

Оригинал двухчастной статьи “11 Myths About Additive Manufacturing” на английском языке можно найти на сайте [www.machinedesign.com](http://www.machinedesign.com).

# Одиннадцать мифов об аддитивном производстве

John O. Milewski (MachineDesign.com)

©2019 Informa USA, Inc.

Вокруг сферы аддитивного производства много шума, но видите ли вы полную картину? Пять лет тому назад **Hod Lipson** и **Melba Kurman** дали миру книгу “*Fabricated: The New World of 3D Printing*” [1], которая помогла создать волну энтузиазма в отношении 3D-печати и ехать на этой волне. Этот энтузиазм, подкрепленный государственным финансированием в США, а также истечением срока действия ключевых патентов, побудил многих купить 3D-принтер для своих детей и инвестировать в акции соответствующих компаний – восходящих звезд.

Вместе со своей книгой авторы дали нам и “10 принципов 3D-печати” в качестве дорожной карты в будущее, объясняющей, почему 3D-печать разрушит привычные способы проектирования и производства изделий. Я купил и прочитал эту книгу, я наслаждался ею. Понятно, что людей увлекают масштабные мечты, но, как инженер-технолог с опытом работы с продвинутыми материалами, а также опытом цифрового проектирования и производства, я понимал, что реализовать эту мечту будет не так уж и просто.

Сегодня, пять лет спустя, многие из ранних настольных 3D-принтеров стоят на полке, а некоторые из восходящих звезд стараются восстановить свою рыночную стоимость после бурного роста и спада, вызванных всей этой рекламной шумихой. Однако коммерческая 3D-печать и быстрое прототипирование продолжали развиваться под новым брендом – аддитивное производство (*Additive Manufacturing, AM*).

Аддитивное производство металлических изделий стабильно движется по пути промышленного внедрения, стандартизации и сертификации для таких критических сфер, как авиационно-космическая индустрия и изготовление медицинских устройств. Некоторые из мифов прошлого были развеяны, так как промышленное внедрение выводит технологии на чистую воду. В других случаях мифы сохраняются, поскольку потенциальные пользователи мысленно переносят свой опыт с домашней 3D-печатью на организованное по правилам аддитивное производство критических компонентов в производственной среде.

Основываясь на принципах, которые заложили **Lipson** и **Kurman**, на своём опыте инженера-технолога, а также на недавнем изучении соответствующей литературы [2], я с некоторой долей иронии составил свой список – 11 мифов о сфере аддитивного производства.



Рис. 1. Слева показан инжектор сразу после извлечения из установки селективного лазерного плавления металлического порошка (SLM), справа – он же после завершения операции. (Фото: NASA/MSFC)

## Миф 1: Создание сложных изделий обеспечивается само собой

В связанных с AM процессах сложность поддерживается не сама по себе. Большая часть затрат на создание сложных компонентов возникает “выше по течению” – на этапе проектирования, где требуется квалифицированный персонал, способный мыслить и проектировать нестандартным образом. На поиск и обучение таких людей понадобится много времени и денег. Кроме того, может потребоваться обновление программного обеспечения и приобретение дополнительных приложений – например, для генерации решетчатых структур и для инженерного анализа (CAE).

Последующие затраты – на финишные операции после печати и контрольные измерения компонентов сложной формы с внутренней структурой или изменяющейся толщиной стенок – могут в значительной степени определяться сложностью изделия. С другой стороны, один щелчок мышкой в CAD-программе может объединить несколько отдельных деталей в один компонент, который можно напечатать на 3D-принтере. Еще в 2013 году инженеры по материалам из NASA за 40 часов напечатали цельный инжектор ракетного двигателя (рис. 1) с помощью сложного станка для 3D-печати на участке передового производства в NASA Marshall Space Flight Center [3]. Чтобы изготовить такую же деталь путем сварки нескольких компонентов требовались месяцы.

С появлением AM возможность реализации сложности, добавляющей конструкциям новую ценность, перешла на новый уровень.

## Миф 2: Вариативность обеспечивается сама собой

Возможности инструментов параметрического проектирования обширны, но понимание

[производственных] ограничений вариантов конструкции становится всё большим вызовом по мере роста разнообразия и сложности изделий. В случае с АМ вы можете гораздо более свободно менять модель детали, однако надо учитывать, что при этом будет меняться весь печатаемый объект в целом, что может наложить дополнительные ограничения на ориентацию детали и опорные структуры; также следует принимать во внимание и завершающие операции – такие, как термообработка, чистовая машинная обработка, инспекция.

Для изделий, которые эксплуатируются в экстремальных условиях, сертифицированных деталей и стандартизированных процедур при каждом изменении конструкции, материала или процесса, может потребоваться повторная аттестация.

