

1. Аддитивные технологии. Общие принципы и понятия

Под термином «аддитивное производство» понимается спектр технологий, которые способны на основе данных о виртуальных моделях твердых тел изготавливать физические модели в результате быстрых и легких производственных процессов. Данные моделирования разбиваются на серии данных о двумерных сечениях конечной толщины.

Эти данные загружаются в машины аддитивного производства, которые последовательно, слой за слоем, добавляют материал. В результате этого формируется изделие на физическом уровне. 3D Принтеры точно воспроизводят геометрические параметры деталей без необходимости регулировки и настройки таких производственных процессов, как изготовление оснастки, обработка подсечек, формирование уклонов с заданным углом и прочего. Поэтому можно заключить, что получение изделий на машинах аддитивного производства — это процесс по принципу «строишь то, что видишь» (WYSIWYB — What You See Is What You Build), который имеет особенно высокую ценность при изготовлении изделий сложной геометрической формы.

Аддитивные технологии (AF — Additive Fabrication), или технологии послойного синтеза, — одно из наиболее динамично развивающихся направлений "цифрового" производства. AF — Additive Fabrication (или AM-Additive Manufacturing), принятая в англоязычной технической лексике аббревиатура словосочетания, означающего изготовление изделия путем "добавления" (additive) материала, в отличие от традиционных технологий механообработки, в основе которых лежит принцип "вычитания" ("лишнего") материала из заготовки. Суть AF-технологий состоит в послойном построении (синтезе) изделий — моделей, форм, мастер-моделей и так далее путем фиксации слоев модельного материала и их последовательного соединения между собой различными способами: спеканием, сплавлением, склеиванием, полимеризацией - в зависимости от нюансов конкретной технологии.

Иначе говоря, аддитивные технологии предполагают формирование детали путем последовательного "наращивания" материала слой за слоем. Они позволяют на порядок ускорить научно-исследовательские разработки и изготовление опытных образцов, а в некоторых случаях — и производить готовую продукцию, когда нужна высокая точность деталей и/или важно уменьшить вес изделия.

Аддитивные технологии имеют огромный потенциал в деле снижения энергетических затрат на создание самых разнообразных видов продукции.

Предшественниками современных AF-технологий считают две оригинальные технологии, появившиеся в XIX в. В 1890 г. Josef E. Blauther предложил способ изготовления топографических макетов — трёхмерных карт поверхности местности. Суть метода заключалась в следующем: из тонких восковых пластин по контурным линиям топографической карты вырезались фрагменты, соответствующие воображаемому горизонтальному сечению объекта, затем эти пластины укладывались одна на другую в определенном порядке и склеивались. Получался «послойный синтез» холма или оврага. После этого поверх полученных фигур накладывали бумагу и формировали макет отдельного элемента ландшафта, который затем уже в «бумажном» виде располагали в соответствии с исходной картой.

Практическое применение эта идея нашла в LOM-технологии — послойное ламинирование (Lamination Object Manufacturing) или склеивание тонких листовых материалов, толщина листов при этом составляет 0,051-0,25 мм. В 1979 г. профессор Nakagawa из Токийского университета предложил использовать эту технологию для быстрого изготовления пресс-форм, в частности, со сложной геометрией охлаждающих каналов.

Вторая технология — фотоскульптура (Photosculpture) была предложена французом Francois Willime в 1890 г. Суть её состояла в следующем: вокруг объекта или субъекта располагали фотокамеры (Willime использовал 24 камеры с шагом 15 градусов) и производили одномоментное фотографирование на все камеры. Затем каждое изображение проецировали на полупрозрачный экран, и оператор с помощью пантографа обрисовывал контур. Панто-

граф был связан с режущим инструментом, который удалял модельный материал – глину, в соответствии с профилем текущего контура.

Для уменьшения трудоемкости данного процесса немец Carlo Baese в 1904 г. предложил использовать фоточувствительный желатин, который при обработке водой расширяется в зависимости от степени засветки – экспозиции.

В 1935 г. Isao Morioka предложил способ, сочетающий в себе топографию и фотоскульптуру. Способ предполагал использование структурированного света (сочетание черных и белых полос) для создания топографической «карты» объекта – набор контуров. Контурные затем вырезались из листового материала, укладывались в определенном порядке и таким способом формировался трёхмерный образ объекта. Или же, как и у Francois Willime, контуры могли быть спроецированы на экран для дальнейшего создания трёхмерного образа с помощью режущего инструмента.

