластик сжимается в начале «горячей» части механизма, а тефлоновая трубка многократно усиливает этот эффект. Чтобы нивелировать этот ужасный процесс, используются датчики давления и тщательная настройка механизма. Кроме того, большие диаметры нити также снижают эту проблему, так как являются менее гибкими и могут преодолеть эффект.

Гистерезис порождает еще одну проблему: провисание пластика между частями конструкции. Так происходит, потому что экструдер, закончив печатать одну часть и перемещаясь к другой, не выдавливает пластик. Но из-за эффекта гистерезиса пластик все же выдавливается. Борются с этим ретрактом (англ. retract) или затягиванием части нити обратно.

Наконец, Боуден экструдер почти лишает вас возможности печатать гибкими материалами. Технически это возможно, но на практике требует предельно низких скоростей и постоянного контроля. Только вот большая скорость является слишком притягательной, чтобы оставить дизайн без внимания.

## Домашнее задание

Посмотреть



[https://www.youtube.com/watch?v=kshVDL2V\\_oc&feature=youtu.be&t=37s](https://www.youtube.com/watch?v=kshVDL2V_oc&feature=youtu.be&t=37s)

Видео с иллюстрацией работы. Досмотрите с 37-ой секунды до конца. Вам понравится :)

## Сопло и толщина слоя

Следующей составной частью хот-энда является сопло. Сопло — деталь с отверстием, через которое проходит выплавляемый пластик. Оно делается съёмным и несъёмным, причем первый вариант представляется более предпочтительным. Все дело в том, что, несмотря на относительную универсальность сопла в 0,4мм, съёмный вариант позволяет работать с задачами, требующими очень маленького или очень большого сопла.

Маленькое сопло — идеальный вариант, если модель имеет маленькие детали, так как будет печатать более аккуратно. Абсолютным плюсом можно назвать и то, что толщина минимально возможного слоя и стенок модели тоже уменьшается вместе с маленьким соплом. С другой стороны, маленькое сопло увеличивает время, необходимое на печать модели, имеет тенденцию забиваться и требует более качественного ухода, нежели больший собрат.

Большие сопла чаще всего используются в случаях, когда скорость важнее качества. Это звучит не так странно, если помнить, что отдельные модели могут печататься больше суток и при этом что-то еще может пойти не так.

Крайним случаем большого диаметра сопла являются «volcano hotend» с увеличенной зоной расплава для обеспечения скоростной печати. Такие хот-энды обладают возможностью установить сопла больше 1 мм.

Самими распространенными же размерами для 3D принтера можно назвать диаметры от 0,3 до 0,5 мм. Хотя никто не мешает вам сделать сопло самому или найти другие варианты. Только не забывайте правильно настраивать оборудование!

Не менее важно для конечного результата и разрешение печати, а именно: толщина отдельного слоя (мы же помним, что модели печатаются послойно). Этот параметр определяется на этапе слайсинга модели и традиционно измеряется в микронах (в тысячных долях миллиметра). Современные принтеры способны печатать вплоть до толщины в 50 микрон (0,05 миллиметра!) и даже меньше, однако стандартным минимальным разрешением остается 100 микрон. Важно также отметить, что размер сопла и разрешения печати — взаимосвязанные параметры: логично, что будет почти невозможно напечатать огромным соплом тоненький слой.

### Домашнее задание

Статьи



Посмотреть



<http://www.tridimake.com/2013/07/extremely-fat-extrusion-with-1-mm-nozzle.html>

Эксперимент с миллиметровыми соплами и большим размером отдельного слоя. Снова на английском, но изображения здесь намного важнее текста.

<http://www.youtube.com/watch?v=hMXkRY8sWZQ>

Четыре уже знакомых нам лягушонка, распечатанные в разных разрешениях. Единицы указаны в миллиметрах, но вы с легкостью сможете перевести их в микроны.

# 3D печать, коротко и максимально ясно

## Платформа.

Итак, нить успела пройти в экструдер и расплавиться. Место, куда она выдавливается, называется рабочей платформой. При том, что она не является настолько же высокотехнологичной, как экструдер, она все равно требует внимания.

Что от нее хочется ожидать? Чтобы она была ровной и перпендикулярной осям движения принтера. Если экструдер будет цеплять платформу или лить пластик на расстоянии 5-10 сантиметров от него, образуя великолепный узор из нитей, то проку от такой печати будет мало.

Решается этот вопрос с помощью калибровки платформы. Часто платформы хорошо калибруются уже на заводе, но если вы много печатаете, либо создаете свой принтер по чертежам RepRap, то вам придется делать это самому. Обычно это происходит так: экструдер, выполняя команды программы, прижимается в разных точках платформы (обычно по углам), а вы корректируете расстояние платформы до него, вручную приподнимая ее. Необходимое расстояние от платформы до экструдера может замеряться как с помощью листов бумаги (примерно 100 микрон), так и специальными инструментами от производителя.

### Кругозор

Посмотреть



<http://www.youtube.com/watch?v=Kj9rYhVqP1M>

Двухминутное видео с инструкцией калибровки принтера RepRap Prusa i3 Hephestos. Обратите внимание, что калибровка производится с помощью листов бумаги.

<https://www.youtube.com/watch?v=6HZiUA673Y&feature=youtu.be&t=48s>

Up! Plus 2 умеет калибровать себя сам.

### Устройство платформы

Вы можете справедливо отметить, что проще, чем платформа ничего быть не может. Действительно, в самом простом варианте исполнения это просто кусок стекла или алюминия. А вот при добавлении самой возможности калибровки используется система, похожая на бутерброд, нижняя часть используется в качестве крепления элементов для перемещения рабочей платформы, верхняя — рабочего столика, то есть места, куда будет попадать пластик.

Платформы иногда делают подогреваемыми. Это делается с помощью специальной пластины прямо под рабочим столиком, которая, нагреваясь сама, нагревает и столик. Если у вас возник вопрос «зачем», то я поясню.

С некоторыми пластиками можно без особых проблем работать и без подогреваемой платформы, но ABS (немного позже я остановлюсь на материалах отдельно), а также целый ряд других материалов, обладает двумя неприятными особенностями: высокой температурой экструзии и высоким процентом усадки, что приводит нас к двум следствиям: быстрым остыванием модели и ее деформацией. Если первое следствие весьма очевидно, то второе неплохо было бы объяснить.

Деформация происходит, если слои остывают неравномерно, ведь тогда они неравномерно и усаживаются. То есть нашей целью становится обеспечение равномерного остывания и начать стоит с самого низа — рабочей платформы, для этого и требуется ее подогрев.

А еще столик иногда делается съемным для удобства снятия модели.

## Материалы для платформы.

Столик не является очень уж высокотехнологичной частью принтера, но интересен в другом аспекте, а именно: в каком материале выполнен. Технически, для этой роли может использоваться, что угодно, хоть кусок хлеба, хоть лист бумаги, но некоторые материалы считаются более подходящими.

### Стекло

Стекло кажется идеальным для этой должности. И самым главным его достоинством можно назвать, что оно... бьется! Это не так странно, как звучит, если переформулировать: стекло невозможно погнуть, а любые его повреждения будут сразу заметны. При печати слоем в 50-100 микрон даже самое небольшое искажение может свести на «нет» попытки создать качественную модель. В случае со стеклом, такое искажение нельзя будет не заметить.

Другим плюсом можно назвать доступность. Купить кусок стекла, а потом выпилить его до нужных размеров не будет большой затратой. Если же вы не сможете сделать это самостоятельно, вы всегда можете закатать нужный кусок в любой ремесленной лавке.

Наконец, платформа из стекла не деформируется при нагревании, в отличие, например, от металлов. Это также означает, что в процессе печати ваш столик остается идеально ровным.

Стекла для платформы должны быть достаточно большой толщины (от 3 мм), но и излишняя толщина тоже будет ошибкой. Если ваша платформа подогревается, при толстом стекле она не сможет сделать это равномерно. Да и излишнее увеличение веса принтера из-за тяжелого стекла нам ни к чему.

Печатать на простом стекле не так удобно, так как оно не любит температуры свыше 100 градусов. Кроме этого обычное стекло имеет свойство трескаться при смене температур, а это значит, что и остывание должно быть равномерным. Можно печатать на защитном стекле, из которого делаются, например, градусники (оно выдерживает температуры до 200 градусов). Третий вариант — боросиликатное стекло, которое используется, например, в каминах, почему бы ему не попасть к вам в качестве рабочей платформы?

Существует еще множество видов стекол, часть из которых подходит и нам, однако большинство печатников использует самые обыкновенные. Они обеспечивают достаточное качество и легко доступны, а из-за небольшой цены их не жалко выкинуть при наличии повреждений.

### Металлы

Я снова повторяюсь, что печатать вы можете на любой платформе, все ограничено лишь вашей фантазией. Из металлов самым популярным материалом является алюминий. Дешевый и легкий, он хорошо подходит почти для любых конструкций. Неплохими вариантами могут также считаться сталь и медь, но они все же не так популярны.

Металл прочнее, чем стекло, он не разобьется и не треснет от нагрева, это же рождает важный минус: он гнется. Возможно, вам покажется, что это несущественно (ну кто в здравом уме будет пытаться его погнуть?), но не все так просто.

Металл может гнуться прямо во время печати, так как при нагреве расширяется. Для того, чтобы избежать этого, часто используются толстые листы, которые ограничивают этот процесс. В целом же, проблемы неравномерности платформы при хорошей калибровке обычно не часто всплывают, а учитывая, что лист алюминия прогревается лучше и равномернее стекла, металлы не такой плохой выбор, как может показаться.

# 3D печать, кратко и максимально ясно

## Акрил

Оргстекло тоже является достаточно распространенным материалом, в основном, из-за цены. Другим плюсом оргстекла является удобство обработки: в отличие от стекла, которое необходимо резать лазером, оргстекло в кустарных условиях можно обрезать даже самой обыкновенной пилой. Наконец, оно обеспечивает хорошую адгезию пластика.

Из минусов можно выделить легкость повреждения акриловых рабочих столиков: в отличие от обычного стекла, органический вариант легко царапается. Несколько царапин не сильно отразятся на качестве печати, но если панель серьезно повреждена, то ее, скорее всего придется заменить.

Кроме этого, как и металлы, акрил расширяется при нагреве. Нивелируется эффект точно также — увеличением толщины листа. Но и здесь надо знать меру — даже учитывая то, что акрил сравнительно легкий материал, излишняя толщина даст ему прогреться равномерно, и, как следствие, не позволит обеспечить качественную печать.

## Пластмассы

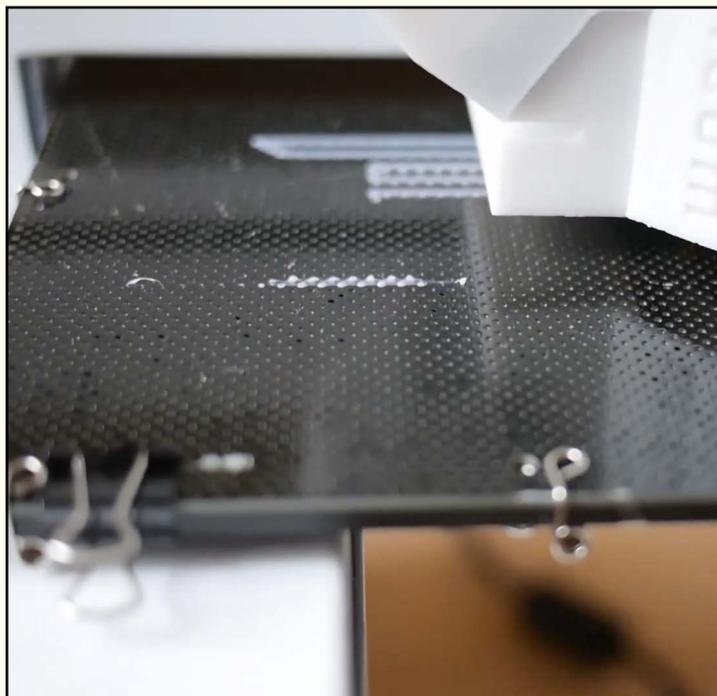
Пластмассы не получили такого широкого распространения, как другие материалы, но тоже могут успешно применяться в качестве рабочей платформы. Такими материалами могут являться, например, Поликарбонат или Полиэфиримид.

Пластики обладают самыми разнообразными свойствами, поэтому обеспечивают самые разнообразные результаты. К сожалению, пластмассы не являются в достаточной мере проработанными материалами в самодельных принтерах, а производители, использующие подобные материалы, обычно не распространяются о том, что именно они используют.

Но не стоит отчаиваться, три указанных выше материала с лихвой покроют большинство ваших фантазий и до пластика вам добираться, скорее всего, не придется.

## Перфорированная платформа.

Иногда платформу делают перфорированной: с множеством дырочек по всей плоскости. Первый слой пластика попадает в них, что обеспечивает надежную фиксацию модели на рабочей поверхности. Это и является несомненным плюсом данного метода. К сожалению, такой он имеет и существенный минус, а самые проницательные читатели уже поняли какой. Первый слой модели приходится печатать с рафтом, чтобы именно он (слой) попадал в отверстия, а модель потом можно было легко отделить. Конечно, это не является обязательным, но позволяет сохранить хорошее качество в большинстве случаев, когда печать без них варьируется от модели к модели и от случая к случаю.



Перфорированная платформа.  
Скриншот. Видео: [PrintMo<sup>7</sup>](#)

Перфорированные платформы сложнее в чистке и уходе: они требуют вымачивания в ацетоне или других растворителях каждый раз после печати. Это рождает серьезное требование к функционалу принтера: платформа должна легко сниматься, а потом так же ставиться обратно. Стоит ли говорить, что на большинстве принтеров такая процедура потребует дополнительной калибровки?

Словом, перфорированные платформы являются достаточно спорным моментом и, скорее, делом вкуса, так как упрощают и одновременно усложняют печать.



Рафт — подложка, которая имеет генерируется слайсером под фигурой. Немного подробнее про него вы сможете узнать ближе к концу главы.

Фотография: [wiki.ikaslab.org<sup>8</sup>](http://wiki.ikaslab.org)

# 3D печать, кратко и максимально ясно

## Адгезия.

Это страшное слово является предметом ожесточенных споров в среде профессионалов уже не первый год. Адгезия — прилипание пластика к платформе. Все дело в том, что далеко не всегда пластик прилипает, а если прилипает, то может и отлипнуть впоследствии. Если это происходит, то модель смещается, нарушается процесс печати, и вы получаете горстку лапши из пластика вместо того, что хотели получить. Чтобы добиться этого эффекта было придумано невероятное количество любительских и специальных средств. Честности ради, замечу, что не имею решительно никакой возможности дать стопроцентный рецепт, так как адгезия зависит от множества факторов, часто ситуативных, мои способы могут не работать у вас. Прилипание обеспечивается одним или несколькими сразу из следующих способов:



Если верить автору, то ошибка произошла как раз по вине низкой адгезии.  
Фотография: Chris Cecil<sup>9</sup>

- Подогреваемая платформа
- Обычный PVA клей
- Синяя малярная лента
- Каптоновая лента
- Пиво
- Лак для волос
- Специальный лак для принтеров
- Сахарный сироп
- Специальная адгезивная пленка
- Раствор пластика

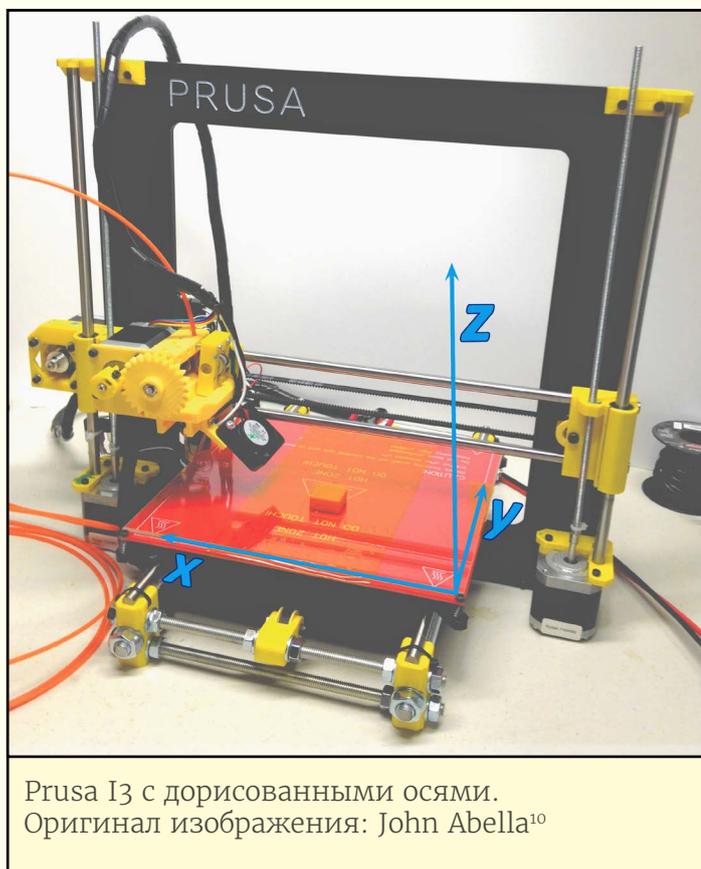
Кругозор

Статьи



<http://3dtoday.ru/blogs/akdzg/from-classics-to-mysteries-my-test-surfaces-for-printing/>  
Эксперимент автора сразу с огромным количеством средств. На русском.

## Кинематическая система.



Вот мы с вами и подобрались к финальной части описания пути нити. Нить выдавливается, но если бы она делала это только в одной точке, то окончательный результат не имел бы никакой разницы с аналогией со свечкой. К счастью, экструдер способен наносить пластик в самых разных местах, создавая ту самую напечатанную модель. О том, как происходит перемещение, мы с вами и поговорим.

На текущий момент существует два основных метода позиционирования экструдера: это так называемое перемещение в декартовых координатах и метод, которым пользуются дельта-принтеры.

Декартовы координаты известны большинству по школьному курсу геометрии. Это построение трехмерных фигур с использованием трех осей: X и Y, отвечающие за длину и ширину фигуры, и Z, отвечающая за высоту.