С учетом вышесказанного, я – поклонник концепции “один размер для всех”. Не мог бы пожелать ничего большего, чем индивидуально подогнанные кроссовки, беруши, велошлемы – но не в десятки раз дороже, поскольку затраты на вариативность будут ложиться на меня.

### Миф 3: Сборки больше не нужны

Уменьшение количества деталей в сборках позволяет экономить на закупках, изготовлении подкомпонентов, сборочных операциях, ручном труде, спецификациях материалов, а также укоротить цепочки поставок. Демонстрационные примеры использования АМ показали возможность значительной экономии в этом аспекте. Тем не менее, хотя возможности АМ-станков растут, многие детали по габаритам больше того, что можно получить на существующем оборудовании. Это требует изготовления двух частей детали с их последующей дообработкой и приваркой друг к другу.

Подгонка и чистовая обработка остаются критически важными операциями, также, как и обслуживание, ремонт компонентов из-за их износа, поломки или вследствие других обстоятельств в течение срока службы. Кроме того, цельность готовой конструкции может препятствовать удалению лишнего порошка при печати или доступу к поверхностям и конструктивным элементам с критическими требованиями в отношении завершающих операций или сервиса/ремонта.

### Миф 4: Нулевое подготовительное время

Соглашусь, что уменьшение времени на подготовку (но не до нуля!) и сокращение складских запасов выглядят очень привлекательно, равно как и потенциальная возможность для множества провайдеров услуг обеспечивать изготовление на местном рынке. Эти преимущества обычно возможны для моделей, прототипов и компонентов, которые не являются критически важными. Однако когда дело касается экстремальных условий эксплуатации и металлических компонентов, то в игру могут вступать такие факторы, как время на переключение между материалами и время в очереди на специализированные операции завершающей обработки.

Многие крупные провайдеры АМ-услуг выделяют станки под определенные материалы и организуют у себя выполнение таких завершающих операций, как HIP (горячее изостатическое прессование) и EDM (электродная наплавка). Транспортбельность 3D-конструкций (перемещение между оборудованием) – например, при изготовлении одинаковых деталей на разных станках, расположенных в разных местах – остается проблемой, что следует учитывать при рассмотрении преимуществ от использования услуг нескольких провайдеров.

### Миф 5: Неограниченный простор для проектирования

Сегодня существует множество материалов и процессов АМ – и все они имеют свои ограничения. Хотя количество сплавов, подходящих для аддитивного производства металлических изделий, растет, диапазон доступных материалов всё еще остается весьма скромным по сравнению с обычными процессами металлообработки. Стоимость и доступность материалов являются первоочередными соображениями при проектировании, равно как и ограничения на габариты детали из-за объема рабочей зоны системы. Цена металлического порошка для АМ может вдвое превышать цену металлической проволоки и даже заказной поковки.

Каждый из АМ-процессов и каждый тип станков имеет свои ограничения – как это свойственно и любым другим процессам. Минимальная толщина стенок, размер конструктивных элементов и качество чистовой поверхности – это всего несколько примеров таких ограничений. Может теперь вы и в меньшей степени ограничены требованиями технологичности в отношении формы конструктивных элементов создаваемых деталей или формы каналов для охлаждения, но вместо этого вам придется учитывать другие ограничения АМ, связанные с ориентацией детали относительно направления её “печати”.

При всём при том АМ делает возможным проектирование и изготовление “невозможных компонентов” – таких, которые нельзя получить другими способами.

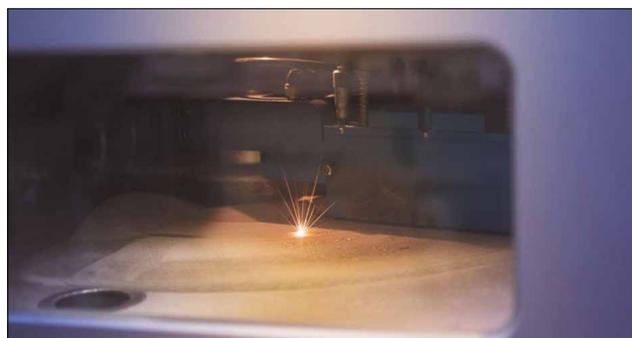


Рис. 2. Производство металлических порошков становится массовым – в расчете на всё более глубокое проникновение 3D-печати в прототипирование и производство. (Фото: Marina Skoropadskaya / iStock / Getty Images)

## Миф 6: Квалифицированные операторы не нужны, люди исключаются из цикла

Если вы когда-нибудь что-нибудь производили, то знаете, как много существует способов завалить дело, а затем стараться исправить (например, очистка забитого механизма подачи, диагностика и замена двигателя подачи, устранение различных проблем при лазерной или электронно-лучевой сварке и т.п.). Общий миф в отношении АМ гласит, что здесь надо изучить только один процесс.