Первым приближением к стереолитографии в современном понимании стала идея Otto Munz (1956 г.), который предложил способ селективной (послойной) экспозиции прозрачной фотоэмульсии. На этот слой проецировался контур (сечение) объекта. В качестве платформы, на которой производилась экспозиция, использовался поршень, установленный в цилиндре с возможностью перемещения. Поршень перемещали на определенную величину (т.е. с определенным шагом) и сверху наносили слой эмульсии, проецируя на него изображение, после чего наносили слой фиксирующего реагента. И так каждый фрагмент построения детали: поршень перемещали вниз, наносили фотоэмульсию, засвечивали, наносили слой фиксирующего реагента и т. д.

Фиксирующий состав наносился на весь слой – и на засвеченные участки, и на незасвеченные, в результате: внутри затвердевшего прозрачного материала, сформированного в виде цилиндра, оказывался заключенным образ трёхмерного объекта.

В 1977 г. Wyn Kelly Swainson предложил способ получения трёхмерных объектов посредством отверждения фоточувствительного полимера в точке пересечения двух лазерных лучей. Примерно в это же время начинают появляться технологии послойного синтеза из порошковых материалов (P.A. Ciraud, 1972).

В 1981 г. R.F. Housholder предложил способ формирования тонкого слоя порошкового материала нанесением его на плоскую платформу. Далее производилось разравнивание до определенной величины по высоте с последующим спеканием слоя. В том же году Hideo Kodama опубликовал результаты работы с первых функциональных систем фотополимеризации с помощью ультрафиолетовой (УФ) лампы и лазера. В 1982 г. была опубликована работа A.J. Herbert по созданию трёхмерных моделей с помощью X-Y-плоттера, УФ-лампы и системы зеркал.

Технология «трехмерной печати» появилась в конце 80-х годов прошлого века. Родоначальником отрасли стал Charles W. Hull, основатель фирмы 3D Systems – компании, первой приступившей к коммерческой деятельности в области послойного синтеза. В 1986 г. Charles W. Hull предложил способ послойного синтеза посредством ультрафиолетового излучения, сфокусированного на тонкий слой фотополимерной смолы. Он же и ввел в оборот термин «стереолитография». В этом же году инженер собрал первый в мире стереолитографический 3D-принтер – SLA (Stereolithography Apparatus), благодаря чему цифровые технологии сделали огромный рывок вперед. Приблизительно в то же время Скотт Крамп, позже основавший компанию Stratasys, выпустил первый в мире FDM-аппарат. С тех пор рынок трехмерной печати стал стремительно расти и пополняться новыми моделями уникального печатного оборудования.

До середины 90-х годов они использовались главным образом в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности, связанной с оборонной промышленностью. Первые лазерные машины – сначала стереолитографические (SLA-машины), затем порошковые (SLS-машины), были чрезмерно дороги, выбор модельных материалов весьма скромный. Однако в 1995 году назрел перелом, сделавший аддитивные методы изго-

товления продукции общедоступными. Студенты Массачусетского технологического института, Джим Бредт и Тим Андерсон, внедрили технологию послойного синтеза материала в корпус обычного настольного принтера. Именно так была основана компания Z Corporation, долгое время считавшаяся лидером в сфере бытовой печати объемных фигур.

Широкое распространение цифровых технологий в области проектирования (CAD), моделирования и расчетов (CAE) и механообработки (CAM) стимулировало взрывной характер развития технологий 3D-печати, и в настоящее время крайне сложно указать область материального производства, где в той или иной степени не использовались бы 3D-принтеры.

Методы аддитивных технологий

В недалеком прошлом, лет 10–15 назад, аддитивные технологии использовались преимущественно в традиционно технологически продвинутых отраслях – автомобильной, авиационной и аэрокосмической промышленности, а также в приборостроении и медицине, где тандем "время – деньги" всегда имел особое значение.

В эпоху инновационной экономики время, затраченное на производство товара, является важнейшим фактором успеха или неуспеха бизнеса. Даже качественно произведенный товар может оказаться невостребованным, если рынок к моменту выхода новой продукции уже насыщен подобными товарами компаний-конкурентов. Поэтому все больше направлений промышленности активно осваивают АФ-технологии. Все чаще их используют научно-исследовательские организации, архитектурные и конструкторские бюро, дизайн-студии и просто частные лица для творчества или в качестве хобби. Во многих колледжах и университетах аддитивные машины, или, как их часто называют, 3D-принтеры являются неотъемлемой частью учебного процесса для профессионального обучения инженерным специальностям.