Когда мы говорим о принтере с декартовой системой координат мы имеем в виду, что каждая из его частей движется по одной или нескольким из осей. Но так как в данной конструкции движимых частей может быть всего две: платформа и экструдер, то и количество вариантов ограничено. Итак, что мы можем

придумать:

1. Платформа движется по одной из осей, экструдер движется по другой и в высоту.
2. Платформа движется только в высоту; экструдер движется по двум осям.
3. Экструдер движется по одной из осей, платформа — по другой и в высоту.
4. Платформа фиксированна, движется только экструдер.
5. Платформа движется в плоскости, экструдер в высоту.

Последние два варианта можно смело отбросить, как достаточно экзотические, и сконцентрироваться на первых трех, которые можно встретить в огромном количестве коммерческих и самодельных принтеров.

### Y-bed; XZ-head

Движение платформы по одной из осей. Такой дизайн принтеров является одним из самых популярных (наравне с XY-head), вследствие следующих положительных сторон:

- Конструкция получается достаточно простой
- Принтер можно сделать компактным (при условии открытого корпуса). Но говоря об этом, стоит помнить, что компактность эта чисто визуальная: вам все же потребуется платформа в два раза больше, чем максимальный размер модели.

- Можно легко удешевить конструкцию.

При этом нужно понимать, что такая конструкция обрела свою популярность в первую очередь из-за

# 3D печать, коротко и максимально ясно

удачного дизайна принтера RepRap Mendel, Prusa Mendel и последующей его модификации Prusa I3 (представленного на изображении сверху). В целом же, такой принтер имеет целый ряд ограничений.

Конструкция в изначальном варианте не предназначена для печати высокотемпературными пластиками. Мы помним, что ABS-пластик, например, требует равномерного остывания. Конструкция же в изначальном варианте не предполагает наличия закрытого корпуса, не говоря уже о прогревании модели для равномерного остывания. Вопрос может быть частично решен с помощью «аквариума» из акрила, стекла или пластика, накладываемого поверх принтера, либо корпуса, что нивелирует, пускай и визуальную, компактность.

Другая важная проблема — движение платформы. При больших скоростях и большом размере самой модели, ее может срывать с платформы. Речь, конечно, не идет, например, о перфорированных платформах или идеальной адгезии, но проблема имеет место быть, причем она увеличивается с размером самой модели. В любом случае данная конструкция накладывает определенные ограничения на скорость печати и размер модели.

В целом же, конструкция, нелишенная недостатков, остается достаточно популярной.

## Домашнее задание

Посмотреть



<https://youtu.be/Sh78sEHHa5k>

Работа принтера Prusa I3. Видео скучное, до конца смотреть, конечно же, необязательно.

## YZ-bed; X-head

Движение экструдера только по одной из осей. Такая конструкция сложнее предыдущей и не так хорошо представлена на рынке. Она получает все преимущества и недостатки предыдущей, плюс, конечно же, приятную эстетичность принтера. Самыми видными представителями данной категории являются, конечно же, принтеры «UP!», но не стоит забывать и про таких игроков, как 3D Systems.

## Домашнее задание

Посмотреть



[https://youtu.be/\\_6HZiUA673Y?t=1m57s](https://youtu.be/_6HZiUA673Y?t=1m57s)

Один из самых ярких представителей класса, PP3DP Up! 3D Printer.

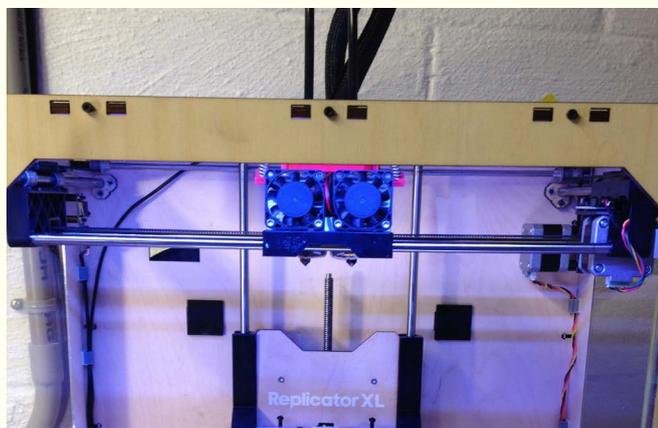
## Z-bed; XY-head

По аналогии можно понять, что это значит движение платформы только в высоту.

При печати движется только экструдер, а платформа остается неподвижной. Неподвижна и деталь, так что у вас будет меньше проблем с адгезией к платформе, а также серьезных ограничений по скорости печати и размеру детали.

Наконец, такие принтеры действительно удобно делать закрытыми с максимальным использованием пространства, и именно такими вариантами они, в основном, представлены.

Но не все так просто и нам придется остановиться на этой конструкции подольше. Все дело в том, что она имеет вариации, число которых несметное множество, но если вы решите купить или создать принтер, вы, скорее всего, столкнетесь с одной из следующих четырех:



На фотографии можно заметить двигатель на осях (справа), перемещающий экструдер  
Фото: John Abella<sup>31</sup>

- Первый вариант — с двигателями на осях. Один или два двигателя находятся на оси и двигают каретку экструдера, прокручивая ремни. Сами же оси двигаются благодаря статичным двигателям у основания.

Вариант можно смело назвать несколько устаревшим и несколько уступающим другим. Из минусов можно отметить необходимость двигать вместе с кареткой тяжелые двигатели, что приводит к замедлению скорости печати. Самым ярким представителем считался MakerBot Replicator (а также бесчисленные его клоны) вплоть до пятого поколения, когда перешел на H-bot.

Тем не менее, такая механика активно (и с хорошими результатами) используется и сейчас.

- Второй вариант часто называется по имени принтера Ultimaker (Ultimaker style gantry). Это одна из трех «серьезных» версий. Более того, Ultimaker не просто так считается одним из самых быстрых принтеров — не без помощи кинематики.

В данной конструкции статичные двигатели прокручивают ремни, проталкивающие каретки по валом. Каретки в свою очередь перемещают экструдер.

Такая конструкция значительно дороже и сложнее в реализации, но в данном случае двигатели сняты с осей, что позволяет ощутимо увеличить скорость печати и повысить качество при ее увеличении. Тем не менее, данную конструкцию можно признать достаточно сложной: она включает в себя множество ремней, и имеет особые требования к качеству валов.

А мы знаем, что чем сложнее конструкция, тем больше может сломаться.

# 3D печать, коротко и максимально ясно

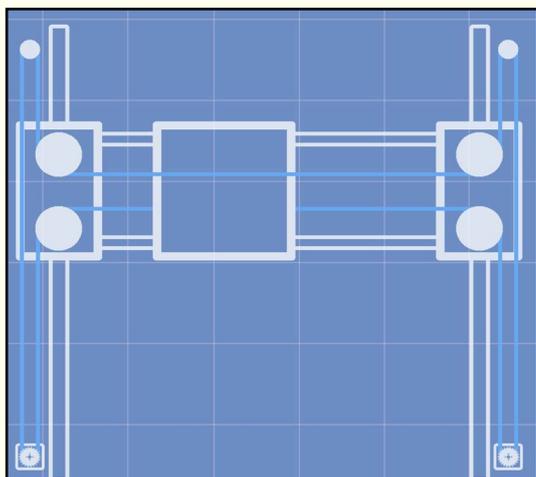
## Кругозор

Посмотреть



<https://www.youtube.com/watch?v=80N4qCBDuwo>

К сожалению, показать кинематику будет сложно. Видео ускорено и малопонятно, но я предлагаю последить за двумя двигателями.



- Третий вариант называется Hbot. Он основан на двух двигателях, вынесенных на корпус принтера, соответственно, не влияющих на скорость печати.

Я предлагаю вам обратить внимание на схему. Внизу видно два двигателя. Если они двигаются в одну сторону, то каретка перемещается по оси X, если же они двигаются в разные, то она перемещается по оси Y. Если же один из двигателей остается фиксированным, то каретка движется по диагонали.

Эта система достаточно сложна для понимания, но если понять ее принцип, то все становится достаточно очевидно.

Так или иначе схожую механику используют множество коммерческих принтеров, например, Makerbot (с пятого поколения) или Stratasys Mojo.

## Кругозор

Посмотреть



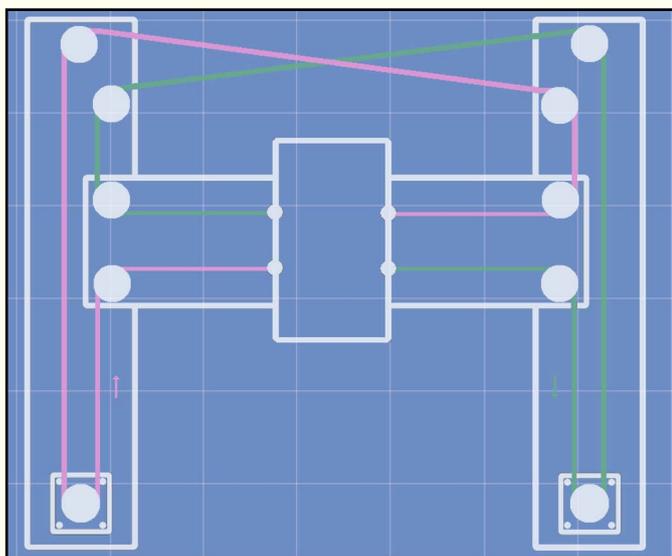
[https://www.youtube.com/watch?v=ei4lPk\\_aM9Y](https://www.youtube.com/watch?v=ei4lPk_aM9Y)

Демонстрация механики. Посмотрите обязательно, даже если поняли принцип по моим объяснениям.

<https://www.youtube.com/watch?v=YzEQ6fJ5ZQo>

3D принтер рисует ручкой. Ничего необычного. Обратите внимание на то, что двигатели разнесены. Смотреть до конца необязательно.

У H-bot'a есть свои профессиональные болезни. Все дело в том, что силы в конструкции при движении по оси X противоположны, и если конструкция хлипкая, то она уже не может давать такой точности. Поэтому для него используются прочные рельсовые направляющие вместо валов.



Четвертый вариант называется CoreXY и является усовершенствованной версией первого. Здесь используются два ремня, а силы более сбалансированы и не «гнут» раму. Взамен мы получаем более сложную конструкцию и два ремня вместо одного.

CoreXY распространена даже меньше, чем H-Bot, из коммерческих моделей можно отметить, например, AirWolf Axiom, которые вообще отдельно подчеркивают кинематику своего принтера.

Зато можно обнаружить множество свободных дизайнов на вики RepRap.

На картинке кажется, что ремни пересекаются, в трехмерном пространстве такого не происходит.

## Кругозор

Посмотреть



<https://www.youtube.com/watch?v=h4HQISZROO8>

Снова 3D принтер, рисующий ручкой, построенный на другой системе. Смотреть до конца необязательно.

В качестве заключения мне бы хотелось отметить, что не стоит выбирать принтер **только** по кинематике. Скажем, есть прекрасные YZ-bed машинки, великолепно справляющиеся со своими задачами, хотя их кинематику и можно назвать несколько ограниченной. Если же мы говорим о Z-bed машинах, то существует множество (и их большинство) хороших принтеров с двигателем на оси X.

Выходит так, потому что когда мы говорим о качестве печати, то мы имеем в виду, в первую очередь, качественную сборку и хорошее качество отдельных компонентов. Все это играет большее значение, нежели выбранная система. Это в равной степени касается и самодельных принтеров.

# 3D печать, кратко и максимально ясно

## Дельта-принтеры

Дельта-принтеры, пожалуй, мечта и любовь всего сообщества (ох и заругают меня за субъективное мнение, приподнесенное как объективное), связанного с 3D печатью. Дельта-принтеры круто и эффектно выглядят, а также хорошо себя показывают в печати, являясь второй по распространенности системой.

Конструкция дельта-принтеров взята с дельта-роботов, которые очень хорошо себя показали в областях, где нужна высокая точность и скорость, например, в упаковочной промышленности.

Для создания 3D модели данный принтер использует рычаги, закрепленные на каретках. Каретки свободно перемещаются по осям вокруг круглой платформы, изменяя положение экструдера, закрепленного на рычагах. Выглядит это безобразие примерно как на фотографии справа.

### Домашнее задание

Посмотреть



<https://www.youtube.com/watch?v=v9oeOYMRvuQ>

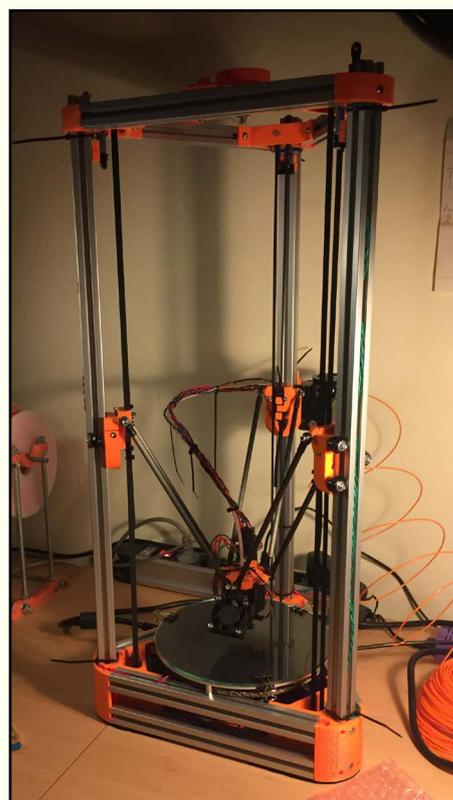
Мама и папа современных дельта принтеров, дельта-робот успешно используется для различных задач на заводах.

<http://www.youtube.com/watch?v=l9ZISxSo2X0>

Рекламка мфу, основанного на дельта принтере, от flux. Этот проект смог собрать \$1.641.075 из требуемых \$100.000 на кикстартере и после видео вы поймете, почему.

<https://www.youtube.com/watch?v=N7XVxtgHHhY>

А еще дельта-принтеры умеют быть очень-очень милыми.



Delta-принтер Kossel.  
Фотография: John Rood<sup>11</sup>

Кроме того, что они круто выглядят, 3D принтеры типа дельта имеют еще множество достоинств. Они тихие, быстрые и легко строят высокие объемы. Им очень идет боуден экструдер, так как в данном случае облегчение конструкции существенно влияет на скорость (при наличии кулеров для своевременного охлаждения модели).

Имеют они и свои недостатки. Во-первых, они сложнее в построении и настройке, есть множество нюансов, например, идеально параллельные направляющие и повышенные требования к материалам корпуса. Математическая модель для печати существенно сложнее, да и само направление не так хорошо разработано, как в случае с традиционными «декартовыми» принтерами, так что никогда не знаешь, где может закрасться ошибка. Если модель оснащена боуденом, то она автоматически забирает и все его недостатки, как, например, невозможность печати гибкими материалами.

Тем не менее, я ни разу не слышал, чтобы кто-то купил/собрал дельту и жаловался, все довольны, особенно если речь идет об уже показавшей себя модели. Но создание дизайна такого принтера самостоятельно обернется сущей проблемой. Словом, дельта для крутых ребят, которые не боятся сложностей и готовы экспериментировать.

Но варианты механической организации 3D печати этим не ограничиваются, существуют более интересные, пускай и менее популярные варианты. Несмотря на потрясающий внешний вид, их работанность оставляет вопросы, так что я не берусь описывать их. Вместо этого я предлагаю вам насладиться их внешним видом. Я настоятельно рекомендую посмотреть видео в следующем блоке. Уверен, вам понравится.

## Домашнее задание

Посмотреть



<https://youtu.be/iVg7WrgHJik>

Кинематика Scara, принтер Wally.

<https://www.youtube.com/watch?v=j6j6BJ4VraA>

Кинематика Polar, принтер R-360.

<https://youtu.be/yBACGgC2kKw?t=49s>

Несколько иной вариант Polar кинематики, принтер Polar3D.

<https://www.youtube.com/watch?v=i6POrjVXgsk>

Кинематика Polar-Scara, а вот принтер существует только в виде концепта и названия не имеет.

<https://youtu.be/XGL35u-xssw>

Кинематика Robot Arm, принтер, основанный на Dobot Arm.

Конечно, этим возможные системы не ограничиваются, всегда можно найти что-нибудь интересное. Что уж говорить про промышленные системы, всегда отличавшиеся большой вариативностью.

# 3D печать, коротко и максимально ясно

## Корпус.

Корпус еще проще, чем платформа, а потому и описывать его можно таким же образом. Корпусы различаются по материалу изготовления и типу.

К корпусу 3D принтера есть несколько требований. Самое основное из них — устойчивость: если при печати принтер будет покачиваться из стороны в сторону, то и о качестве можно будет забыть. Вторым требованием можно назвать прочность. Третьим будет цена. Материала на корпус всегда будет уходить достаточно много и его цена всегда будет существенно влиять на конечную цену продукта. Итак, исходя из выбранных требований, можно отметить несколько материалов, ставших классическими:

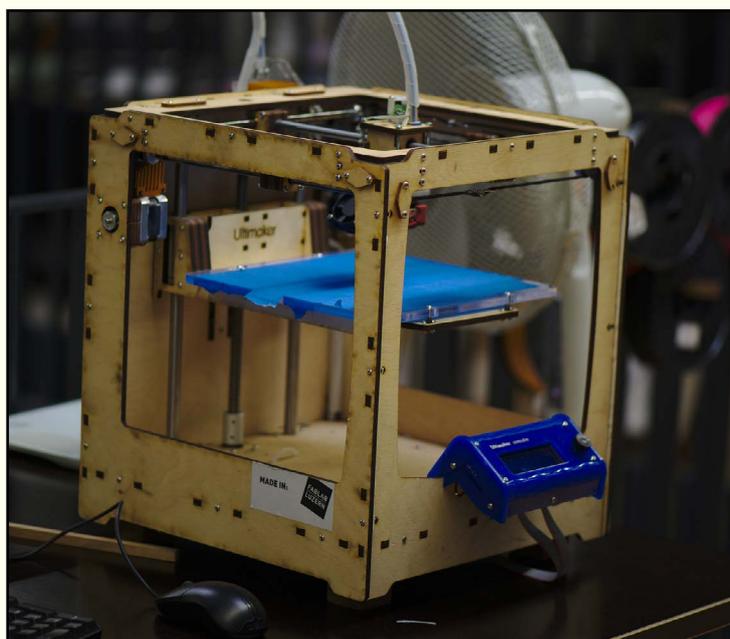
- Дерево. Как отмечают Ultimaker, дерево обладает хорошими характеристиками для своей цены. Оно достаточно прочное, хорошо убирает вибрации и, самое главное, дешевое.

- Металл. Металл всегда выбирается в ситуациях, когда прочность важнее цены. Кроме того, он тяжелее дерева и делает принтер устойчивым. К сожалению, он существенно увеличивает цену производства.