Хорошо это или плохо, большинство автоматизированных процессов АМ действительно идет без ручного вмешательства. Некоторые из них имеют встроенные возможности обратной связи и контроля в реальном масштабе времени, для некоторых обеспечивается сбор данных, чтобы отмечать нормальные условия. Многие АМ-станки блокируют для пользователей возможность контролировать и даже знать какие-то рабочие параметры (что вызвано правом интеллектуальной собственности) и не допускают вмешательства в управление многими параметрами.

Однако производственный опыт требуется при настройке станка, мониторинге процесса и при выполнении завершающих операций. Работы по поддержке этих станков (такие, как калибровка и техническое обслуживание) будут важны не менее, чем в случае любого другого процесса изготовления – а в некоторых случаях даже более, поскольку вы входите в сферу обработки материалов лазерными и электронными лучами.

Таким образом, можно ждать, что эпоха нулевой потребности аддитивного производства в людях наступит не раньше, чем начнется автономная разработка недр астероидов роботами.

## Миф 7: Компактное производство, которое легко перемещать

Участки аддитивного производства металлических изделий действительно могут занимать меньшие площади, чем обычные металлообрабатывающие производства, но зачастую они оснащаются и



*Рис. 3. Это металлическое “пространственное полотно” было создано с помощью методов 3D-печати, которые позволили придать разные свойства каждой стороне материала.  
(Фото: NASA/JPL-Caltech)*

оборудованием для выполнения завершающих операций и чистовой обработки. Коммерческие системы постоянно увеличиваются в размерах, поскольку печатаемые изделия становятся всё более объемными; оборудование для последующей обработки также становится всё более габаритным (например, нагревательные печи для термообработки, изостатические прессы горячего прессования и т.д.), как и опорные структуры.

Тем не менее, несмотря на тенденцию движения АМ к метровой шкале, здесь всё еще остается широкий спектр применений для оборудования, которое может рассматриваться как портативное – например, в стоматологии и других областях медицины. Достигнут прогресс в создании настольных АМ-систем для металлоизделий, а также комплексных модульных контейнерных систем для транспортировки в удаленные места.

## Миф 8: Расходуется меньше материала, создается меньше отходов, весь остаток порошка можно собрать и использовать повторно, не нужны монтажные и установочные приспособления

В традиционном производстве соотношение закупленного и использованного материала может быть больше, чем 9:1, так как 90% дорогих суперсплавов может оказаться в стружке на полу цеха. Цена премиального металлического порошка для АМ, как уже упоминалось, может в несколько раз превышать стоимость обычных металлических заготовок.

Кроме того, при проведении сравнений такого рода в общую стоимость материалов следует включить специальные инертные газы, материалы для других процессов, а также стоимость электроэнергии – как для аддитивного построения, так и для последующих операций. Меньшие потери и повторное использование материала возможны, но остается совокупность отходов в виде отсеянных частиц порошка и удаляемых опорных структур, а также потерь, вызванных ограниченностью жизненного цикла приспособлений (например, плит, на которых ведется построение).

Опорные структуры нужны не только для поддержки детали в процессе АМ-построения – они также служат для отвода тепла при печати мелких элементов, для поддержки детали в ходе термообработки (чтобы минимизировать деформации и искажения), механической обработки и проведения контрольных измерений. Фактически вы, как правило, создаете и затем ломаете оснастку для каждой изготавливаемой детали. Кроме того, сертификационные органы все ещё не пришли к определенному мнению: сколько раз нерасплавленный порошок можно просеять и повторно использовать для критически важных приложений – например, для изготовления аэрокосмических деталей и медицинских имплантов.

## Миф 9: Существует бесконечное количество видов материалов, мультиматериалов, создаваемых прямо на месте сплавов, а также стекловидных металлов

Хотя предложение материалов для АМ растет, в целом количество таких материалов и металлических сплавов весьма ограничено. Многие коммерческие материалы специально разработаны под существующие процессы – например, литейные сплавы, легко обрабатываемые нержавеющие стали и особые сварочные присадки. Полагаю, что количество цветных полимеров для 3D-печати увеличится скорее, чем мы увидим широкий спектр сертифицированных суперсплавов, специально разработанных под аддитивное производство металлических изделий.