Существует множество технологий, которые можно назвать аддитивными, но объединяет их одно: построение модели происходит путем добавления материала (от англ. add – "добавлять") в отличие от традиционных технологий, где создание детали происходит путем удаления "лишнего" материала.

Классической и наиболее точной технологией является SLA-технология (от Stereolithography Apparatus), или стереолитография, – метод поэтапного послойного отверждения жидкого фотополимера лазером. Существует много видов фотополимерных композиций, поэтому спектр применения прототипов, полученных по SLA-технологии, очень широк: макеты и масштабные модели для аэро- и гидродинамических испытаний, литейные и мастер-модели, дизайн-модели и прототипы, функциональные модели и дизайнерские компоненты повышенной точности с высоким уровнем детализации.

Наиболее активно развивается сейчас SLS-технология – метод послойного селективного лазерного плавления металлических порошков, который дает возможность безотходного изготовления деталей или заготовок непосредственно по данным из 3D CAD-систем практически любой сложности из широкого спектра металлов.

Принцип работы этой технологии заключается в выборочном плавлении тонкого слоя металлического порошка лучом лазера в соответствии с геометрией сечения детали, соответствующей каждому слою порошка. Селективное лазерное спекание изначально появилось, как усовершенствованный метод отверждения жидкого фотополимера. Здесь строительным (модельным) материалом являются сыпучие, порошкообразные материалы, а лазер является не источником света, как в SLA-машинах, а источником тепла, посредством которого производится сплавление частичек порошка. В качестве модельных материалов используется большое количество как полимерных, так и металлических порошков. Современные SLS-принтеры способны работать с керамической глиной, металлическим порошком, цементом и сложными полимерами.

Самыми дешевыми по-прежнему остаются FDM-принтеры – устройства, создающие трехмерные объекты путем послойного наплавления филамента (технология "струйной печати"). Эта технология предполагает нанесение модельного материала или связующего состава

с помощью струйных головок. Наиболее распространенными принтерами данного типа остаются аппараты, печатающие расплавленной пластиковой нитью. Они могут оснащаться одной или несколькими печатными головками, внутри которых находится нагревательный элемент. Большинство аддитивных принтеров, печатающих пластиковой нитью, способны создавать только одноцветные фигуры, однако в последнее время на рынке трехмерной печати появились машины, использующие одновременно несколько видов филамента. Данное новшество позволяет создать цветные объекты.

Они позволяют "выращивать" непосредственно литейные формы, т. е. "негатив" детали, и исключить стадии изготовления формовочной оснастки – мастер-модели и литейной модели. Компания ExOne (и ее дочернее предприятие ProMetal GmbH) выпускает машины типа S-Max, которые позиционируются не как "прототипирующие машины" – работающие для получения образца модели, а как вполне "рядовое" технологическое промышленное оборудование, устанавливаемое в общей технологической цепи производства не только опытной, но и серийной продукции.

Филамент в трёхмерной печати — расходный материал, используемый для печати на 3D-принтере. Представляет собой пластмассовую нить сечением 1,75 или 3 мм.

Мастер-модель - это изготовленная вручную или на станке первичная модель, которая является прототипом будущего объекта для отлива его копий при помощи разных технологий.

Литейная модель — модель для образования в литейной форме отпечатка, соответствующего конфигурации и размерам отливки.

Практически все автомобильные компании мира обзавелись такими машинами. С их помощью стало возможным не в разы, а на порядок сократить время прохождения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) по критически важным для автостроителей позициям – литейным деталям: блоки и головки цилиндров двигателей, мосты и коробки передач, деталям, на изготовление которых в традиционном опытном производстве тратились месяцы, а с учетом экспериментальной доводки и подготовки производства – многие месяцы. Теперь конструктор может увидеть свой новый двигатель на испытательном стенде не через полгода, а через две недели после завершения технического проекта.

Основной принцип технологии аддитивного производства заключается в том, что модель первоначально генерируется с использованием системы трехмерного автоматизированного проектирования (3D САПР, 3D CAD — Computer-Aided Design), а изделие изготавливается непосредственно, без необходимости планирования процесса. Хотя в реальности всё не так просто, аддитивное производство значительно упрощает процесс производства сложных трехмерных объектов прямо по данным САПР.