- Пластмассы. Мы привыкли ассоциировать пластмассы с чем-то ненадежным, но это далеко не всегда так. Некоторые виды пластмасс показывают хорошие характеристики при сравнительно небольшом весе (а этот параметр тоже очень важен в сфере «настольных» принтеров). Таким является, например, полиамид.

Необходимо отметить, что и важен не только материал, из которого изготавливают принтер, но и его качество, качество сборки и толщина корпуса. Не надо иметь ученую степень, чтобы предположить, что полумиллиметровый лист алюминия будет служить меньше и даст худшие результаты, нежели 6 мм дерева.

В любом случае, пока мы не говорим о профессиональных принтерах с термокамерой, материал не играет большой роли.



Ultimaker, сделанный из дерева.  
Фото: Tonnerre Lombard<sup>12</sup>



Пластмассовый XYZ Da Vinci.  
Фото: Creative Tools<sup>13</sup>



# 3D печать, коротко и максимально ясно



Stratasys uPrint использует термокамеру.

Фото: Creative Tools<sup>16</sup>



MakerBot Replicator Z18 тоже.

Фото: Creative Tools<sup>17</sup>

Термокамера! Как много ласки в этом слове! Действительно, подогрев воздуха во время печати — то, что не могут позволить себе большинство производителей, и то, что редко делается в самодельных принтерах RepRap (хотя кое-что и существует). А так ли она нужна?

Нужна. Наличие термокамеры существенно повышает качество печати, не позволяя пластику усаживаться пока процесс не закончен и, таким образом, избегая деформаций. Другая важная причина использовать принтеры с закрытой термокамерой — лучшая адгезия между слоями, отсюда: лучший внешний вид и лучшие физико-технические свойства.

Ну раз уж она так важна, то почему почти не встретить? Если на секундочку забыть о патентах (да, термокамера защищена патентами), то мы сталкиваемся с целым рядом проблем.

Для печати тем же ABS пластиком требуется нагрев камеры до 70-90 градусов или даже выше. Если в камере в этот момент будет находится электроника, которая и так любит перегреваться, то это серьезно скажется на ее времени жизни. Скорее всего, она не проживет даже 12-13 часов, умерев еще до того, как вы закончите. Соответственно, первым и самым важным, что вам потребуется для создания термокамеры будет изоляция элементов, имеющих тенденцию к перегреванию.

Второй проблемой является поддержание стабильно высокой и равномерной температуры. Даже 70 градусов не кажутся детской цифрой, что уж говорить о действительно высокотемпературных пластиках. В то время, как температура снаружи явно не дотягивает до подобных значений, вам потребуется изолировать камеру от внешнего мира. Причем, чем лучше изоляция, тем меньшие по мощности нагреватели вы сможете использовать и тем больших температур достигать.

Равномерность обеспечивается с помощью контроля циркуляции воздуха внутри камеры, что тоже требует серьезных просчетов и обеспечивается с помощью вентиляторов.

## Особенности FDM.

Наконец, мы разобрались с устройством и может предметно поговорить об особенностях, достоинствах и недостатках 3D печати.

## Подпорки, бримы и рафты.

Со сложной геометрией у FDM принтеров проблемы. Все дело в том, что нависающие элементы технология не любит: ну как накладывать слой на воздух? Еще хуже дело обстоит с нависающими элементами, которые связываются с основной конструкцией выше своей нижней точки. Тем не менее печать таких моделей возможна с помощью подпорок (поддержек, сапортов, supports), которые начинаются прямо от платформы и на которые ложится тот самый слой. Поддержки иногда рисуют при дизайне модели, чаще они генерируются в слайсере.



Фотографии с целыми/снятыми подержками. Если бы их не было, то подбродок обезьянки пришлось рисовать бы по воздуху.

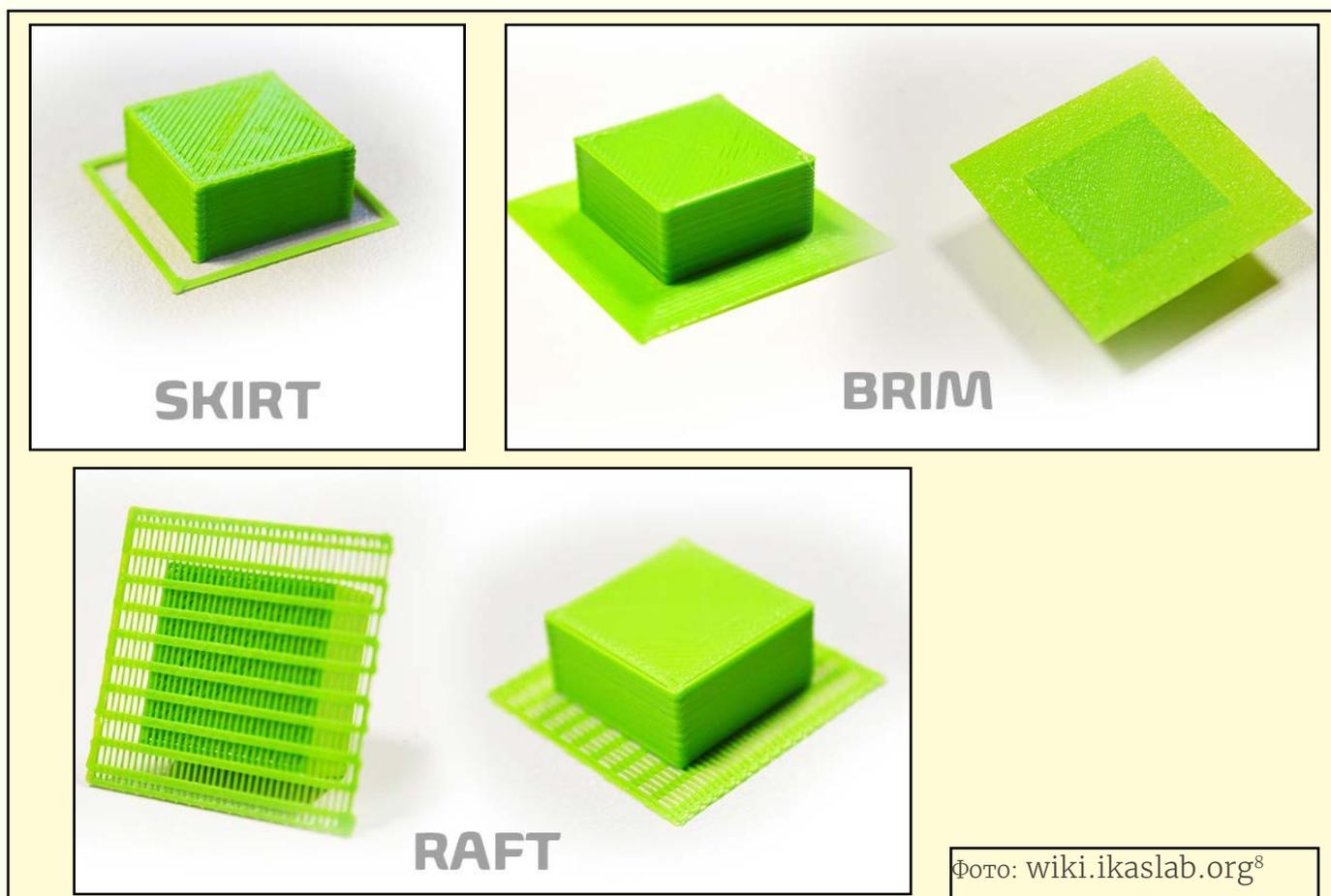
Фото: Chris Cecil<sup>18,19</sup>

К подержкам есть определенные требования: они должны удерживать пластик, а затем без особых проблем отделяться. Если печатать их из одного материала, то они часто оставляют следы на модели, которые обычно зашлифовываются или убираются растворителем при постобработке модели. Другой выход — печатать подержки из растворимого материала. Если мы говорим о домашней печати, то таковым может являть PVA (растворимый в воде) или Hips (растворимый в лимонене). После печати

# 3D печать, коротко и максимально ясно

они просто погружаются в собственный растворитель, растворяются и вы получаете деталь без дефектов от поддержек.

Другие проблемы FDM принтеров — неровная платформа и плохая адгезия. Чтобы немного ее облегчить, на платформе часто печатятся бримы (brim) и рафты (raft). Мы уже затрагивали их, но чтобы вы не возвращались назад, я снова добавлю их фото.



Из конструкций, возводимых для удобства печати, мы имеем:

- Скирт (скёрт; skirt; юбка) — тонкий ободочек пластика вокруг модели. Он не связан с моделью, и никак не влияет на печать. Зато он выполняет другую важную функцию: он позволяет посмотреть, как работает экструдер, как хорошо пластик прилипает, проверить, что температуры настроены правильно, словом, допечатная проверка. Добавлю только, что скирт может печататься в несколько слоев.

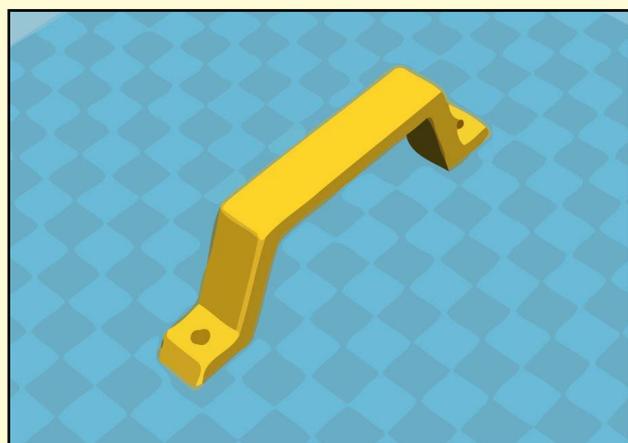
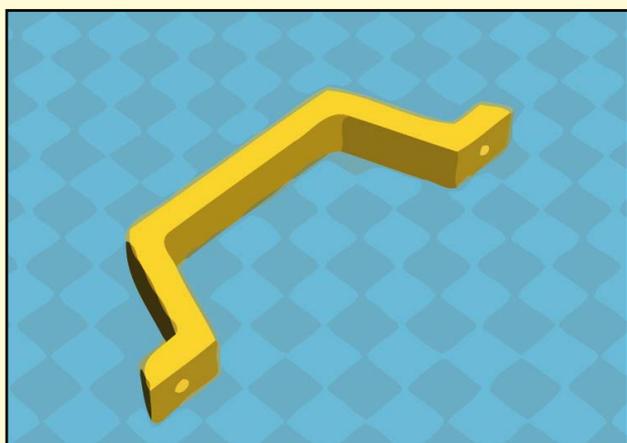
- Брим (brim) — кайма вокруг модели, дополнительных первых слоев. Брим удобен для лучшей адгезии в случае отклеивания краев или их деформации. Кроме этого, очень полезная вещь, если основание у модели очень маленькое, неустойчивое. После печати брим обрезается. В отличие от рафта, брим не деформирует первый слой.

- Рафт (raft) — подложка, конструкция, которая строится под моделью. Она не однородная, как брим, а скорее, существует в виде сеточки. Рафт вообще штука очень вредная, так как после печати основание требует обработки. С другой стороны, рафт исправляет незначительные проблемы калибровки платформы и неровности (чего не делает брим) и обеспечивает крепкое сцепление первого слоя модели с платформой. Все же от рафта, по возможности, стоит отказаться, это обеспечит вам более «чистую» печать.

Все эти конструкции не всегда обязательны, но могут помочь. В любом случае, все всегда зависит от модели, свободного времени и желания обрабатывать модель уже после печати.

## Слоистость.

Давайте поговорим о главном недостатке FDM печати: слоистость. Внешне, зачастую, можно даже отделить один слой от другого, хотя это, конечно, зависит от его толщины. Но если внешность и можно исправить, то вот функционально модель не столь прочна и широка в своем применении. Более того, ее прочность зависит от направления силы, оказанной на модель. Если попытаться надавить на слои, то модель будет достаточно крепкой, если давить поперек слоев, то есть пытаться разорвать их, то прочность резко снижается. Это не столь критично для элементов интерьера, сколько для функциональных деталей. Например, ручку двери автомобиля лучше положить на бок при печати, чтобы при открытии двери сила оказывалась в правильном направлении.



Первый вариант предпочтительнее по двум причинам:

- из-за вектора силы, оказываемой при работе
- из-за отсутствия необходимости поддержек при печати

Модель: <http://www.thingiverse.com/thing:179261>

Слайсер: Cura

В некоторых случаях логично разделить модель на несколько частей, распечатать их и склеить с помощью клея или растворителя пластика (например, ацетона для ABS), чтобы добиться большей прочности.

## Первичная постобработка.

Собственно, постобработка для разных пластиков будет разной, однако мы можем выделить несколько основных моментов. Для начала надо убрать внешнюю слоистость (которая выглядит как серьезный дефект для готового изделия). Она характеризуется как некоторая «ребристость» изделия и хорошо заметна, например, на фотографии справа.



Фото: Creative Tools<sup>20</sup>

# 3D печать, кратко и максимально ясно

Все способы снизить внешнюю слоистость можно условно разделить на четыре категории: механическое и химическое снятие лишнего материала, добавление нового слоя и тепловая обработка.

Механическая постобработка может проводиться шлифовкой с помощью наждачной бумаги с плавным понижением зернистости. Другой способ — использовать инструмент, а именно: шлифовальную машину. Этот метод нельзя назвать самым хорошим: он дешевый и доступный, кроме того, простой, но не поможет в случае обработки мелких моделей или наличия мелких деталей — в этих случаях модель может быть испорчена. Опасен он будет и в случаях, когда модель должна идеально подходить другим частям (но тут, пожалуй, ничего не подойдет). Более того не все материалы для этого подойдут, например, PLA шлифовать сложно. Есть и другой метод механической постобработки — пескоструйная обработка. Она состоит в направленном распылении на модель частиц песка, пластика или соды, которые полируют модель, снимая внешние слои. Пескоструйная обработка не получила особой популярности, в первую очередь, из-за необходимости дорогого оборудования в случае домашней печати, но активно используется для промышленной обработки.

## Кругозор

Посмотреть



<http://www.diyoursself.ru/technology/3d-print-finishing-technique-for-improved-surface.html>

На английском, но все, что нужно перевести: до, после и вместе. Много фотографий. Обратите внимание, что пескоструйная обработка немного изменила цвет PLA пластика.

Другая большая область: химическая постобработка. Растворители для разных пластиков разные, а вот наносить их можно всего тремя способами: испарением, нанесением с помощью губки/тряпки и погружением. Химические растворители — штука токсичная, часто летучая (отравиться, даже когда закончили), иногда взрывоопасная. Так что, пожалуйста, будьте всегда осторожны, работайте с ними в хорошо проветриваемых помещениях, желательны, респираторах и перчатках, а также соблюдайте инструкции и элементарные правила безопасности.

## Домашнее задание

Посмотреть



[http://www.youtube.com/watch?time\\_continue=19&v=ZJWhfpWlGFg](http://www.youtube.com/watch?time_continue=19&v=ZJWhfpWlGFg)

Видео озаглавлено как худший вариант развития событий при работе с ацетоновой баней. Пожалуйста, посмотрите и не повторяйте дома.

Почти у каждого пластика есть свой растворитель: это ацетон для ABS, дихлорэтан и дихлорметан для PLA, лимонен для HIPs. Немного попозже мы поговорим о материалах, там будет побольше информации. Пока что же остановимся на самой химической постобработке.

Краеугольный камень всех пластиков — ABS, дешевый, прочный, сложный. Так давайте поговорим о химической постобработке на его примере. Первый, самый быстрый и самый спорный вариант — просто погрузить его в ацетон. Почему спорный? ABS пластику требуется примерно 10-20 секунд,

# LittleTinyH Books

чтобы потерять вообще какую-либо форму: грубо говоря, положили деталь, а достали нечто. Зато быстро. Другой вариант — медленный, натирая губкой или тряпкой, смоченной в ацетоне. Он хорошо подойдет при точечной обработке или при желании хорошо контролировать процесс. Есть и альтернатива: специальный маркер, заполненный ацетоном, под названием Makeraser. Наконец, есть вариант с баней (холодной или горячей). Этот процесс основан на испарении растворителя в закрытой емкости с моделью. Есть важное правило: модель не должна касаться растворителя. В зависимости от того, как хорошо испаряется растворитель, емкость может подогреваться или нет. Баня позволяет добраться до труднодоступных частей модели и производит более «мягкое» сглаживание, нежели простое погружение. При работе с баней особенно важно соблюдение техник безопасности, худший вариант развития событий вы уже видели.



Собственно, скребок и маркер от Makeraser. Страничка проекта на kикstarter с ОЧЕНЬ странным видео на английском:

<https://www.kickstarter.com/projects/80558896/makeraser-makelastic-accessories-for-3d-printers/description>

## Домашнее задание

Статьи



<http://3dtoday.ru/blogs/rec/cold-acetone-bath-a-simple-example-many-photos/>

Один из самых приличных «гайдов» по созданию ацетоновой бани и постобработке. В данном случае баня «холодная».

<https://youtu.be/Jv-CbnB8Uz4>

Один из вариантов сделать «горячую» ацетоновую баню.

На текущий момент есть два серьезных решения для химической постобработки. Это станция постобработки от Magic Vox от Sky Tech и специальная машинка от Stratasys (весом в 182 кг). Технически, они могут и не потребоваться, но они снизят возможность умереть от отравления, поджечь себя и соседей или натворить еще каких бед. Отличаются они тем, что устройство от Stratasys является мощным, дорогим, промышленным продуктом, а как Magic Vox создан для того, чтобы стоять у вас на столе, рядом с ноутбуком.

# 3D печать, коротко и максимально ясно



Станция финишной обработки от Stratasys<sup>21</sup> (слева) и Sky Tech Magic Box<sup>22</sup> (справа).

Третий способ выглаживания модели — нанесение нового слоя, в первую очередь, из шпатлевки или грунта с последующим его сглаживанием (желательно еще свежего). Раскрывать эту тему нет большого смысла, так как и так много уже написано, благодаря друзьям 3D печатника — моделистам, исправлявших недостатки пластиковых моделей еще задолго до изобретения 3D принтера. В качестве минуса можно отметить, что этот метод увеличивает вес модели и по-прежнему не подходит для моделей маленьких или со сложной структурой, так как вместе с недостатками скроет и маленькие элементы.