Недостаточно изучены металлургические аспекты, относящиеся к использованию материалов, свойства которых меняются градиентно, к созданию сплавов прямо на месте и к некристаллическим стекловидным металлам. Вероятно, количество примеров, демонстрирующих применение этих технологий в промышленности, за пределами научных лабораторий, так и останется ограниченным.

Вместе с тем, мы можем увидеть испытания газосборника камеры сгорания ракетного двигателя (рис. 4), изготовленного из нескольких материалов с помощью двух методов аддитивного производства: 3D-печати из меди и нанесения покрытия из никелевого сплава пучком электронов в вакууме (EB-Free Form Fabrication).

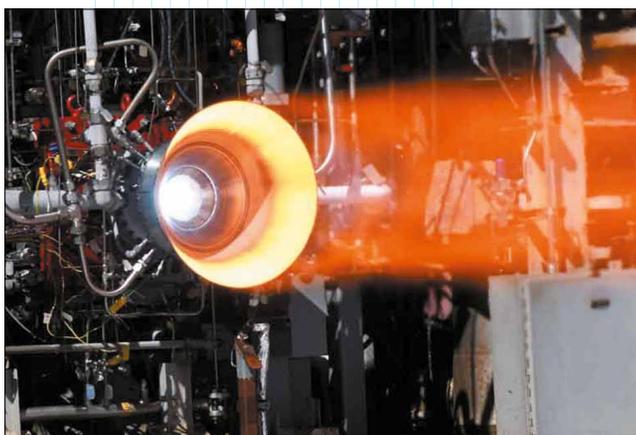


Рис. 4. Напечатанный на 3D-принтере газосборник камеры сгорания с нанесенным покрытием из никелевого сплава успешно прошел огненный тест NASA (Фотография: NASA/MSFC/David Olive)

## Миф 10: Точное воплощение цифровой модели, одноэтапный процесс

Я полностью за точное физическое воспроизведение цифровой модели, когда могу рассчитывать на отсутствие ошибок, безопасность, облачное извлечение и хранение. Однако повторяемость процесса и точное физическое воспроизведение при использовании АМ – это только мечта. Физический мир

полон проблем: нарушения процесса (гремлины!), неодинаковость изделий, неоднородность структуры, дефекты. Это не просто строка с набором нулей и единиц. Если вам необходимо точное физическое воплощение цифровой модели, то потребуются и точный станок для целой детали. Но лишь небольшая часть деталей может сразу использоваться в том виде, “как напечатано”. Для большинства металлических АМ-деталей нужна еще какая-то дообработка. Таким образом, требуется несколько этапов; но в некоторых случаях количество этапов изготовления (и производственные площади) можно сократить.

## Миф 11: Аддитивные технологии изменят привычные конструкции и способы изготовления изделий, преобразуют производство, что приведет к следующей промышленной революции

Прорывная технология не просто уменьшает существующие барьеры в отношении времени, затрат или навыков. Она предлагает решения в совершенно новом направлении, позволяет совершить рывок и полностью переосмыслить или переопределить потребности. 3D-печать и АМ родились в результате объединения множества развивающихся технологий (цифровое проектирование, передовые материалы, компьютеризированное управление станками, ИТ). Эти и другие технологии (такие, как робототехника и искусственный интеллект) будут быстро развиваться и впредь – в том числе, с учетом потребностей АМ.

Аддитивное производство, по мере расширения его внедрения, продолжит эволюционировать. Тем не менее, я считаю, что и через 50 лет многие из нынешних основных производственных технологий сохранят свое место. АМ во многих своих формах станет новым мощным инструментом в производственном наборе. На рабочий стол подаются новые АМ-процессы и материалы, вызывающие живой интерес. Демонстрируются крупные и сложные объекты метрового масштаба для тяжелой промышленности. У аддитивного производства – светлое будущее.

Настоящее разрушение и трансформация производства будут происходить в пространстве, где каждый аспект существующих производственных технологий будет пристально рассмотрен и затем воссоздан с “чистого листа”, с новой мечты. ☺

### Литература

1. Lipson H., Kurman M. *Fabricated: The New World of 3D Printing*. John Wiley & Sons, Inc., 2013, 320 p. // ISBN: 978-1-118-35063-8
2. Milewski J.O. *Additive manufacturing of metals from fundamental technology to rocket nozzles, medical implants, and custom jewelry*. Springer, 2017, 343 p. // Springer Series in Materials Science, vol. 258 // DOI 10.1007/978-3-319-58205-4
3. Rocket Engine Injector Manufactured With 3-D Printing Machine, 2013, July 24 // [www.nasa.gov/exploration/systems/sls/multimedia/gallery/3d\\_printer\\_2.html](http://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/multimedia/gallery/3d_printer_2.html)