Другие (традиционные) производственные процессы требуют тщательного и детального анализа геометрической формы и размеров детали, чтобы определить порядок обработки поверхностей, выбор инструментов и процессов технологической цепочки, потребность в дополнительной оснастке для финишной обработки изделия.

Аддитивному производству нужны только некоторые основные данные о размерах, некоторое знание о принципах работы машин аддитивного производства и свойствах материалов, выбранных для данного изделия.

Ключом к пониманию аддитивного производства является принцип изготовления изделия — послойное добавление материала, при этом каждый слой представляет собой тонкий поперечный срез изделия, информация обо всех параметрах которого содержится в исходных данных САПР. Очевидно, что на физическом уровне каждый слой должен иметь конечную толщину, поэтому получающиеся в итоге изделия будут приближением к исходной виртуальной модели.

Чем тоньше каждый слой, тем ближе конечная деталь к оригиналу. Все коммерциализированные машины аддитивного производства используют послойный подход и отличаются друг от друга только используемыми материалами, методами создания слоев и соединения

слоев друг с другом. В соответствии с этими различиями определяется точность соответствия конечного изделия заданной модели и его физико-механические свойства. В соответствии с ними также определяют время изготовления детали, необходимость финишной обработки, размер машины аддитивного производства, общую стоимость машины и всего процесса.

Номинальная толщина слоя для большинства машин составляет около 0,1 мм. Тем не менее следует отметить, что это всего лишь правило. Например, толщина слоя для некоторых машин выдавливания (экструзией) материала составляет 0,254 мм, тогда как толщина слоев от 0,05 до 0,1 мм обычно используется для процесса фотополимеризации. При построении небольших деталей сложной формы, которые используются для литья по выплавляемым моделям с применением технологии разбрызгивания материала, применяются слои толщиной 0,01 мм. Многие технологии имеют потенциал для изменения толщины слоя. Полагают, что изделия с более толстыми слоями быстрее строить, но при этом страдает точность изготовления. Это не становится проблемой для применения, в котором важнее быстрое изготовление изделий.

Таким образом, аддитивное производство — это процесс объединения материала для создания объекта из данных 3D модели, как правило, слой за слоем, в отличие от традиционных вычитающих технологий. В данном определении следует выделить два ключевых момента, являющихся основополагающими для дальнейшего понимания материала.

Во-первых, следует отметить, что в определении указано «как правило, слой за слоем». Данная формулировка указывает на то, что даже сейчас у специалистов по стандартизации нет полной уверенности в том, что аддитивные технологии — это послойное выращивание или же послойное построение объекта.

Рассмотрим процесс восстановления поверхности шара с лункой сферической формы. Для заполнения данной лунки материалом, элемент, подающий материал, должен быть приведен по нормали к участку восстанавливаемой поверхности шара. Тем не менее нормаль для данного участка может не совпадать с глобальной вертикальной осью в пространстве, а быть, например, под углом 25° к данной оси.

В данном случае вести речь о послойном построении сложно, поскольку если смотреть снизу вверх, то наносимые слои будут пересекаться. Также существуют примеры того, как происходит построение деталей не послойно, а посредством перекрытия слоев: сначала нижний, а затем верхний слой, после чего снова нижний и верхний.

Во-вторых, следует отметить, что зачастую используются так называемые «гибридные машины». К группе «гибридных» следует отнести оборудование, которое сочетает в себе как аддитивные технологии, так и субтрактивные методы, в частности фрезерование. Под фрезерованием следует понимать процесс удаления лишнего материала заготовки посредством рабочего инструмента — фрезы. Фреза в некотором роде похожа на сверло для дрели. Вращаясь с большой скоростью и соприкасаясь режущей стороной с внешними поверхностями заготовки, фреза срезает какое-то количество, какой-то определенный слой лишнего материала.

Таким образом, гибридные машины содержат в себе два вида технологий, которые позволяют сначала выращивать деталь, а затем обрабатывать ее поверхности. Например, данной обработке должны подвергаться важные участки детали, такие как места соединений с другими деталями или же ответственные поверхности с требуемым высоким качеством обработки. Идея использования

гибридных машин активно поддерживается и развивается. В частности, существует комплексное оборудование, позволяющее создавать и обрабатывать крупные детали. На данный момент известно о том, что ведутся разработки по созданию гибридных систем с длиной порядка 6 м.