## Домашнее задание

Статьи



[globaltao.com/reshenie-problemy/chem-vypolnit-shpaklevku-sbornyx-masshtabnyx-modelej.html](http://globaltao.com/reshenie-problemy/chem-vypolnit-shpaklevku-sbornyx-masshtabnyx-modelej.html)

Спорный в плане оформления, но информативный материал по использованию шпатлевки.

Наконец, есть метод тепловой обработки. Два устройства особенно широко используются для разогревания моделей: это технический (строительный) фен и горелка. Конечно, вы можете использовать зажигалку, спичку, костер, но если вы беспокоитесь о качестве, то даже горелка вариант очень грустный. Строительный фен хорошо сработает с низкотемпературными пластиками вроде PLA, так как они становятся мягкими и можно подкорректировать модель другими инструментами. В целом, метод тепловой обработки не лучший выход, если вы заботитесь о качестве, зато доступный и быстрый.



Скальпель.

Фотография: Markus Grossalber<sup>23</sup>

Для первичной корректировки модели и исправления недочетов, например, провисаний между частями, мы используем инструментарий еще одного друга 3D-печатника — маникюрщицы (или жены). Удивительно, но их инструментарий отлично подходит для пластика. Маленькие ножницы, пилочки, лаки (об этом немного попозже) созданы будто специально для нас. Кроме этого хорошо подходит скальпель или канцелярский нож: ими, в частности, удобно обрезать бримы.

## Домашнее задание

Посмотреть



[http://www.youtube.com/watch?v=DzOPkr7j\\_u4](http://www.youtube.com/watch?v=DzOPkr7j_u4)

Успешное применение сразу нескольких методов: химического и механического (полировочная паста), внезапно, на русском.

## Герметизация.

Модели из некоторых пластиков, напечатанных с помощью FDM, пористые по своей структуре, а это рождает ряд неудобств при использовании, так как они могут пропускать жидкости и газы. Этот эффект можно нивелировать высокой толщиной стенок и разрешением, а также правильно подобранными температурами при печати, но полностью от него избавиться невозможно. Скажем, печатать водопроводные трубы на 3D принтере без необходимой обработки — не лучшая затея. Читатель возразит мне: «Я не буду печатать трубы и сосуды на 3D принтере, глава не нужна!». А я напому читателю, что FDM вообще-то был придуман для быстрой разработки функциональных прототипов, где герметизация иногда просто необходима. Частично с герметизацией мы уже познакомились в прошлой главе, когда говорили о химической и термообработках. Пластик плавится, поры закрываются, все логично. К сожалению, это не является панацеей, герметизации этим методом недостаточно, так как «сплавливаются» только первые, верхние слои. В познании более качественных способов герметизации нам помогут представители других профессий: рукодельницы, строители, художники и сантехники.

Конечно, я хочу поговорить об эпоксидной смоле. Эпоксидная смола была замечена как хороший инструмент герметизации уже очень и очень давно, задолго до изобретения 3D принтерами, и сейчас используются почти всеми, включая моделеров, создателей бижутерии и строителей. Пожалуйста, перед тем, как начать работу, ознакомьтесь с правилами безопасности, предоставляемыми производителем. От себя добавлю рекомендацию защищать открытые участки кожи, слизистые и дыхательные

# 3D печать, коротко и максимально ясно

пути. Я очень расстроюсь, если вы попадете в больницу или умрете из-за моих советов.

Итак, вернемся к эпоксидке. Традиционно она поставляется в двух компонентах: собственно эпоксидная смола и отвердитель, которые, смешиваясь в правильных пропорциях позволяют ей затвердеть спустя определенное время. Есть много эпоксидных смол, не все из них подойдут для нашей задачи. Конкретные марки я советовать не буду, но постарайтесь выбрать из так называемых «быстрых» смол около 30 минут «жизни». Кроме этого, постарайтесь выбирать достаточно жидкие, чтобы вам было удобно наносить их.

3D печать — хороший бизнес и было бы странно, если бы для нас не придумали профессиональных вариантов. Это, в первую очередь, ХТС 3D (красивая упаковка с черепом справа), часто отмечаемое как качественное и дорогое средство для постобработки, известное еще и тем, что плавит верхний слой PLA пластика, делая деталь глянцевой и ровной.

Фотография: Smooth-On<sup>24</sup>



## Домашнее задание

Посмотреть



<http://www.youtube.com/watch?v=GSKxycs3kPg>

Небольшая инструкция по ХТС-3D, на английском, но все просто и понятно.

<https://www.youtube.com/watch?v=g0TGL6Cb2KY>

Вместо ХТС мужчина использует Zap Z-Роху. Видео длиннее, на английском, но достаточно забавное. Если не знаете языка, просто пощелкайте, чтобы уловить суть метода.

Наносить смолы можно и другими способами, например, используя специальный пистолет, который будет смешивать два компонента и выдавливать на модель. Мне такой метод кажется достаточно слабо контролируемым, но я думаю, что все дело заключается в навыках. Тем не менее, оба способа работы с эпоксидной смолой оказываются малопригодными при работе с прототипами, когда важен каждый лишний миллиметр функциональной модели. В этих случаях можно прийти к пропитке модели эпоксидной смолой, которая при грамотной работе почти не влияет на размер. На текущий момент мне известна только одна смола для этой цели: BJB TC-1614. Ее цена хорошо отрезвляет тех, кому кажется, что ХТС-3D слишком дорогая. Страница на официальном сайте: <http://bjbenterprises.com/index.php/epoxy/3d-printed-part-sealer/tc-1614-a-b-569/>

## Домашнее задание

Посмотреть



<http://www.youtube.com/watch?v=sqeSI0z41QI>

Очень скучное видео на английском, зато хорошо описывает технологический процесс.

Эпоксидная смола является необязательным, но важным компонентом для моделей, напечатанных этим методом. Она значительно улучшает физические свойства моделей, герметизирует их и делает их более долговечными. Однако, это достаточно сложно и не всегда оправдано, так что в случае с декоративными элементами можно и пропустить. Если планируется дальнейшая покраска, то эпоксидная смола обычно шлифуется для лучшей адгезии (правила безопасности те же, что и в случае с ее нанесением), а сверху наносится грунт.

Я знаю, что многие работают без грунта, так как акриловые краски и лаки хорошо ложатся и на голый пластик, но я настоятельно рекомендую в начале нанести грунт, и могу даже привести причины:

- Верхний слой грунта вскрывает все ошибки постобработки. Это происходит потому, что разные части модели обрабатываются с разным усердием и в конце приобретают разные цвет и блеск, однотонный грунт позволяет посмотреть на модель новыми глазами.

- Грунт повышает адгезию слоя краски (она не отвалится через неделю использования), а также расширяет список художественных средств (вы можете красить не только акрилом, а, скажем, гуашью или акварелью, или маслом).

- Грунт выравнивает цвет перед покраской. Даже если кажется, что цвет модели одинаковый, это может происходить из-за особенностей нашего зрения. Даже если вы печатали в одном цвете, цвет конечной модели местами может изменяться, например, из-за ошибок корректировки температуры слайсером.

## Нанесение грунта

Итак, на текущий момент мы имеем всего три способа нанесения грунта: с помощью балончика, аэрографа или кистью. Грунт еще иногда наносится валиком или кистью, но я не включаю его сюда, так как вряд ли вы будете обрабатывать модели такими массивными инструментами.

От автомобилистов нам достался стандартный аэрозольный акриловый грунт для покраски кузова. В случае, если вы замахнулись на амбициозные массивные проекты — это то, что вам нужно. В случае, если модели у вас небольшие и вы выбрали этот путь — будьте предельно аккуратны, так как аэрозоли предназначены для того, чтобы легко и играючи покрыть бампер. Можно легко перестараться и нанести слишком большой, неаккуратный слой. Тем более аэрозоли не подойдут, если вы решите грунтовать модель со сложной геометрией — быть аккуратным в этом случае очень сложно.

Другой вариант нам достался от художников — использование кисточек. Этот вариант противоположен первому. Бампер покрасить будет сложно, зато небольшую фигурку — без проблем. Удобно красить модели со сложной геометрии, во всяком случае удобнее, чем в первом. По-прежнему вам будут требоваться навыки и аккуратность, но возможности в этом случае шире. Как и время, потраченное на нанесение.

Третий вариант промежуточный — использование аэрографа. Аэрограф позволяет выполнять работу очень и очень аккуратно, но требует навыков. С другой стороны, для моделей со сложной структурой по-прежнему легче использовать кисточки. Аэрограф — сложный инструмент, который может творить чудеса в руках профессионала, и отлично работает как для больших, так и для маленьких моделей.

Иногда, сразу после нанесения, грунт текстурируется.

## Покраска и лакировка

Про покраску можно написать не просто книгу, а целый десяток, так как это очень широкая тема. Красить можно балончиками, кистями, аэрографом, пальцами, палочкой, никто не останавливает вас в ваших художественных задумках. После покраски вы можете доработать модель, например, состарить ее, сделать потертости, выделить контурами. В любом случае, я оставляю этот раздел художникам, так как сам таковым не являюсь.

# 3D печать, кратко и максимально ясно

Вы удивитесь, но и с лаками у вас полная свобода. Можно использовать художественный лак, можете попробовать лаки для ногтей, для мебели. Все зависит от того, какие краски использовали и какого эффекта вы хотите добиться.

## Кругозор

Посмотреть



<http://3dtoday.ru/blogs/harh/introduction-to-3d-printing-part-5-gluing-coloring/>

Удивительно полное руководство по склейке и покраске моделей аэрографом. Не забывайте только, что покраска может проводиться не только аэрографом.

<http://3dtoday.ru/blogs/mavrikosa/christmas-gifts/>

<https://liveandresin.ru/2015/09/23/3dprintedjinx/>

Очень хорошие работы по художественной покраске. Рекомендую посмотреть «для вдохновения».

Пробуйте, экспериментируйте, пишите книги и статьи, выставляйте модели на выставках, в конце концов, это тоже искусство.

## Немного советов.

Постобработка кажется удивительно сложным и многогранным делом, но рано или поздно все приходит к одному или двум методам, которые больше подходят вам. Есть еще немного советов, которые должны вам помочь:

- Выше разрешение — меньше работы. Действительно, при разрешении слоя в 50 микрон работать наждачной бумагой или ацетоном придется гораздо меньше, чем при разрешении в четыре сотни. Кроме того, вы не повредите мелкие детали и не испортите модель. Словом, если требуется постобработка, то разрешение печати ставьте ниже. Если принтер не ваш и вы заказываете модель в студии, а обрабатывать хотите сами, то уточните, что вам нужно хорошее качество. Многие студии жульничают, не спрашивая требований, и печатают по умолчанию в 100-300 микрон, чтобы сэкономить время работы принтера.

- Если модель достаточно сложная, разделите ее при печати на несколько частей. Так вам будет удобнее ее обрабатывать и окрашивать. После покраски ее можно будет склеить.

- Пластик неплохо впитывает воду и растворители, остается мягким после химической обработки. После химической обработки обязательно просушите его.

- Грунт легче ложиться на шершавые поверхности. Если вы планируете его наносить на эпоксидную смолу или сглаженный пластик, немного обработайте поверхность наждачной бумагой.

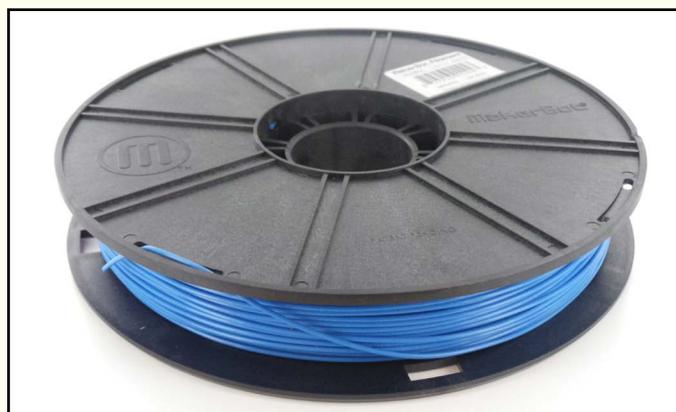
## Материалы для печати.

Один из самых частых вопросов, который задают новички (и я был таким же) — PLA или ABS. Удивительно, но найти информацию по этим вопросам совсем не сложно, хотя вопрос, мягко говоря, не совсем корректный и равносителен вопросу, что лучше картошка или яблоки. Все дело в том, что эти названия определяют лишь группы материалов, при этом ABS пластик может отличаться от ABS пластика даже в пределах одного производителя невероятно сильно, как отличается кола от пепси. Поэтому моим решением было дать стандартные характеристики и самые интересные вариации, но я прошу вас не доверять этим характеристикам на 100%, а при покупке катушки обязательно проверять, какие характеристики заявлены производителем.

### Общие характеристики

Итак, пластик для 3D печати поставляется, в основном, намотанным на катушку в виде нити, диаметром от 1,75 (стандарт) до 3 мм. К сожалению, даже при мерах предосторожности, контролировать, чтобы пластик был одинакового диаметра по всей длине почти невозможно, нормальными считаются отклонения  $\pm 0,02$  мм, они почти не влияют на качество печати. Чем выше отклонения по всей длине — тем большие проблемы возникают, ведь ваш слайсер не может быть осведомлен об этом. Стоит отметить, что на качество печати общий диаметр нити почти не влияет, исключая боуден-экструдеры, где большой диаметр снижает гистерезис, но предпочтение стандартных размеров обеспечивает большие возможности в выборе материалов, а экструдер жестко привязан к этим размерам (то есть вы не сможете воткнуть нить 3мм в экструдер, рассчитанный на 1,75). Кроме этого небольшие диаметры пластиковой нити имеют более низкие требования к экструдеру.

Пластики не любят влагу, экстремально холодные или горячие условия. Кроме этого, они не любят, когда их ломают или пытаются уничтожить. В этих случаях они ухудшают свои свойства, хотя и в разной степени. Многие производители помещают саму катушку в дополнительную оболочку, картридж. С одной стороны, использование такой системы позволяет назначать идеальные настройки при печати, а также замерять количество расходуемого пластика, исходя из данных картриджа, но эта же система приводит к завышению цен на расходники.



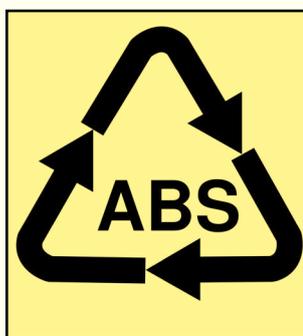
Первое фото: The 3D Systems Cube 3, который использует картриджную систему. Большинство же домашних принтеров используют стандартные катушки пластика  
Изображения: Creative Tools<sup>25,26</sup>

# 3D печать, кратко и максимально ясно

Давайте сразу договоримся. Я не говорю цифры, даже примерные, так как нахожу это контрпродуктивным. В конце концов, вы всегда сможете узнать **ТОЧНЫЕ** цифры при покупке из информации, данной в техничках и в отзывах или при заказе услуги печати.

## ABS vs PLA

Эти два вида пластика даются всегда (или почти всегда), в противопоставлении. На них печатают все, а также один из них всегда связан с первым опытом, так как поставляется в комплекте с принтером. Самые популярные, самые дешевые и самые доступные пластики.



ABS пластик маркируется этим кодом. Осмотрите пластиковые предметы вокруг вас, возможно, вы найдете его на некоторых из них. Кодировка была придумана для удобства переработки отходов.

ABS пластик невероятно популярен не только для 3D печати, он используется в целом ряде областей, например, в литье при машиностроении или производстве канцелярских товаров.

Полное его название составлено из мономеров, входящих в состав: АкрилонитрилБутадиенСтирол, а сокращенное — из первых букв.

Если честно, то даже если мы говорим о промышленном использовании этого вида пластика, то единства в области не наблюдается: существует невероятное количество марок и вариантов состава, и это не включая разнообразные кустарные варианты. Мне бы не хватило книги, чтобы описать их все. А так как сырье для печати изготавливается на основе гранул пластика, то и в 3D печати можно наблюдать похожие эффекты. К счастью, из-за стандартов индустрии можно выделить ряд закономерностей, которые я и собираюсь описать.

ABS-пластик производится из нефтепродуктов, и разлагается в них же. Нефть вообще очень неприятная штука, достаточно опасная для органики. Но бояться нечего, при бытовом применении вы с разложением не столкнетесь, кроме двух случаев: при нагреве и при взаимодействии с алкоголем. “Стоп, мы же печатаем нагреванием и расплавлением пластиковой нити, выходит, что мы травим себя?” На самом деле, учитывая скорость печати, **обычно** проблем со здоровьем не возникает. Тем не менее, при печати он выделяет мерзкий химический запах “плавленного пластика”, да и меры предосторожности никогда не повредят, поэтому при печати ABS стоит соблюдать простое правило — печатать в хорошо проветриваемом помещении (или на улице), в конце концов, головная боль может возникнуть и из-за неприятного запаха или производитель может добавить в пластик более токсичные компоненты для удешевления производства. И это не дружеский совет, это обязательное правило, которое позволит вам сохранить здоровье.

Другое правило — не использовать пластик под посуду для хранения и употребления продуктов питания (особенно горячих или алкоголя). Микродозы компонентов пластика рано или поздно приведут вас на прием к терапевту. Немного забегаю вперед, я скажу, что есть биосовместимые варианты ABS пластика, но если производитель не говорит об этом прямо — будьте осторожны.

ABS принято считать «сложным», «капризным» пластиком: если кто-то спрашивает: «почему у меня модель разломилась надвое», «почему пластик отлипает от платформы» или «у меня куча лапши, а не модель», скорее всего, человек имеет в виду ABS, потому что с PLA проблем намного меньше, а с еще более сложными пластиками работает не так много печатников.

Для начала, если вы хотите получать хорошие, качественные модели из этого вида пластика, вам придется обзавестись закрытым корпусом (в идеале с термокамерой) и подогреваемой платформой. Перед объяснением я оговорюсь, что печатать без них возможно, но из веселого увлекательного процесса печать превратится в мучения в попытках правильно рассчитать все параметры и выловить удачный случай. Кроме этого добавлю, что чем больше модель и дольше длится печать, тем больше необходимо иметь вышеперечисленные вещи, так как при бесконечно долгой печати ABS на холодной платформе принтера с открытым корпусом шанс распечатать без деформаций бесконечно близится к нулю.

Итак, у ABS есть две причины помешать вам: высокая температура печати и большой процент усадки, а также плохая адгезия к платформе. Это выливается в то, что при контакте с холодной (относительно него самого) платформой, он достаточно быстро остывает и усаживается, соответственно, деформируясь и отлипая от платформы, отсюда плохая адгезия. Если же нижние слои при печати остывают быстрее, чем верхние, то происходят деформации самой модели.

Соответственно, для нас основной для нас задачей является сохранять температуру недостаточно высокой, чтобы модель расползлась под действием силы тяжести, но достаточно высокой, чтобы она остывала медленно и равномерно, при этом еще и не создавая деформаций.

И все-таки проблемы возникают даже при хорошем оснащении. Плохой пластик, плохо подобранные температуры, кинематические нарушения и ошибки позиционирования или слайсинга модели, с ABS-пластиком любая ошибка может стать фатальной, хотя другие пластики спокойно эту ошибку бы пережили. Особенно сильно это раздражает, когда ошибка проявляется, скажем, через 8 часов работы. Именно поэтому промышленные принтеры работают строго со «своими» материалами, исключая риски.

Тем не менее, ABS — один из самых любимых материалов в среде печатников, потому что все описанные недостатки спокойно превращаются в плюсы. Высокая температура печати означает высокую температуру использования, а нефтяная природа полимера — стойкость и долговечность. К этому можно добавить еще дешевизну и хорошие физическо-технические характеристики продукта, произведенного этим способом, хотя последнее утверждение часто ставится под вопрос.

Все дело в том, что физические характеристики при литье определяются только типом пластика, и в этом ABS действительно очень хорошо смотрится для своей цены. При печати же добавляется связь между слоями, которая при прочих равных у ABS хуже. Высокий диапазон температур создает сложности для их подбора, деформация и усадка вызывают дополнительные проблемы, словом, печать требует не только хорошего оборудования, но и определенных навыков.

Прочность пластика также легко повышается с помощью постобработки, смотрите прошлую главу. Более того, эпоксидная смола лучше всего работает как раз с ABS-пластиком.

Наконец, ABS очень легко обрабатывается, как механически, так и химически. Шлифовальные машины и наждачная бумага легко снимают слои и сглаживают поверхности, а широко доступный ацетон придает изделиям красивый, законченный вид с глянцевым блеском.

ABS — сложный в работе пластик, он требует оборудования определенного уровня и (или) определенных навыков работы с ним. Тем не менее, учитывая его небольшую цену, широкую доступность и хорошее качество конечных изделий, он стоит уделяемого ему внимания.

Но если мы говорим о каждодневной непрофессиональной, домашней печати, ABS из-за сложности работы с ним часто заменяется другим пластиком: PLA.

# 3D печать, коротко и максимально ясно

PLA — чистая противоположность ABS. Начнем с того, что производится полилактид (полное название) из молочной кислоты, а молочная кислота из сахара. Соответственно, разлагается он в них же. При печати он издает приятный «сладковатый» запах.

На первый взгляд, эта столь несерьезная информация определила промышленное применение этого вида пластика. Биосовместимый, биоразлагаемый, то есть безопасный для среды и человека, он активно используется как для пищевых упаковок и посуды, так и в медицине (например, для производства нитей).

Возможно, бутылка воды, которые вы недавно купили создана из PLA. На счет разложения не пугайтесь, на самом деле, материал “держится” в условиях среды достаточно долго, чтобы вы не заметили этого взаимодействия.

Вторая отличительная черта полилактида — низкие температуры плавки — использования, а также низкая усадка. Из этого вытекает несколько следствий — нет необходимости ни в закрытом корпусе, ни в подогреваемой платформе, хотя последнее и может облегчить адгезию.

Также при работе можно использовать вентилятор для ускорения застывания модели. Система охлаждения существенно увеличивает скорость печати PLA и улучшает качество моделей, но не является обязательным, практика показывает, что хорошие модели получаются и на минимальном оборудовании. Кулеры же позволяют добиться поразительных результатов в плане геометрии форм, таких, которых нельзя добиться с помощью ABS.

Наконец, адгезия PLA пластика значительно выше, значит, связь между слоями прочнее, а пористость ниже. Здесь люди, которые достигли профессионализма в печати ABS, мне возразят, но на начальном этапе изделия из PLA будут получаться значительно лучше, и с этим, надеюсь, спорить никто не будет.

Постобработка же PLA значительно сложнее и, рано или поздно, вам придется подружиться с или химическими растворителями, или ХТС-3D, или методами тепловой обработки, или пескоструйной обработкой, так как шлифовка PLA — самая настоящая проблема, занимающая невероятное количество времени и сил. С другой стороны, учитывая, что качество печати у полилактида, в среднем, выше, то и обрабатывать придется меньше.

PLA часто считается “детским” и “легким”, а также ненадежным пластиком, но я прошу вас не поддаваться стереотипам. PLA достаточно прочный, чтобы выдерживать серьезные длительные нагрузки, он легко печатается на простом оборудовании, а единственным серьезным его минусом можно назвать низкую температуру печати. Кроме этого, в сравнении с ABS, он почти не усаживается после печати, а это значит не только отсутствие необходимости доводки для сборных моделей, но и удобство при печати деталей к уже существующим механизмам.



Для PLA не придумано специального кода, и он маркируется как «другие пластики», номером 7. Производитель также может указать букву O или слово OTHER вместо PLA, также могут использоваться символы обозначения биоразлагаемости. Не все изделия под номером 7 относятся к PLA.

## Материалы поддержки

Если у вас 2 экструдера, рано или поздно вы захотите печатать, используя растворимые поддержки. Использовать разные материалы для основы и для поддержек действительно очень удобно — после печати достаточно опустить модель в растворитель, поддержки растворятся, а вы получите чистую модель. Никакой проблем с зашлифовкой в местах соединения поддержек с моделью, никаких дефектов моделей, связанных с их использованием. Профессиональное оборудование использует свои материалы, но я не вижу смысла описывать их в этой книге. Вместо этого я предлагаю остановиться на чем-нибудь более осязаемом и доступном: двух материалов используемых в домашней печати — это Hips или ударопрочный полистирол, и PVA или поливинильный спирт.



Для поддержек идеальный вариант — PVA, потому что его химический растворитель действительно легко найти — поливинильный спирт (его полное имя) растворяется в воде. Ничего сложного, распечатали, поместили в воду и растворили поддержки (мыльный раствор, повышенная температура и помешивание раствора ускорит этот процесс). PVA имеет еще ряд интересных применений, например с помощью него можно создать литые детали с движимыми механизмами, например, гайку уже накрученную на резьбу. Или двигатель, не требующий сборки. PVA редко используется для создания готовых моделей вследствие своих особенностей.

Белая часть кубика, поддержки из PVA, скоро растворится.

Изображение: Tony Buser<sup>27</sup>

Другой вариант — ударопрочный полистирол, второй материал широко используемый для генерации поддержек. Кроме этого, он иногда используется в качестве основы.

Но вначале поговорим об основном его применении. Растворитель Hips — лимонен, не растворяет большинство других материалов. Поэтому при его использовании физическое удаление поддержек можно заменить протиркой лимоненом, либо погружением в него. Учитывая, что HIPS, в целом, значительно дешевле PVA — это выглядит хорошей заменой.

С другой стороны, HIPS вполне может использоваться в качестве основного материала для печати. Из плюсов такого подхода можно отметить нетоксичность и длительное биологическое разложение, а также высокую термостойкость. К сожалению, HIPS достаточно хрупкий материал, поэтому для изде-



Полистирол тоже имеет свой номер в международной маркировке. Он активно используется при производстве самых различных предметов, начиная от корпусов ручек, заканчивая электроизоляционными материалами и одноразовой посудой.

# 3D печать, кратко и максимально ясно

лий, подвергаемых нагрузкам он не подойдет. Это и не позволяет ему стать популярным материалом для основы и оставляет его лишь в качестве еще одного материала поддержки.

С материалами поддержки могут возникнуть проблемы. Если вы практикуете погружение воды в растворитель, то логично печатать модель с большой толщиной стенок, большим заполнением и в более высоком разрешении. Это не позволит воде попасть внутрь модели и ухудшить ее качество. Часто поддержки частично удаляются вручную, чтобы уменьшить время, требуемое на их растворение.

Стоит также отметить, что если вы используете HIPS и лимонен, то кроме этого необходимо подбирать и достаточно высококачественный филамент в качестве основы, так как многие производители добавляют более дешевый HIPS в ABS-пластик, чтобы уменьшить его стоимость. Таким образом, если производитель сэкономил на филаменте, который вы используете в качестве основы, то вы рискуете вместе с поддержками растворить и часть модели.

## Гибкие материалы

Следующим этапом в освоении 3D принтера обычно становятся гибкие филаменты и речь пойдет в первую очередь о разнообразных flex'ax (ninjaflex, filaflex, Rec Flex) и rubber'ax.

Помните, я говорил, что ABS — пластик капризный? Так вот, по сравнению с ними, он самый настоящий лапочка. Для начала у них очень серьезные требования к экструдеру. Если и можно печатать боуденом, то очень-очень медленно, так как гистерезис увеличивается многократно, желательно обойтись вариантами с совместным хот- и колд-эндами. Но даже в этом случае запоздания реакции полностью избежать не удастся.

Идем дальше. Далеко не каждый экструдер сможет эффективно протолкивать гибкие материалы. Кроме необходимости в подающем колесике с агрессивной насечкой или зубчиками, к конструкции предъявляется еще одно требование: подача нити должна осуществляться без возможности изгибаться внутри “холодной” части экструдера. Это кажется очевидным, пока не доходит до дела, многие экструдеры спроектированы с этой ошибкой.

Если при печати ABS первоочередной задачей был контроль температуры модели, то с гибкими материалами основной задачей становится ровная подача нити.

- Скорость печати в этом случае изначально должна быть ниже, чем скорость печати твердыми филаментами. В случае с боуденом она может опускаться вплоть до 5мм в час, в случае с совмещенным экструдером она может достигать до 40 мм/ч, а стандартная скорость, которая подойдет в большинстве случаев, находится где-то посередине: 25-30 мм, хотя это зависит от нити, экструдера и программных настроек и, в случае хорошего стечения обстоятельств, достигает до 70-100мм.

- Есть еще один важный момент, чтобы обеспечить ровную и хорошую подачу филамента, желательно, чтобы он подавался в экструдер (то есть в колд-энд) сверху. Это избавит от лишних перегибов нити. Существует несколько дизайнов, чтобы обеспечить это.

- Это напрямую зависит от того, какой у вас принтер, но лучше, если вы решите печатать толстой нитью, 3 или 2,85 мм. Чем толще нить, тем, соответственно, меньше перегибов.

- У гибких пластиков есть определенные проблемы с адгезией, так что поверхность столика все-же придется обрабатывать.

- Тщательно следите за процессом печати, контролировать ровную подачу с гибкими пластиками весьма проблематично, возможно, нити будет подаваться чуть больше или чуть меньше, чем необходимо. Будьте рядом, пока не убедитесь, что печать продвигается хорошо.

“Боже, какой ужас!” — воскликнуть читатели, — “и стоит оно того?” Стоит, тем более все это кажется сложным только первый раз. После того, как вы привыкните к предосторожностям, вы сможете создавать удивительные по своим характеристикам вещи.

Под названием FLEX скрываются самые разные материалы, самое страшное состоит в том, что здесь производители спешат указывать, из чего именно сделан их FLEX, поэтому легко запутаться. Все дело в том, что Термопластичные Эластомеры (ТЭП), которые и являются сырьем для нити, включают в себя

целое множество различных материалов, например, термопластичный полиуретан (ТПУ), с которым вы уже хорошо знакомы. Например, его используют для создания обложек на смартфоны (те самые приятные на ощупь, гибкие обложки).

Учитывая некоторую экзотичность материалов, а также их широкое разнообразие, здесь как никогда нужно читать техники. Информации, данной производителем, обычно хватает для качественной печати.

## Кругозор

Статьи



Посмотрите на описание двух видов пластика от одного производителя (Ninja Flex). К сожалению, **на английском**. Обратите внимание, что в первом случае прямо указан тип материала — TPU, во втором же эту подробность решили опустить. Зато отлично объясняется, чем они отличаются (быстрее скорость печати) и их характеристики (твердость по Шору, температура печати).

<http://www.ninjaxflex3d.com/products/ninjaxflex-filaments/>

<http://www.ninjaxflex3d.com/products/cheetah/>

А еще в эту же группу уходят и другие гибкие материалы, например, Flexible Pla или Rubber (имитатор резины). С ними история примерно такая же, материалы экзотические, производители на информацию скупы. Так что смотрим техники.

Мы все такие разные, но нас всех объединяет одно (кроме гибкости): очень-очень сложная постобработка. Все дело в том, что стандартная шлифовка бессмысленна при работе с гибкими материалами, в то время как химические вещества либо разрушают конечную модель, либо никак не влияют, либо внешне модель после обработки выглядит отлично, а вот свойства ее нарушены. Словом, ни один из них нам не подходит (хотя вы всегда можете экспериментировать). Единственный доказанный метод постобработки при работе с гибкими материалами — балончик с жидкой резиной, но даже он не спасет, если были допущены ошибки при печати или толщина слоя слишком большая. Кроме этого, по очевидным причинам, склеивание произвести проблематично (хотя и возможно), так что придется печатать медленно, с небольшим слоем, без ошибок.

## Кругозор

Посмотреть



<http://forums.reprap.org/read.php?1,269018,269018>

Использование трех разных материалов для печати одной модели.

# 3D печать, кратко и максимально ясно

## Прочные материалы

Здесь мы с вами поговорим с вами о том, зачем люди покупают металлические хот-энды, совершенствуют свои принтеры и страдают еще множеством других способов. Следующим этапом в освоении 3D принтера является печать крепкими высокотемпературными материалами.

Все высокотемпературные прочные пластики удивительно капризны.

Самое первое, о чем стоит сказать — экструдер, вернее его хот-энд. Давайте вспомним про металлические-неметаллические комбинации материалов. Большинство тефлоновых трубок начинает деформироваться уже при температурах выше 250 градусов, с тефлоновым хот-эндом о печати такими пластиками лучше не думать (хотя тут потребуется оговорка, что трубки бывают разные, некоторые способны выдерживать температуры выше обозначенной. Тем не менее, они редко включаются в конструкцию принтера “из коробки”, соответственно редко применяются).

Другой минус состоит в том, что высокотемпературные пластики автоматически забирают себе все особенности ABS-печати такие, как подогреваемая платформа, нарушение слоев и необходимость в закрытом корпусе принтера, и даже не просто забирают, но даже преувеличивают их.

Разнообразие пластиков, которые можно отнести к этой группе — поражает. Давайте по-порядку о них поговорим:

Поликарбонат, он же PC. К поликарбонату стоит присмотреться, если вам нужна прочность. Именно по этой причине он широко применяется, например, для производства компакт-дисков, солнцезащитных очков, пуленепробиваемых стекол и корпусов для всего-всего, например, из поликарбоната сделан корпус iPhone 5c. Кроме прочности, он еще и высокотемпературный — температура экструзии может достигать 300 градусов. Стоит подбирать температуру печати в взаимосвязи с температурой платформы и скоростью экструзии. Чем выше скорость и ниже температура платформы, тем большие температуры стоит использовать для экструзии.

Поликарбонат токсичен при печати, то есть печатать следует в строго хорошо проветриваемом помещении, конечно, если хотите жить и не страдать.

Кроме этого он гигроскопичен, то есть хорошо впитывает влагу. И тут речь не просто о готовом изделии, а даже о нити, которая требует очень бережного хранения и просушки перед печатью. Кроме этого, он может делать это и в процессе печати. Убедитесь, что у вас сухо, и пластик не сможет вытянуть влагу из воздуха окружающей среды.

Нейлон.

Нейлон — не самое первое, что приходит в голову в качестве прочного материала для 3D печати. Если ассоциация не пришла вам на ум сразу же, я вам немного помогу: нейлон является одним из материалов для изготовления чулок и платьев. И все же, нейлон — пластик, более того, пластик достаточно прочный, гибкий и термостойкий. Кроме чулок из него делаются, например, зубные щетки и оправы для очков, протезы и струны для гитары.

Нейлон по-прежнему крайне требовательный к правильной технологии процесса печати. Если вы печатаете слишком быстро, при слишком маленьких или больших температурах, вы рискуете столкнуться с расслаиванием и значительным ухудшением физических свойств модели. А еще помните о гигроскопичности материала и всегда сушите его перед печатью.

С другой стороны, в компании крепких материалов он является чуть ли не самым популярным, и по-крайней мере, он не такой сложный как поликарбонат.

Полиоксиметилен.

Он же полиформальдегид, он же POM. Его вы вряд ли обнаружите в предметах рядом с собой, потому что пластик совсем уж специфичный. Его, например, используют в медицине, благодаря возможности многократной стерилизации, и в качестве элементов конвейеров, например, шестерёнок. Собственно, и при 3D печати его используют для особенных вариантов.

POM ведет себя так же противно, как и прошлые материалы, разве что влагу впитывает не так бешено.

Ах да, чуть не забыл, при излишнем нагревании он может разлагаться в формальдегид. Так что не перегревайте материал и всегда проветривайте помещение.

## Вместо заключения

Люди, которые занимаются печатью профессионально просто хмыкнут, прочитав главу про материалы. Действительно, она имеет обзорный формат и не поможет, если вы решили что-нибудь напечатать. В свою защиту скажу, что большинство вообще останавливается всего на двух — ABS и PLA (хорошо, если не на одном).

Еще больше мне хотелось бы отметить, что фраза «пластик подбирается под задачу» я нахожу достаточно глупой. То есть, пластик действительно в определенной мере подбирается под задачу, только вот работать со всем разнообразием почти невозможно, так как под каждый тип и под каждую фирму, организующей производство надо подстраиваться. Дело это не быстрое, особенно если мы говорим об экзотике, и требует навыков, поэтому, рано или поздно, мы останавливаемся, выбирается список марок, с которыми готовы работать. Как я уже отметил выше, для большинства это будет два вида пластика от производителей принтера. Изредка мы экспериментируем.

А экспериментировать есть с чем. Мало того, что существует смеси вариантов: ABF (ABS + Flex), Flexible PLA, PC/ABS и самые разнообразные смеси других пластиков, так еще можно найти и менее популярные варианты, например, пластики от Filamentano. Пластиков существует очень и очень много, технически, если они могут приобретать пластичное или жидкое состояние, то ими можно печатать. В них можно добавлять все, что угодно, начиная с простых красителей, заканчивая красителями флюоресцентными. Можно улучшать их свойства и комбинировать друг с другом.