Конструкция данной «гибридной» машины подразумевает выделение двух отдельных участков — одного для послойного выращивания, а второго для фрезерной постобработки.

По этой причине, говоря об аддитивном производстве на современном этапе его развития, следует понимать не только процесс выращивания объекта слой за слоем, но и возможность осуществления параллельного процесса механообработки отдельных слоев.

Другой момент, связанный с определением аддитивного производства, касается фразы «в отличие от традиционных вычитающих технологий или формообразующих процессов». Даная формулировка означает, что аддитивное производство изначально противопоставляется классическим вычитающим технологиям. В частности, обработка фрезерованием является примером вычитающих технологий, поскольку процесс подразумевает удаление лишнего материала. 3D Печать противопоставляется формообразующим процессам, которые подразумевают наличие некой первоначальной формы (оснастки), использование которой совместно с приложением к заготовке различных нагрузок позволяет изготовить детали со сложной геометрией. К таким технологиям можно отнести различные виды штамповки, а также различные виды литья.

Рассматриваемая нами технология заключается прежде всего в использовании аддитивных процессов, т. е. укладке тем или иным способом (добавление) материала слой за слоем. Термин «аддитивное производство» (от англ. additive — добавлять) очень хорошо представляет данный процесс, однако есть достаточно много синонимов.

В мире чаще всего используется термин «3D печать» (3D printing). Данный термин получил широкое распространение, поскольку легко воспринимается и способен в общих чертах описать сам процесс создания объекта. Можно представить, как, имея обычный лазерный принтер, можно распечатать несколько листов бумаги формата А4.

Наложив данные распечатанные объекты друг на друга, можно получить стопку бумаги — пространственный 3D объект. Именно отсюда пошло такое широкое распространение термина «3D печать». Можно встретить названия «послойное выращивание», «послойная наплавка», «послойное лазерное спекание». Все они относятся к аддитивным технологиям.

Рассмотрим другие термины, которые были использованы для обозначения этой технологии, чтобы лучше объяснить ее общую цель и преимущества для разработки и изготовления продукции.

Термин «автоматизированное изготовление» (Autofab — Automated Fabrication) сделал популярным Маршал Бернс в своей книге с таким же названием, которая была одним из первых учебников, описывающих эту технологию, в начале 1990-х гг. Основное внимание в ней уделено использованию автоматизации в производстве продукции, что подразумевает упрощение производства в целом и исключение из производственного процесса ручного труда. Компьютеры и микроконтроллеры используются для управления исполнительными механизмами и мониторинга за системными переменными. Данный термин также может быть использован для описания других форм обрабатывающих центров с числовым программным управлением (ЧПУ), поскольку отсутствует прямое указание на число изготовленных деталей или количество необходимых для этого стадий процесса, хотя Бернс в первую очередь сосредоточился на технологиях, описанных в данной книге. Некоторые ключевые технологии были опущены, т. к. они возникали после написания книги.

Следует отметить, что описываемая технология позволяет изготавливать изделия сложной геометрической формы. Иногда главным преимуществом этой технологии является принцип «за сложность платить не нужно» (complexity for free), т. е. для машины аддитивного производства не имеет значения, какова сложность формы и конструкции данного изделия. Изготовление простого куба или цилиндра занимает практически столько же времени и состоит из такого же количества операций машины, как и производство сложного анатомического объекта такого же объема. Следовательно, «бесплатно» означает независимость процесса производства от сложности формы изделия. Этот факт кардинально отличает аддитивное производство от большинства обычных производственных процессов, количество которых существенно увеличивается по мере роста сложности геометрической формы детали.

Термины «стереолитография» и «трехмерная печать» изначально введены при описании определенных машин. Термин «стереолитография» (SL — stereolithography) был использован американской компании 3D systems, а «трехмерная печать» (3DP) широко используется исследователями в Массачусетском технологическом институте [1], которые изобрели технологию на основе струйной печати. Оба термина указывают на участие в производстве двухмерных процессов (литографии и печати) и расширение их в третье измерение. Поскольку большинство людей хорошо знакомы с технологией печати, идея ее использования для изготовления физического трехмерного объекта имеет смысл. Многие считают, что термин «трехмерная печать» станет наиболее часто используемым для обозначения технологий аддитивного производства. Недавний рост интереса СМИ к технологии это доказал, поэтому для широкой публики более узнаваем термин «трехмерная печать», чем любой другой.