Можно добавлять в пластик и более интересные вещества, например медь или маленькие кусочки дерева. Зайдя на сайт любого интернет-магазина (лучше, конечно, западного — там больше новинок), вы с большой долей вероятности найдете что-нибудь интересное. Если вы решите окунуться в бездну AliExpress, то найдете совсем безумные варианты. Пробуйте. Экспериментируйте. Наслаждайтесь

# 3D печать, кратко и максимально ясно

## Кругозор

Посмотреть



<https://youtu.be/ueVaAolE49o?t=26s>

Существуют материалы, светящиеся в темноте.

<https://youtu.be/3JgL4KN1bBc?t=14s>

Материал, который меняет цвет при нагреве феном.

<https://youtu.be/RUPfDjhZL-4>

Видео о том, как делали шахматный набор с помощью пластиков с мельчайшими частицами бронзы и меди.

<http://learn.colorfabb.com/excellence-woodfill-3d-printing/>

Немного английского текста и много изображений. Печать статуй из пластика с мельчайшими частицами древесины.

Ну и наконец, мне хотелось бы спеть небольшую оду промышленным FDM принтерам Stratasys. Для начала я предлагаю вам посетить:

## Домашнее задание

Статьи



[www.stratasys.com/ru/материалы/fdm](http://www.stratasys.com/ru/материалы/fdm)

Список материалов, используемых для FDM принтеров компании Stratasys. Для некоторых принтеров список используемых материалов ограничен, но, в целом, их разнообразие поражает. Если вам станет интересно, можете почитать про некоторые из них.

Промышленные принтеры всегда вызывают у меня легкий трепет в груди, так как являются носителями самых современных технологий. Но список материалов Stratasys меня поражает до сих пор. «Все это есть и на других, непромышленных, принтерах,» — скажите вы и будете правы. Но знаете ли, не все из них протестированы на моем принтере и будут давать постоянные, стабильные результаты. Более того, Stratasys смог покрыть тринадцатью материалами любое применение рабочего прототипа. Да, они дорогие, но они стоят того.

Широкий список возможных материалов и русскоязычный сайт — весьма весомая причина, чтобы полюбить Stratasys, даже учитывая, что это одна из самых агрессивных компаний на рынке.

## SLA.

Селективное лазерное сканирование. Когда за качество можно отдать любые деньги.



Итак, когда мы с вами поговорили о самом популярном методе печати, мы можем прийти к другому методу, который имеет все шансы оказаться у вас на столе рядом с компьютером. Этот метод называется SLA или стереолитография. Его вы тоже могли наблюдать вживую или на видео, хотя и с меньшей вероятностью. На мой взгляд, процесс печати SLA принтеров — одно из самых захватывающих зрелищ, как минимум, первые десять секунд, так что вряд ли вы забудете такое.

Принтер, который вы видите слева, Formlabs Form 2, и его предшественник Form 1, в том или ином виде, постоянно попадает в во многих статьях, связанных с 3D печатью, по неизвестной мне причине. Видимо, смотрится очень эффектно.

Изображение: Formlabs<sup>28</sup>

## Короткая историческая справка.

Возможно, это несколько неочевидно, но стереолитография была изобретена даже раньше, чем послойное наплавление, человеком по имени Чак Халл (Charles 'Chuck' Hull) в 1983 году, который немного позже, в 1986 основал компанию 3D Systems. К слову, всего годом ранее, в 1982 году были выпущены в коммерческую продажу первые CD (компакт диски). Забавно, что про них многие уже забыли, а про SLA узнали только с этой книгой.

Патент опубликован и доступен по ссылке: <http://www.google.com/patents/US4575330>

76-летний Чак Халл до сих пор активно участвует в жизни компании. Харизматичный и бодрый, он отлично выглядит на фотографиях европейского офиса патентов (по ссылке).  
<https://www.epo.org/learning-events/european-inventor/finalists/2014/hull.html>

# 3D печать, коротко и максимально ясно

И тут встает вопрос, почему, собственно, только FDM принтеры настолько развиты и распространены. Все дело в том, что несмотря на то, что прошлые патенты истекли, появились новые, улучшающие метод. А в сентябре 2012 года на Кикстартере появляется проект от Formlabs, домашний 3D принтер, который собирает на платформе сумму немного не дотягивающую до \$3.000.000! При этом Formlabs нарушили патент и в ноябре этого же года начинается судебный процесс, которому суждено было продлиться 2 года и разрешиться в пользу последних. Formlabs отныне должна была отдавать royalty 8%. Но это до сих пор был домашний SLA-принтер от сторонней компании! А патенты продолжили истекать и на рынок выходило все больше устройств.

## Кругозор

Статьи



<http://www.tctmagazine.com/tctblogs/duncan-wood/3d-systems-v.-formlabs-3d-printing-patent-lawsuit-dismissed/>

Новостной материал об окончании судебного процесса. Кроме всего прочего, в материале указаны номера нарушенных патентов. На английском.

<https://www.kickstarter.com/projects/formlabs/form-1-an-affordable-professional-3d-printer/description>

Страничка проекта на kickstarter. На английском, но заходите, вам ведь интересно узнать точную сумму.

## Суть работы.

### Домашнее задание

Посмотреть



[https://www.youtube.com/watch?v=6ff3mvZzy\\_k](https://www.youtube.com/watch?v=6ff3mvZzy_k)

Видео короткое и непонятное, но зато весьма эффектное. Печать проектором (SLA DLP).

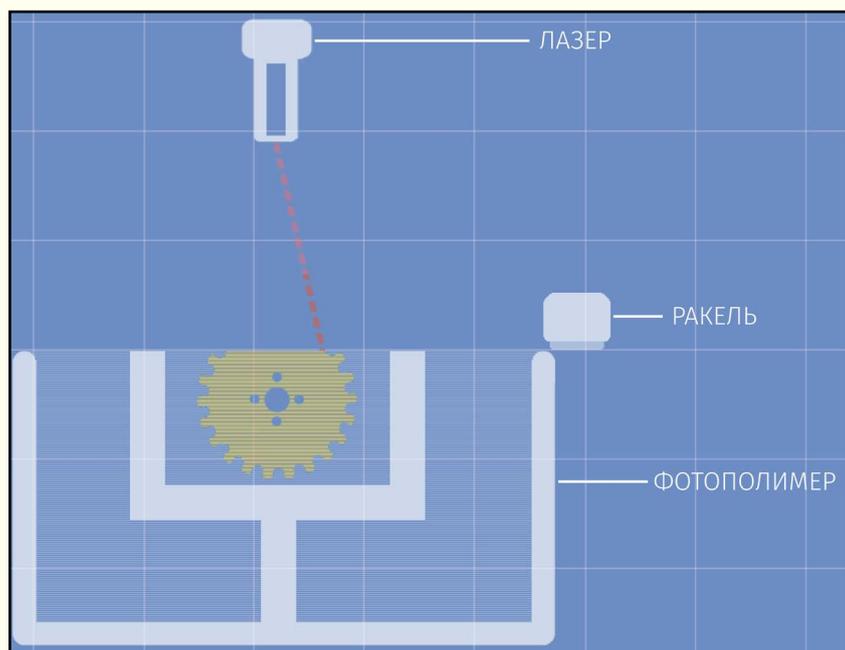
<https://youtu.be/eKk2vRysioE?t=53s>

Видео на английском, можете смело заканчивать смотреть после окончания анимации. Печать лазером (SLA).

Объяснять суть работы SLA принтера намного сложнее, хотя бы потому что в жизни мы с фотополимерами не сталкиваемся. Зато сталкиваемся с другими веществами, которые затвердевают при взаимодействии с окружающей средой или друг с другом. Если вы внимательно читали предыдущую

главу, то помните, что эпоксидная смола обычно поставляется вместе с отвердителем. А вода застывает, если ее охладить. Гипс застывает при высыхании. Словом, у всех материалов есть несколько агрегатных состояний, а переходят они из одного в другой разными способами. А теперь представьте, что у нас есть материал, который застывает, если на него светить.

Где попадает свет, там и он будет твердым, там, где свет не попадает, он остается жидким. Таким ма-



териалом и является фотополимер. К сожалению, если мы просто нальем его в баночку и будем долго-долго светить, что ничего путного не выйдет. Здесь нам и придет на помощь технологическая идея мистера Халла. Что, если мы будем засвечивать только один слой, между платформой и воздухом. После того, как он образовался, мы опустим ее немного вниз и засвечивать будем между уже образовавшимся слоем и воздухом. Когда мы засветим последний слой, мы просто поднимем платформу и вытащим модель.

Есть и обратный метод: мы наливаем фотополимер в ванночку с прозрачным дном, а минимальным слоем будет расстояние от дна до платформы. После засвечивания минимального слоя — платформа будет подниматься вверх, а модель, адгезировавшая к платформе, но не ко дну, поднимется вместе с ней. В остальном, процесс не отличается. Но я знаю, что вам такого объяснения не достаточно, мои любознательные друзья. Давайте же проследим путь фотополимерной смолы (забавно звучит!).

# 3D печать, коротко и максимально ясно

Изначально наше положение не сильно отличается от прошлого. Мы снова имеем модель, принтер и материал (только в этот раз не пластиковую нить, а фотополимерную смолу). Форматы для моделей тоже не отличаются, более того, самый популярный формат для 3D печати, .stl, был вообще придуман 3D Systems и расшифровывается как стереолитография! Процесс подготовки тоже почти никак не отличается, например, если модель повреждена или имеет серьезные нарушения, ее все-таки придется реставрировать.

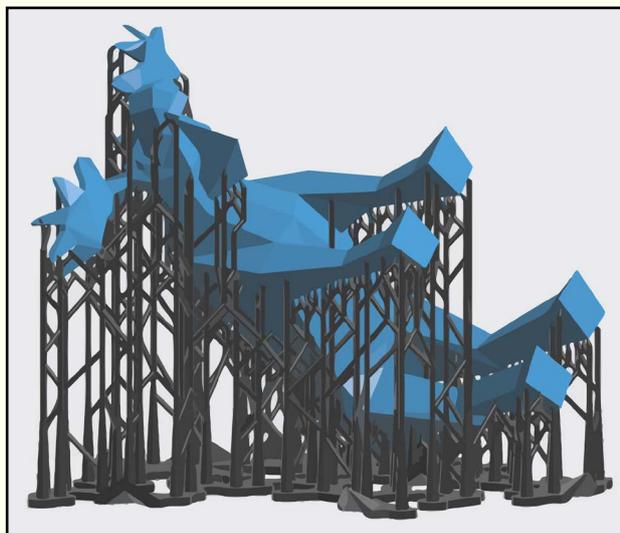
Другое дело — полые модели. Если модель печатается расплавленным пластиком — сделать ее полой не проблема, обычно это делается даже не в программе для моделирования, а в слайсере.

Для SLA эта опция бессмысленна, так как при полый закрытой структуре мы оставим внутри часть еще жидкого фотополимера. Поэтому полые модели для данного метода моделируются еще при создании, а в конструкцию включаются отверстия для вытекания полимера. Либо с отверстием, либо стопроцентное заполнение, такие дела. После того, как мы подготовили модель, мы загружаем ее в слайсер.

Помните то безумное разнообразие слайсеров для FFF принтеров? Так вот, большинство из них выросло из RepRap проекта, остальные развились из-за широкого спроса в качестве уже коммерческих проектов. Но ничего из этого не произошло с SLA принтерами, по крайней мере, на текущий момент. Слайсеров, не так уж и мало, но они все поставляются вместе с оборудованием, хотя есть и отдельные проекты, например, creation workshop или netfabb, а также несколько ограниченный Slic3r. Но и этого хватает — SLA печать имеет меньшее количество параметров, большинство из них задаются вручную. Например, этот метод накладывает и дополнительные ограничения: только один материал на одну модель, если при FFF можно ухитриться с двумя (тремя, десятью) экструдерами, то тут особо не развернешься, не нальешь же две разных смолы в одну ванночку.



Еще одна из популярнейших моделей для принтеров, только из принтера. У нее даже есть свой веб-сайт: [www.3dbenchy.com](http://www.3dbenchy.com).  
Источник: Creative Tools<sup>29</sup>



PreForm, слайсер от Formlabs, причудливо располагает модель в автоматическом режиме для увеличения качества печати.

Автор модели: Corben33<sup>30</sup>

Слайсер: PreForm.

# LittleTinyH Books

Теперь мы поговорим о главном виновнике большой цены модели — фотополимере. Эта милая штучка поставляется в бутылочках (непрозрачных, угадайте почему) и выливается в ванночку прямо перед печатью. Другой вариант — использование картриджей. Технически, картриджи удобнее, так как принтер автоматически нормирует количество необходимого фотополимера. К сожалению, для многих производителей возникает соблазн накрутить цену и ограничить пользователя в количестве используемых материалов.



Первая изображение — баночки со смолой, вторая — картриджи, используемые для разных моделей. К чести Formlabs стоит отметить, что Form 2, использующий картриджи, поддерживает и Open Mod для нефирменных полимеров.

Изображения: Formlabs<sup>32,33</sup>

Вообще фотополимеры могут быть не только жидкими: для горячего тиснения, используются и твердые варианты. Но в нашем тяжелом деле возможно только жидкие, вернее, полужидкие, тягучие смолы.

## Домашнее задание

Посмотреть



<https://www.youtube.com/watch?v=85FkPZOHH70>

Не знаю, как вам, а мне смотреть на то, как наливается смола, до безумия приятно.

Когда мы уже налили смолу/вставили картридж, в дело вступает лазер, полимеризуя модель.

# 3D печать, коротко и максимально ясно

## Лазеры и проекторы

Изначально в технологии участвовал только лазер, но технология развивалась, так что возникли новые, не менее изящные, конструктивные решения — использование ламп и проекторов. Но лазеры до сих пор остаются выбором целого ряда производителей, например, 3D Systems (родоначальника метода), Formlabs и XYZprinting.

Способ управления лазером в таком случае представляет из себя сложную систему из зеркал и фокусирующих линз. Звучит страшно, но я призываю вас не бояться. В большинстве случаев с системой проблем не возникнет, сидеть настраивать зеркала (если вы конечно не сами собирали, но тут уж вы выбрали свой путь самостоятельно) вам не придется. Словом, пока работает — работать будет хорошо.

Разрешение лазерной точки не зависит от расстояния от платформы, так что вам не придется решать вопросы расположения лазера, как в случае с dlp проекторами. Оно будет разное от компании к компании и от принтера к принтеру и колеблется от 200-300 до 6,35 микрон. Мы уже знаем, как важны эти цифры в высоту (величина слоя), но насколько обосновано это в плоскости? Если вам это поможет, то разрешение в 6,35 эквивалентно 4000 DPI! Другой пример будет попроще: размер одной точки и будет ограничен 0,00635 мм или диаметром эритроцита (красной клетки крови). Вы планировали делать модели еще меньше?

В чем бонус такой конструкции? Вы можете печатать сравнительно большие модели с большим разрешением. В чем минус? На большое разрешение в данном случае уходит и больше времени.

Стоит только отметить, что главным в данном случае является лазер, который существенно влияет на время построения модели. Логика простая — чем лазер мощнее, тем меньше требуется времени на один слой, тем быстрее происходит печать. Поэтому, кроме разрешения и толщины слоя, в данном случае стоит уделить пристальное внимание скорости печати.

Следующий вариант — засвет ультрафиолетовой лампой. Однако, лампа — не маленькая точка, светит весь фотополимер, поэтому мы идем на уловку: прокладываем между фотополимерным слоем и лампой небольшой трафарет — фотошаблон. Не вдаваясь в подробности, у нас получается мини-фабрика, которая работает с фотошаблонами, создает трафарет, доставляет его и изготавливает модель. Такой метод называется SGS (Solid Ground Curing) в рунете более известный как метод масочной стереолитографии.

Если коротко, то такой метод имеет ряд преимуществ (никаких поддержек!), но получился слишком дорогим и сложным, так что принтеры уже не выпускаются. В любом случае, метод достаточно неординарный, чтобы быть описанным в этой книге. Кроме этого, учитывая, что он не особо интересен печатникам, по аббревиатуре и основным данным можно угадывать истинных мастеров дела, которые нашли в своей жизни 20 минут, чтобы изучить, какие технологии существуют и существовали в мире. Приемником SGC является проекторная стереолитография.



## Кругозор

Статьи



Посмотреть



<https://www.youtube.com/watch?v=y4N4AxKQPec>

Для тех, кто хочет знать все. 37-секундное видео без звука, с дергающимся изображением, хорошо описывающее технику.

[http://www.efunda.com/processes/rapid\\_prototyping/sgc.cfm](http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/sgc.cfm)

Статейный вариант, более подробный, чем видео, но несколько менее наглядный. Много схем, на английском.

Наконец, мы подходим к последнему интересному варианту, DLP и прочие варианты засветки с использованием матрицы проектора. К слову, эта технология имеет множество имен. Первый вариант будет называться DLP SLA принтер или просто DLP. 3D Systems имеют собственную технологию, основанную на полимеризации проектором, под названием FTI (film transferring imaging), немного отличающуюся от того, что вы уже видели.

Другой вариант проистекает из другой технологии передачи света: LCD SLA принтер. Наконец, многие производители указывают просто SLA, либо micro-SLA (который просто обозначает размер конечных моделей), либо еще как-нибудь с использованием названия основного метода.

К счастью, мало того, что все технологии построены одинаково, так еще и столкнетесь, в основном, только с DLP проекторами. Так что давайте сконцентрируемся на них.

DLP™

**A TEXAS INSTRUMENTS TECHNOLOGY**

Для начала немного о самой технологии DLP. Расшифровывается она как Digital Light Processing (цифровая обработка света) и была изобретена в далеком 1987 году, а если точнее, то был изобретен чип, сделавший это возможным. И даже сейчас компания Texas Instruments и изобретатель технологии Доктор Лари Хорнбек (Dr. Larry Hornbeck) владеют огромным количеством патентов на технологию.

Собственно, что это за зверь такой? DLP — просто один из самых

распространенных видов проекторов. С проекторами мы сталкиваемся множество раз в течение жизни, начиная с похода в кино, заканчивая школьной презентацией. Но мы же не можем не эксперементировать, когда речь заходит о такой волшебной области, как 3D печать. Поэтому, хоть он изначально и не был приспособлен для такой роли, он стал активно использоваться для отвержения фотополимера и сейчас его можно встретить даже в принтерах компании 3D Systems, что подтверждает профессиональность его использования при всей неочевидности конструкции.

Что выделяет проекторную стереолитографию? Часто в качестве довода «в плюс» приводится скорость печати: так как засветка слоя происходит целиком, то зачастую процесс несколько ускоряется. Однако правило работает не всегда: скорость печати зависит от огромного количества факторов, так что лучше ориентироваться на информацию, которую оставил производитель.

# 3D печать, коротко и максимально ясно

Теперь поговорим о минусах или почему можно иногда не доверять производителям. Все дело в том, что с лазерами, теоретически, платформу можно увеличивать в плоскости вплоть до бесконечности. А вот с проекторами такой фокус не пройдет, размер итоговой модели ограничен разрешением проектора. Если лазер засвечивает любую точку в пределе доступности разрешением в 200 микрон, то проектор засвечивает плоскость разрешением в 1920\*1080 (FullHD), а вот размер плоскости выбирать уже вам. Логично предположить, что если вы будете увеличивать ее размер, то будет падать разрешение, если будете уменьшать — разрешение будет повышаться. А производители склонны писать минимальное разрешение точки и максимальный размер рабочей платформы, не указывая, что двум цифрам никогда не оказаться вместе.

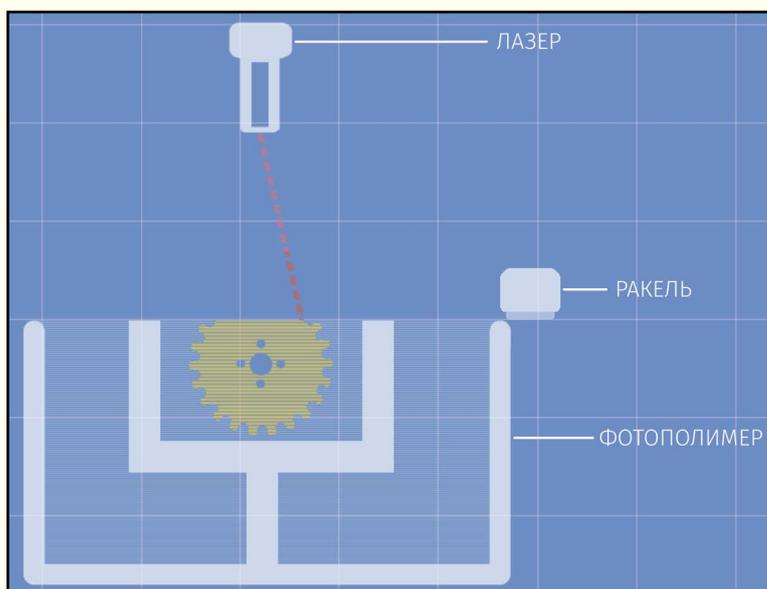
К слову, это не только минус, но и плюс. В среднеценовом сегменте найти лазерные принтеры с разрешением печати в 20 мкм невозможно, зато с DLP принтерами это не окажется проблемой.



## Кинематика

Кинематика SLA принтеров не столь разнообразна, как у FDM. Все дело в том, то как бы не выдумывал, больше одного движимого элемента не придумаешь. Ну и двигаться он может только вверх или вниз, что разделяет все SLA принтеры на две категории: Top Down (когда источник УФ-света расположен сверху, а платформа движется вниз) и Bottom Up (когда источник света расположен снизу и платформа движется вверх). Два этих метода формируют особенности относительно внутреннего строения и положительные — отрицательные стороны, поэтому я буду разбирать дальнейшее строение по каждой из конструкций отдельно.

### Top down системы



Подавляющее число сложных коммерческих машин пользуются этим методом; существуют и домашние дизайны, которые, правда, не столь многочисленны. Основной идеей является постепенное погружение модели в фотополимер вместе с платформой с последующим засвечиванием верхнего слоя.

Платформа в этом случае делается перфорированной (с отверстиями), чтобы фотополимер проходил сквозь нее вверх. Основным же требованием к фотополимеру является низкая усадка при полимеризации слоя. Иначе его уровень будет меняться слишком драматично, чтобы обеспечить качественную печать.

К ванне предъявляется несколько требований: она должна быть достаточно проч-

ной и химически инертной. Под них подходит достаточно обширный список материалов, например, металлы. В лабораторных условиях и самодельных дизайнах часто используются (и весьма успешно) пластики. Теперь немного подробнее об устройстве и слабых — сильных сторонах системы.

Для начала об системы:

- Первый и самый очевидный минус — необходимость постоянно держать ванну наполненной, ведь в случае если фотополимера в ней будет не хватать, то и печать не получится. Это выливается в копейку конечному потребителю и является основным препятствием для их домашнего распространения. Посудите сами, чтобы просто иметь возможность напечатать квадратик 20\*20\*20 см вам потребуется ванна минимум соизмеримых размеров, наполненная восьмью литрами фотополимера. И поддерживать его уровень потребуется постоянно, вне зависимости от размера печатаемых деталей (вы вряд ли будете печатать настолько большие детали каждый день). Ну и конечно, ванна всегда будет несколько больше.

Далее, весь этот объем необходимо поддерживать чистым. Для сложных профессиональных принтеров это не является проблемой, но в случае упрощения дизайна не избежать вопроса о сохранении полимера в идеальной чистоте. Подумайте, что дома у нас зачастую не лабораторные условия, и попавшая в фотополимер пыль может запороть весь процесс печати, не говоря уже о том, что в комнату может залететь муха и, как ни забавно, в фотополимере утонуть. Фильтрация же настолько густых жидкостей — самая настоящая проблема.

# 3D печать, коротко и максимально ясно

А вишенкой на торте является сложность замены настолько больших объемов фотополимеров (в конце концов, мы люди любопытные и новое пробовать любим), требующая либо серьезных технических разработок, либо истинного упорства. Не совсем то, что нам надо.

Ну и конечно, любая неровность пола, любое движение принтера делает весь процесс бессмысленным, что не так страшно с монстрами по типу ProJet, зато самопальные дизайны двигать можно, и я вам не советую.

Другая ощутимая проблема — поверхностное натяжение и вязкость жидкости, которые не позволяют фотополимеру равномерно распределяться по поверхности при опускании и ограничивают толщину слоя. Все дело в том, что если платформу опускать недостаточно низко, то часть деталей фотополимером покрыто не будет, останутся сухими. Причем, чем меньше толщина слоя, чем чаще это можно наблюдать. Но зачем нам фотополимерная печать чтобы печатать огромным слоем? Поэтому часто используется такой метод, как «глубокое погружение» (deep dip). Модель уходит вниз достаточно глубоко, чтобы покрыться полимером целиком, а затем поднимается вверх. Вследствие вязкости полимера над объектом образуется небольшая горочка и у нас остается два выхода: ждать, пока поверхность станет плоской благодаря силе притяжения, либо выровнять поверхность с помощью ракеля. После того, как процесс закончен, мы имеем модель на глубине одного слоя в идеально плоском полимере и можем продолжать процесс.

На самом деле конструкция значительно проще, чем может показаться на первый взгляд, по крайней мере, в самых простых вариациях и в сравнении со следующим типом. Если конструкция грамотно откалибрована, то никаких проблем возникать не будет и оставив огромную деталь печататься 12 часов (а современные промышленные принтеры способны печатать детали размером, например, в 150\*75\*55 см), вы можете не волноваться, что когда вы вернетесь, то обнаружите совсем не то, что ожидаете.

Еще один плюс по сравнению с Bottom Up — размер деталей. Технически, вы можете печатать детали любого размера, если имеете достаточные финансы. Кроме этого этот метод не имеет такой зависимости от поддержек, которые можно сделать потоньше (деталь то находится в жидкости, а не подвешена в воздухе вверх ногами).

И все же я еще раз упомяну, что Top Down используют огромные промышленные машины, стоящие безумных денег, которые дома не поставишь. Если же вам очень хочется домашний принтер, то я предлагаю остановиться на следующей системе.

## Домашнее задание

Посмотреть



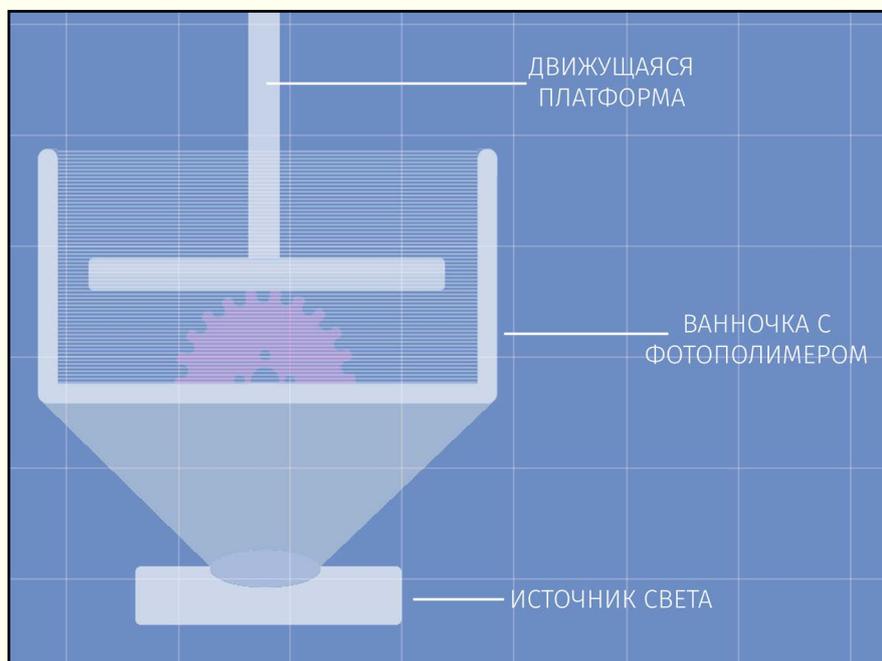
<http://www.youtube.com/watch?v=V3URKrvixd8>

Описание стереолитографии от 3D Systems. Красиво нарисовано и смонтировано. Посмотрите обязательно, даже если не знаете языка. В данном варианте платформа движется вниз.

<http://www.youtube.com/watch?v=Ak4kgiSvqN8>

Сразу посмотрите реализацию второй системы. Обратите внимание на гальваническую (лазер несколько раз отражается) и кинематическую (платформа движется вверх) системы. Английский.

## Bottom Up системы



Если вы интересовались 3D печатью, но не вникали, то вы сталкивались, скорее всего, именно с таким вариантом стереолитографических принтеров, а, возможно, только с одним представителем, Formlabs Form 1. Начавшие свой путь с кикстартера, они быстро развились в серьезную компанию. И даже сейчас они являются наравне с 3D systems, законодателями в сфере домашней полимерной печати.

А возможной она стала из-за использования перевернутой системы печати, которая сделала создание маленького колечка в высоком качестве по разумной цене возможным. Почему же?

Основным плюсом системы является возможность использовать полимер в меньшем объеме. Вам потребуется объем, равный размеру вашей модельки, плюс еще немного. Кроме того, остатки не страшно вылить, если они загрязнятся или вы захотите попробовать что-нибудь новенькое. Взамен нам достались другие проблемы.

А сложностей у нас добавилось прилично, и все они кроются в одном месте — ванночке. Помните, какие несерьезные требования предъявлялись к ваннам прошлого дизайна? Теперь мы к ним добавим еще два: оптическая прозрачность и низкая адгезия. Первое ограничивает нам выбор материалов, второе создает необходимость в усложненной механике и покрытиях.

Оптическую прозрачность обеспечивают не так много материалов, в основном, это стекло (помним, что разные стекла пропускают ультрафиолет в разном количестве), акрил и пластики (поликарбонат, он же лексан). Что еще стоит учесть? Материал не должен быть слишком толстым и преломлять свет, но при этом должен быть достаточно прочным.

В целом же, каких-то универсальных рецептов нет, стоит обращать внимание на прочность материала и на его прозрачность для видимых или ультрафиолетовых лучей в зависимости от типа вашего принтера (немного позднее).

А теперь мы перейдем к интересному пункту, а именно: зависимости качества печати от адгезии к ванночке. Когда мы работаем с послойным наплавлением, мы на адгезию молимся: нам нужна хорошая адгезия к платформе, между слоями, одного материала к другому. На стереолитографических принтерах таких проблем обычно не возникает, зато появляется новая: адгезия модели к ванночке. Когда весь фотополимер становится твердым и прикрепляется к модели, между ним и ванночкой образуются вакуумные силы, и, при хорошем стечении обстоятельств, он прилипает намертво. Потянув его просто вверх, мы сможем лишь выяснить, кто крепче ванночка или наша модель. Но ведь мы покупали принтер не для краш тестов! Поэтому производителями (и энтузиастами) было придумано использовать ряд материалов и веществ для покрытия дна для создания антиадгезионного слоя между ванной и моделью.

Кстати, с излишней адгезией в любом случае сталкивались женщины и холостые мужчины, когда готовили яичницу на старой сковородке. После того, как яйца обретают твердую форму, они намертво

# 3D печать, коротко и максимально ясно

прилипают и приходится снимать их с помощью лопатки. Получается плохо и на столе у нас оказывается не аппетитная глазунья, а, с вашего позволения, каша из яиц. Зачем я написал это лирическое отступление? Я просто люблю готовить. Ну и еще мне очень хотелось показать, что связь между любыми областями нашей жизни просто колоссальна. Какие сковородки обеспечивают «неприлипающую» поверхность? Правильно, тефлоновые!

Какой материал иногда используется для покрытия дна ванночки? Да, именно тефлон, который и делает ее немного похожей на сковородку. Также активно используется силикон, напыление полиэтлена и кое-что еще.

## Кругозор

Статьи



[http://www.khwellings.nl/3d.dlp\\_printer.testing.php#vat\\_floor](http://www.khwellings.nl/3d.dlp_printer.testing.php#vat_floor)

Попытка описания работы с различными адгезивными-антиадгезивными покрытиями. Не очень красиво, на английском, зато дает представление о типах используемых покрытий.

К сожалению, этого часто недостаточно и модель все-таки прилипает к ванне. Что делать дальше, выбирает уже производитель, самое простое — просто тянуть вверх. Решение не самое плохое, по крайней мере, не такое плохое, как может показаться на первый взгляд. Это упрощает механику (читай, меньше может сломаться) и удешевляет модель. А вот минусы весьма весомые — это повреждает модель и ванночку, еще сильнее ограничивает выбор фотополимеров. Несмотря на то, что большие плоские детали — краеугольный камень всех bottom-up принтеров, здесь ситуация достигает своего максимума. Посудите сами: чем больше площадь соприкосновения, тем сложнее будет отрывать деталь. Кстати, это и есть причина, почему детали часто располагаются под углом (если забыли, то пролистните немного назад, к скриншоту слайсера PreForm).

Чтобы избежать этого, были придуманы методы «мягкого» снятия модели с платформы. Это, в первую очередь, наклон (tilt), гибкая ванная (flexyble vat; Flexy-Vat), пассивный наклон (passive tilt) и движение в сторону (slide) с одновременным поднятием модели или с разноуровневыми частями ванны. Возможны и другие варианты, а также их комбинации. Все они облегчают снятие и не дают повредить модель.

## Домашнее задание

Посмотреть



Здесь будет много видео и немного картинок. Пожалуйста, посмотрите все, решения достаточно специфичные и не слишком очевидные.

<https://youtu.be/Bdd7-wZBVgQ?t=5s>

Form 1 использует наклон ванны, чтобы избежать повреждения платформы. Посмотрите до того момента, как поймете принцип.

<https://youtu.be/JbbyF-U9EAM?t=2m34s>

Kudo3D Titan1 использует гибкую ванну. Также как и в прошлом видео досмотрите до того момента, как поймете принцип.

<https://patents.google.com/patent/US20130292862A1>

Не пугайтесь ссылки на патенты, нас интересуют только изображения, конкретно третье, для понимания следующего видео. Обратите внимание, что разные части ванночки имеют разные уровни.

<https://youtu.be/LeZDjIFqJUI?t=3m50s>

Видео с использованием сдвига ванны, изображения, которого вы видели по прошлой ссылке. Снова смотрите вплоть до того, как поймете принцип.

[https://youtu.be/-K0bb5\\_Pjkw?t=34s](https://youtu.be/-K0bb5_Pjkw?t=34s)

Совмещенное использование наклона и сдвига. Также если бы я мог, я бы наградил это видео за лучший саундтрек.

Ну а теперь у читателей возникает резонный вопрос: «Что работает лучше?» Правда в том, что если отбросить первый вариант, то все они имеют право на существование. В целом же, можно наблюдать, что качество исполнения в данном случае больше влияет на конечную модель, нежели выбранная технология. И, конечно, совмещенные методы будут работать лучше, но только оправдывает ли дополнительное усложнение принтера и повышенная цена качество, которое в большинстве случаев будет неотличимо?

Тем не менее, вне зависимости от механики ванночки, либо ее отсутствия, есть серьезное правило, существенно отражающееся на печати. Избегайте соприкосновения больших плоских частей модели с дном ванночки. Да, это вызовет необходимость в дополнительных поддержках и увеличит расход полимера, но все же обрезать поддержки легче, чем выправить ошибки печати.

# 3D печать, коротко и максимально ясно

Ну и конечно, мой рассказ был бы неполным, если бы я не упомянул технологию CLIP (Continuous Liquid Interface Production), наделавшей в свое время много шума.

## Кругозор

Посмотреть



Статьи



Собственно, патент на технологию CLIP. Если хватает знания языка, настоятельно рекомендую ознакомиться (скачайте pdf с картинками).

<https://patents.google.com/patent/US20150072293A1>

<https://www.youtube.com/watch?v=ihR9SX7dgRo>

Презентация технологии CLIP. 10 минут харизматичнейшего Джозефа ДеСимона, русские субтитры и Терминатор как источник вдохновения. Почему бы не посмотреть?