Стереолитография идеально подходила для данных целей, поскольку позволяла создавать наглядные образцы. Данные макеты нельзя было использовать функционально, в частности, из-за хрупкости используемых отвержденных фотополимеров. Однако они давали представление об общей конструкции и геометрии проектируемого изделия.

На последующих этапах развития аддитивных технологий начали появляться другие методы 3D печати. В частности, появилась технология экструзионной печати (Fused Deposition Modeling), получившая наибольшее признание. Данная технология позволила использовать 3D печать для целей создания вспомогательной оснастки, кронштейнов, шестеренок и других деталей, которые работают без больших нагрузок.

Появившиеся новые технологии 3D печати позволяют выращивать объекты не только из фотополимеров, но и с помощью металлических сплавов, таких как сталь, алюминий, титан, или же материалов армированных непрерывным углеволокном. Использование данных конструкционных материалов позволяет создавать не только прототипы, но и полнофункциональные образцы, способные выполнять некую работу.

Таким образом, если раньше можно было ставить знак равенства между аддитивными технологиями и быстрым прототипированием, то сейчас аддитивные технологии могут применяться как для быстрого создания макетов, так и для изготовления полнофункциональных образцов и готовых изделий [3]. При этом аддитивное производство противопоставляется традиционным подходам по причине отсутствия вначале как оснастки, так и первоначальной заготовки. 3D Печать основывается на добавлении материала, а не на изменении формы и размеров первоначальной заготовки. Так, вначале существует только пустая платформа 3D принтера, на которой впоследствии слой за слоем появляется новое изделие.

Применение изделий, полученных по технологии аддитивного производства

Первоначально аддитивное производство применялось только для создания презентационных моделей изделий во время их разработки. Известно, что модели гораздо нагляднее и полезнее для оценки проекта, чем чертежи и визуализация, поскольку помогают в полной мере понять намерения проектировщика, представляющего концепцию проекта. Рисованные эскизы, конечно, создавать быстрее и проще, однако для изготовления модели требуется полностью проверить все проектные расчеты.

Помимо изготовления исходных моделей, аддитивное производство в течение определенного времени развивалось в направлении улучшения качества материалов, повышения точности изготовления и общего качества производства. Модели нашли применение в качестве источника уточняющей информации по принципу 3F (Form, Fit, Function) — формы, пригодности к сборке и функционирования изделия. Начальные модели были использованы для оценки формы и общей цели конструкции (форма) в полной мере. Повышение точности изготовления в процессе означало, что детали изготавливались с допусками, необходимыми для целей сборки (пригодность к монтажу).

Улучшение физико-механических характеристик означало, что деталь правильно обработана, поэтому ее можно оценивать в соответствии с ее конечным функциональным назначением.

Сказать, что аддитивное производство оказалось полезно только для создания моделей, было бы неправильно и стало бы недооценкой технологии. В сочетании с другими методами в технологических цепочках, аддитивное производство может быть использовано для значительного сокращения времени разработки продукта и затрат. Совсем недавно некоторые из этих технологий были усовершенствованы до такого уровня, что на выходе сразу можно получить конечный продукт.

Это объясняет, почему терминология существенно изменилась от быстрого прототипирования до аддитивного производства. Кроме того, использование мощных лазеров привело к тому, что изделия можно сразу изготавливать из разных металлов, что еще больше расширяет область применения аддитивного производства.

Превосходство аддитивного производства над традиционными технологиями получения изделий

Многие специалисты считают технологию аддитивного производства революцией в разработке и производстве изделий. Некоторые пошли дальше, утверждая, что производство, как мы его знаем сегодня, перестанет существовать, если будем развивать аддитивное производство до его логического завершения, и в настоящий момент мы переживаем новую промышленную революцию. Аддитивное производство часто называют одной из самых передовых технологий, которые изменяют способ проектирования и производства изделий.

Основное преимущество аддитивного производства заключается в возможности быстро получить готовое изделие. Преимущество в скорости относится не только ко времени, необходимому на создание деталей. Форсирование всего процесса создания продукта возможно за счет повсеместного использования компьютеров.

Поскольку в технологии применяется 3D САПР в качестве отправной точки и передача проектной документации аддитивного производства происходит беспрепятственно, не стоит беспокоиться по поводу преобразования данных или интерпретации цели проектирования.

Если 3D САПР работает по принципу «получаешь то, что видишь» (WYSIWYG — What You See Is What You Get), то аддитивное производство работает по принципу «строишь то, что видишь» (WYSIWYB — What You See Is What You Build).