## Домашнее задание

Посмотреть



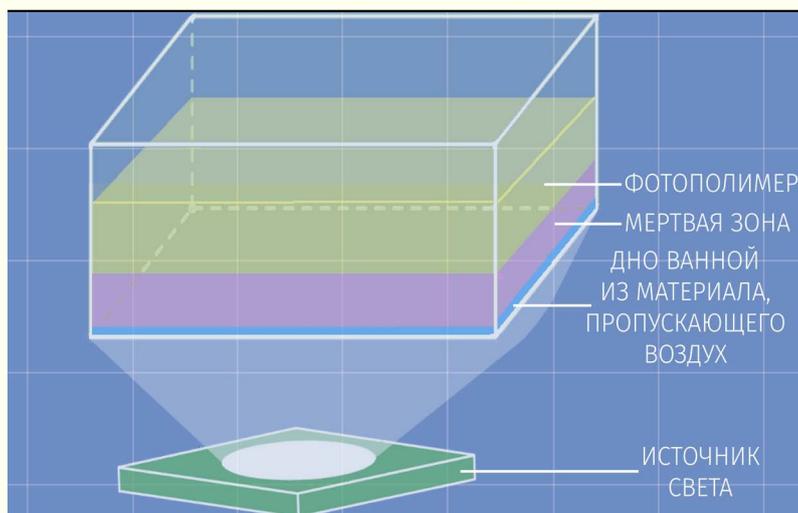
<https://www.youtube.com/watch?v=VTJq9Z5g4Jk>

На видео обратите внимание на счетчики времени (6 минут 35 секунд), что является действительно поразительным результатом для 3D печати.

Начну я с самого главного: такой принтер вам купить не удастся, по крайней мере, пока что, поэтому к видео принято относиться скептически. Вы также найдете несколько способов имитации технологии CLIP (например, использование соляного раствора), но работать так хорошо они не будут.

Если разобрать саму технологию, то основное отличие ее от обычной стереолитографии заключается в использовании особого материала дна ванночки, пропускающего газы, но удерживающего фотополимер. Несмотря на то, что в патентах речь идет о возможности использовать не только кислород, официальный сайт говорит именно о нем. В чем особенность кислорода? Кислород не позволяет фотополимеру затвердевать, а это означает, что нижняя граница жидкости затвердевать не будет, а процесс будет происходить выше, на границе с так называемой «мертвой зоной». А это разом снимает все вопросы относительно излишней адгезии и вакуумных сил ко дну ванны и позволяет печатать непрерывно, не тратя бесценное время на поднятие модели.

Но, на мой взгляд, скорость печати не



Схематичное изображение CLIP технологии.

основной плюс технологии. Многие комментаторы опускают смелое заявление, сделанное на презентации: отсутствие слоев, то есть внешняя схожесть произведенных деталей с литыми. Почему же так происходит?

При использовании традиционных систем нам приходится разделять создание каждого слоя на несколько действий, включая отделение его от дна ванны (в bottom-up системах) или равномерное распределение смолы (в top-down системах). От того, сколько раз они будут выполнены, а также от их продолжительности, и зависит время печати, то есть количество слоев увеличивает время построения модели. Технология CLIP обеспечивает непрерывную печать, оставляя только два действия: засветку фотополимера и поднятие рабочей платформы, которые могут выполняться синхронно. Поэтому время построения модели становится зависимым не столько от количества слоев, сколько от свойств фотополимера. Значит можно создавать модель с любыми по размеру слоями (то есть, максимально маленькими) с меньшим влиянием на скорость.

На презентации было сказано, что высокое разрешение моделей отражается не только на внешнем виде, но и на физикотехнических характеристиках, создавая детали, которые максимально схожи с литьем.

Теперь несколько слов о том, почему в домашних условиях воссоздать технологию будет сложно:

- Себестоимость материалов. В патенте говорится о экспериментах с двумя термопластиками: Teflon AF 1600 и Teflon AF 2400. Мало того, что их почти невозможно получить, они еще и очень дорогие. Кроме того, скорее всего, Carbon3D будет разрабатывать (или уже разработали) свои материалы, более дешевые или приспособленные под задачу.

- Следом можно добавить необходимость замера множества параметров, такие как атмосферное давление и температура, а также точная настройка оборудования. Если обычно при печати мы ориентируемся на дно ванночки (которое стабильно и никуда не денется), то в случае с CLIP нам приходится работать с нестабильной «мертвой зоной», которая зависит от насыщенности полимера кислородом.

Насколько технология действительно работает говорить еще рано, так как все, что мы имеем — патенты и несколько демонстрационных видео. Тем не менее, многие, в том числе и я, ждут реализации технологии в свободно продаваемых принтерах.

## Кругозор.

Посмотреть



<http://carbon3d.com/in-the-news/>

Просто оцените, как много (и насколько авторитетные издания) писали и пишут про технологию CLIP и компанию Carbon3D.

Идея с созданием «мертвых зон» при печати прижилась в умах производителей и привела к созданию еще двух технологий: ILI (Intelligent Liquid Interface) и LSPc (self-Lubricant Sublayer Photocuring), которые возможно одна и та же технология. Патенты, к сожалению, не открыты, так что правду нам узнать не дано.

## Кругозор.

Посмотреть



<http://3dprint.com/108599/patent-nexa3d-newpro3d/>

Статья, в первую очередь, о патентных спорах, на английском. Тем не менее, я предлагаю вам насладиться тремя видео с демонстрацией трех разных технологий.

# 3D печать, кратко и максимально ясно

## Постобработка.

За процессом изготовления модели следует постобработка. Есть несколько пунктов постобработки, связанных напрямую с производством моделей данным методом. Это очистка модели и дополнительное отвержение.

### Промывка

Когда мы только подняли модель из фотополимера, ее необходимо помыть, чтобы очистить от его остатков. Чаще всего, для этой цели используется изопрополевый спирт, в котором модель промывается. Пожалуйста, помните, при работе с изопрополевым спиртом требуется соблюдать технику безопасности.

Возможны и иные методы промывки модели. Дополнительные инструкции можно получить от компании, производящей фотополимерную смолу.

### *Домашнее задание.*

Посмотреть



[https://youtu.be/D05Y\\_OUDzfl](https://youtu.be/D05Y_OUDzfl)

Короткий обучающий ролик от Formlabs, иллюстрирующий промывку модели. Английский

### Отвержение

После очистки модели производится дополнительное отвердевание. Чаще всего, оно проводится с помощью ультрафиолетового бокса, при этом время, необходимое на дополнительное отвержение модели, указывается производителем. Также возможна засветка солнечным светом.

### *Домашнее задание.*

Посмотреть



[https://youtu.be/D05Y\\_OUDzfl](https://youtu.be/D05Y_OUDzfl)

Видео, демонстрирующее постобработку, начиная с засветки ультрафиолетом. Обратите внимание, что поддержки удаляются только после дополнительного отвердевания модели. Английский

После выполнения данных действий мы возвращаемся к стандартному процессу постобработки, опуская удаление слоев, так как данная технология способна обеспечивать высокое качество конечных моделей. Дальнейшая постобработка включает в себя: удаление поддержек, грунтовку и покраску.

## Домашнее задание.

Посмотреть



<http://formlabs.com/support/finishing>

Пособие по постобработке от formlabs. Настоятельно рекомендую посмотреть целиком. Несмотря на то, что текст на английском, пособие включает в себя gif-анимации и картинки.

## Материалы для печати.

С вашего позволения, я сразу оговорюсь, что описывать фотополимеры — не пластики описывать. Их не очень много, но они все разные, составы никто не оглашает, да и едва ли они поддаются какой-то внятной классификации.

Если я попытаюсь описывать каждый из них, то это глава неизбежно сорвется в обзоры отдельных фирм и марок. Поэтому, я решил дать вам основные характеристики фотополимеров, на которые стоит ориентироваться при покупке, чтобы вы знали, что спрашивать у производителя, смотреть в технической информации и искать в отзывах.

Перед описанием позвольте мне еще одно логичное суждение — легче всего будет печатать теми смолами, которые поставляются производителем, так как они протестированы с оборудованием и будут давать хорошие результаты в режиме Plug 'N' Play.

Серьезные промышленные производители, например, 3D Systems разрабатывают свою линейку материалов (5-10 видов) с хорошими техническими инструкциями и обычно покрывают все сферы применения принтеров, так что смысла искать что-нибудь новенькое обычно не возникает. К домашним принтерам обычно предоставляется меньший выбор, которого, однако, хватает для непрофессиональных экспериментов. Но, предположим, вы решили попробовать что-нибудь новенькое. Вы нашли неполных два десятка фирм, половина из которых, кроме всего прочего, производит еще и 3D принтеры. На что стоит обратить внимание в первую очередь?

### Длина волны

Фотополимер чувствителен к воздействию на него электромагнитного излучения, видимый спектр которого мы различаем и называем условно светом.

Понятие электромагнитного излучения очень широкое и включает в себя даже рентгеновское излучение, гамма лучи и радиоволны. Нас это, конечно, не интересует, мы остановимся на достаточно узком его спектре: от ультрафиолетового излучения до конца видимого спектра.

Длина волн ультрафиолетового излучения составляет от 10 до 400 нм, длина волн, распознаваемых глазом от 400 до 780 нм. Собственно, зачем эта информация?

Убедитесь, что ваш принтер охватывает необходимый спектр. Собственно, кроме SLA LCD принтеров, вы будете иметь дело с ультрафиолетом, но все же

Если вам все же довелось иметь дело с принтером, источник света которого работает в видимом спектре, то вам придется поискать фотополимер, работающий с волнами длинее 400 нм.

# 3D печать, коротко и максимально ясно

## Вязкость

Вязкость фотополимера — настоящая беда, когда дело доходит до печати, так как увеличивает время печати, причем вне зависимости от конструкции. С вязкостью постоянно борются, так как она может серьезно увеличивать время, затрачиваемое на создание модели. Чтобы снизить вязкость, используют, например, подогреваемую ванну.

## Длительность экспозиции

Если вы увлекались фотографией, то вы, наверное, помните о таком понятии как экспозиция. Экспозиция — количество излучения, полученного светочувствительным элементом. А так как метод производства фотографий очень похож на стереолитографию, то и термины схожие.

Обычно используется такое определение как время экспозиции, характеризуется оно временем, необходимым на формирование одного слоя. Время экспозиции — величина относительная и зависит как от силы источника излучения, так и от величины слоя (и еще от полудюжины менее значимых факторов).

Из этого следует, что лучше всего использовать фотополимер с меньшим временем экспозиции, так как чем быстрее формируется слой, тем быстрее происходит печать.

Кстати, просчитанное для конкретного фотополимера время экспозиции — основная причина покупать фирменные смолы от производителя, так как на других принтерах время экспозиции придется подбирать (и это, поверьте мне, далеко не самое веселое занятие).

## Выжигание и зольность

Для начала стоит рассказать немного про технологию изготовления ювелирных украшений, используя специальные формы — восковые модели, «восковки». Они заливаются специальной массой и выжигаются, оставляя полость, которая заливается металлом. Собственно, почему воск? Все дело в том, что воск выгорает полностью, не оставляя в форме золы. Иными словами, литейный воск обладает нулевой зольностью.

## Домашнее задание

Посмотреть



<https://youtu.be/CxyWWEW4Z0o?t=18m52s>

Процесс создания кольца в передаче «Непростые вещи», Россия 2.

Подобный способ изготовления колец хорошо подходит для массового производства, в случае необходимости в небольшой партии восковки вырезаются на фрезерном станке. Теперь их можно изготавливать и на 3D принтере.

Тут нам и понадобится такая характеристика, как зольность. Ведь в случае с ювелирным воском, золы не остается совсем, современные SLA-принтеры также способны изготавливать материалы с минимальной или нулевой зольностью.

Нужно понимать, что полимеры, используемые для выжига — совершенно особенный класс и к ним не предъявляются какие либо физико-технические требования. Единственное, что от них нужно — полностью выгореть, для функциональных прототипов они не используются.

## Кругозор.

Посмотреть



<https://youtu.be/NIHaYOjSB7M?t=2m54s>

Проба выжигает фотополимер от Russian DLP. Да, процесс выполнен не идеально, но дает представление о выжиге моделей.

### Физикохимические свойства

Я был бы очень удивлен, если бы вы решили не обращать внимания на то, насколько крепким или гибким получится конечный материал.

### Классификация

В итоге мы получаем (очень условно) следующие категории:

- «Быстрые» фотополимеры.

То есть фотополимеры, которые обеспечивают быструю печать. Они обладают пониженной вязкостью и временем экспозиции. К сожалению, часто они отстают по другим параметрам, хотя быстрее свои фотополимеры пытаются сделать все производители.

- Фотополимеры с особыми свойствами

Повышенная прочность, стойкость к температурному воздействию или гибкость конечного изделия. Часто за хорошие качества приходится, так или иначе, платить временем.

- Выжигаемые фотополимеры

Совершенно особенный класс, который вам понадобится, только если вы решите заняться ювелирным производством.

«Не очень большое разнообразие,» — скажите вы. И я с вами согласен, с интересными фотополимерами у нас грустненько, а, посмотрев на цену, вообще плакать хочется. Снова промышленные производители впереди всех, стараясь обеспечить все потребности пользователей, но промышленные принтеры, конечно, не для всех..

# 3D печать, коротко и максимально ясно

## Примечания к бете.

Мне безумно приятно, что вы оказались тут. Это говорит о том, что я либо достаточно хорош, либо слишком плох, настолько плох, что даже забавно.

Ну а раз дело обстоит именно так, то я могу поговорить с вами (сквозь пространство и время!). Мне очень понравилось работать с этой книгой, я надеюсь продолжать ее, но я ведь никто без читателя. Когда я читаю специальную литературу, либо популярные статьи, я часто просто хмыкаю под нос в мыслях о бездарности автора, я никогда никому ничего не пишу. Это проще.

Но мне хотелось бы, чтобы вы нашли минутку и написали пару строк мне на почту (3Dprinting@lth-books.ru). Мне было бы приятно, если бы вы отметили там все места, где я мог ошибиться. Вы можете выразить просто личное мнение о том, что я написал, вы можете сказать, что бы вы изменили. Вы можете просто написать «спасибо». Не стесняйтесь, я отвечаю всем и всегда смогу объяснить, чем руководствовался, когда писал то или иное утверждение.

Я буду садиться за почту с 6 до 9 утра ежедневно, тогда же буду и отвечать. Я повторяю, что отвечаю всем, даже если вы напишите набор букв или отборный мат, некоторым правда только один раз. Если я вам не ответил, пожалуйста, повторите письмо еще раз через несколько дней.

А еще можно написать нам в группе вконтакте, используя сервис сообщений, но я не обещаю, что буду отвечать всем.

Почта книги

3Dprinting@lth-books.ru

Группа вконтакте

vk.com/littletinyh

А еще вы могли заметить, что книга не закончена. Я ласково ее называю «бетой», но по сути она является «пробным шаром», чтобы определить насколько я компетентен как специалист и талантлив как писатель. Если все пойдет по плану вы с большой вероятностью сможете найти дополненную версию книги через 45 дней на сайтах:

Сайте:

lth-books.ru

Группе вконтакте:

vk.com/littletinyh

Энциклопедии сайта 3dtoday.ru

3dtoday.ru/wiki

А еще на нашем сайте есть много других интересных вещей, например, файл «бизнесу и профессионалам», где, кроме вопросов спонсорства и взаимодействия с профессиональной сферой, изложен план книги (доступный для критики).

Также на сайте можно подписаться на новое издание.

Надеюсь с вами пообщаться. С бесконечным уважением и нежной любовью, Роман.

## Ссылки на правообладателей велико- лепных фотографий и изображений, которые я использовал в книге.

1. [https://www.flickr.com/photos/creative\\_tools/15756448892/](https://www.flickr.com/photos/creative_tools/15756448892/)
2. [https://www.flickr.com/photos/creative\\_tools/15657700357/](https://www.flickr.com/photos/creative_tools/15657700357/)
3. [https://www.flickr.com/photos/creative\\_tools/8737793523/](https://www.flickr.com/photos/creative_tools/8737793523/)
4. [https://www.flickr.com/photos/creative\\_tools/16017605798](https://www.flickr.com/photos/creative_tools/16017605798)
5. [http://wiki.e3d-online.com/wiki/E3D-Lite6\\_Assembly](http://wiki.e3d-online.com/wiki/E3D-Lite6_Assembly)
6. <http://www.thingiverse.com/thing:1047193>
7. <https://www.youtube.com/watch?v=x7BqHPZ8pus>
8. [http://wiki.ikaslab.org/index.php/Impresi%C3%B3n\\_3D\\_paso\\_a\\_paso](http://wiki.ikaslab.org/index.php/Impresi%C3%B3n_3D_paso_a_paso)
9. <https://www.flickr.com/photos/68272764@N05/8136822496>
10. <https://www.flickr.com/photos/jabella/8965235630/>
11. <https://www.flickr.com/photos/johncrood/23048965405/>
12. <https://www.flickr.com/photos/tonnerrelombard/9308507379/>
13. [https://www.flickr.com/photos/creative\\_tools/15150499972/](https://www.flickr.com/photos/creative_tools/15150499972/)
14. [https://www.flickr.com/photos/creative\\_tools/25039022816/](https://www.flickr.com/photos/creative_tools/25039022816/)
15. <https://www.flickr.com/photos/funnypolynomial/9433818562/>
16. [https://www.flickr.com/photos/creative\\_tools/15150500562](https://www.flickr.com/photos/creative_tools/15150500562)
17. [https://www.flickr.com/photos/creative\\_tools/14978008304/](https://www.flickr.com/photos/creative_tools/14978008304/)
18. <https://www.flickr.com/photos/68272764@N05/10919712416/>
19. <https://www.flickr.com/photos/68272764@N05/10919691846/>
20. [https://www.flickr.com/photos/creative\\_tools/19218420864/](https://www.flickr.com/photos/creative_tools/19218420864/)
21. <http://www.sky-tech.com.tw/sky-tech/en/box4.html>
22. <http://www.stratasys.com/ru/3d-принтеры/finishing-touch-smoothing-station>
23. <https://www.flickr.com/photos/tschiaie/7623450152/>
24. [http://www.smooth-on.com/Epoxy-Coatings-XTC/c1397\\_1429/index.html](http://www.smooth-on.com/Epoxy-Coatings-XTC/c1397_1429/index.html)
25. [https://www.flickr.com/photos/creative\\_tools/19352485536/](https://www.flickr.com/photos/creative_tools/19352485536/)
26. [https://www.flickr.com/photos/creative\\_tools/12721648143/](https://www.flickr.com/photos/creative_tools/12721648143/)
27. <https://www.flickr.com/photos/tbuser/6739916565/>
28. <http://formlabs.com/products/3d-printers/form-2/>
29. [https://www.flickr.com/photos/creative\\_tools/17345089792/](https://www.flickr.com/photos/creative_tools/17345089792/)
30. <http://www.thingiverse.com/thing:1160880>
31. <https://www.flickr.com/photos/jabella/8217672811/>
32. <http://formlabs.com/store/eu/form-1/buy-materials/>
33. <http://formlabs.com/store/eu/form-2/buy-materials/>