Неразрывность и целостность всего процесса может рассматриваться с точки зрения сокращения технологических операций. Независимо от сложности деталей, их изготовление внутри машины аддитивного производства обычно проводят в одну стадию. В большинстве традиционных производственных процессов потребовалось бы несколько этапов и итераций. Чем сложнее разрабатываемый дизайн (конструкция) изделия, тем больше увеличивается количество этапов для его производства. Даже относительно простое изменение конструкции может привести к значительному увеличению времени изготовления обычными методами. Поэтому аддитивное производство можно рассматривать как метод, при котором очень эффективно прогнозировать временные затраты на изготовление изделия независимо от того, какие изменения могут быть введены на первых этапах разработки изделия.

При использовании аддитивного производства можно существенно снизить количество необходимых процессов и ресурсов.

При обычных условиях производства даже опытному мастеру для изготовления прототипа в соответствии с набором чертежей САПР потребуется работать в несколько этапов. Это объясняется тем, что ему придется пользоваться различными методами обработки, начиная с ручной резьбы, отливки, штамповки и заканчивая применением станков с ЧПУ. Ручная механическая обработка и подобные операции утомительны, трудны и не лишены ошибок. Отливка — грязный процесс, для него требуется изготовление форм. Работа на станках ЧПУ требует тщательного планирования и последовательного подхода, кроме того, необходим монтаж оснастки еще до выкачивания детали. Конечно, изначально предполагается, что мастер владеет всеми этими технологиями и у него под рукой находятся необходимые для изготовления детали инструменты. Аддитивное производство можно использовать для отказа или хотя бы снижения трудоемкости многих этапов этих многоступенчатых процессов. С

добавлением некоторых вспомогательных технологий, таких как силикон-каучуковое литье, сверление, полировка, шлифование, вполне возможно изготавливать широкий спектр различных деталей с различными характеристиками.

Одним из главных достоинств аддитивного производства является возможность кастомизации, или персонализации изделий. Для понимания того, что же такое кастомизация, рассмотрим следующий пример.

В машиностроении применяется такая деталь, как кронштейн. Если возникает необходимость создания нескольких кронштейнов, которые отличаются друг от друга, то стоимость создания одной такой детали будет значительной. Связано это с тем, что перед началом изготовления каждого из них необходимо изготовить соответствующую оснастку для закрепления исходной болванки на оборудовании. Также для каждой конфигурации необходимо написать программу обработки. Данный G-код должен быть написан на основе изготавливаемой конструкции и возможностей используемого станка с ЧПУ.

Все перечисленные этапы должны быть выполнены для каждой конструкции кронштейнов. Если же применяется аддитивное производство, то изменению подлежит исключительно 3D модель детали в программе компьютерного моделирования (Computer Aided Design (CAD) Systems).

Измененная CAD-модель в дальнейшем просто отправляется на печать, и оборудование само изготавливает изделие с требуемой конфигурацией. В данном случае нет необходимости создавать оснастку для закрепления обрабатываемого изделия.

Возможность более легкого выпуска кастомизированных изделий позволило аддитивному производству найти свое применение в медицинской отрасли. В тех ситуациях, когда требуется изготовить имплантат, протез или, например, ушной аппарат, аддитивные технологии являются тем инструментом, который позволяет изготовить разные изделия для разных людей. До недавнего времени использовали стандартизированные протезы с определенными типоразмерами.

Однако заранее заданный размер и общая конфигурация могут не подойти конкретному человеку. Аддитивное производство позволяет изготовить протез под конкретного пациента с меньшими затратами времени и средств. Кастомизация и персонализация изделий характерна не только для медицины, но и для других отраслей. В действительности это общемировой тренд, поддерживаемый всеми компаниями.

Еще одним достоинством аддитивного производства является снижение массы детали, достигаемое благодаря возможности изготовления сложных форм. Возможным является изготовление изделий с разной толщиной стенок, причем толщина может быть изменена как для наружных, так и для внутренних элементов детали. Также существует возможность создания внутренних каналов и полостей, которые в принципе невозможно изготовить с помощью традиционных технологий. Так, например, при помощи фрезерования или же сверления не удастся создать внутренний спиралеобразный канал.

Помимо этого, аддитивные технологии позволяют использовать ячеистые структуры, или «сетки» (lattice структуре). Данные структуры позволяют значительно сократить общую массу детали, не снижая прочностные характеристики изделия. Связано это с тем, что данная структура обладает достаточной прочностью и жесткостью для применения в машиностроении и других отраслях. Таким образом, создание сложных геометрических форм и пространственных структур позволяет использовать только нужное количество материала и в нужных участках изделия.

В результате данного подхода аддитивные технологии позволяют получать более легкие изделия, которые всё так же удовлетворяют требованиям, предъявляемым с учетом условий их работы.

Следующее достоинство технологии заключается в возможности снижения общего числа деталей. Для примера: в инженеринговом центре СПбПУ были выполнены работы по снижению числа деталей изделия с 47 до 7 шт., а также с 52 до 8 деталей. Подобное сокра-

щение во многом достигается за счет возможности создания изделия целиком методами аддитивного производства. В первую очередь такое сокращение приводит к снижению трудоемкости изготовления и сборки изделия.

Во-вторых, меньшее количество деталей приводит к снижению вероятности возникновения брака. Ну и конечно же, сокращение количества деталей приводит к уменьшению номенклатуры компонентов для сборки изделия и, как следствие, к уменьшению числа деталей, хранящихся на складе. В результате подобной оптимизации, с учетом быстроты процесса запуска аддитивного производства, происходит значительное снижение трудоемкости изготовления изделий, что является сильным преимуществом аддитивного производства.

Последним достоинством аддитивного производства является экологичность самого процесса. Если в традиционных технологиях при фрезеровании требуется исходный кусок материала (заготовка), из которого убирается всё лишнее, то в аддитивных технологиях, наоборот, используется только то количество материала, которое в действительности необходимо. В случаях, когда построение детали не требует вспомогательных поддержек, коэффициент использования материала (КИМ) может приближаться к 100 %.

Однако даже в тех случаях, когда используются поддержки, коэффициент использования материала значительно выше, чем в случаях применения традиционных подходов. Если из бруска металла удалять лишний материал посредством фрезерной обработки, то финальный объем детали и количество оставшегося материала может составить 5 % от первоначального объема заготовки. При аддитивном производстве процент может достигать до 100 % и обычно не опускается ниже 50 %.

Таким образом, производственные процессы, включающие технологии аддитивного производства, намного чище, более рациональны и универсальны, чем традиционные технологии машиностроения.

Недостатки аддитивного производства

Следует понимать, что аддитивное производство — это такая же технология, как и другие производственные технологии. Это значит, что, как и другие технологии, аддитивный подход также имеет недостатки и ограничения. Следует их рассмотреть, чтобы иметь представление о правильном применении технологии и понимать, когда ее использование является действительно выгодным.

Первый недостаток аддитивного производства связан с высокой стоимостью. Здесь следует понимать, что именно подразумевается под высокой стоимостью. Речь в первую очередь будет идти о возможности применения 3D печати для серийного производства изделий.

Если речь идет о серии из 100 000 одинаковых металлических изделий, то с помощью аддитивных технологий изготовить все 100 000 изделий будет всегда дороже. Именно поэтому аддитивные технологии никогда не смогут вытеснить классические традиционные вычитающие технологии с рынка. Вычитающие и формообразующие технологии всегда будут находить и занимать свое место. Другой вопрос — сколько в процентах от общего объема работ смогут заместить аддитивные технологии. По разным оценкам, данное значение может составить 50 % и выше. Когда же речь идет об изготовлении первых нескольких образцов, аддитивные технологии всегда позволяют сократить общую стоимость. Как упоминалось ранее, для изготовления одного металлического образца необходимо изготовить оснастку и написать программу. Если же необходимо изготовить 2 или 10 одинаковых изделий, то стоимость для разных видов аддитивных технологий может совпадать с традиционными.

Следующим недостатком является качество поверхности. Напечатанные детали обладают высокой шероховатостью, а также на поверхности могут присутствовать различные неровности, обусловленные в первую очередь толщиной слоя. Если печать происходит слой за слоем, то у каждого слоя есть некое значение толщины, а также общие границы детали.

На границе в простом примере при экструзионной печати будет наблюдаться шероховатость, определяемая половиной диаметра нити, используемой для печати. Если же речь

идет о верхней поверхности, то здесь всё во многом зависит от вида применяемой аддитивной технологии. Так, для экструзионной печати поверхность достаточно шероховата. При печати металлом, качество поверхности может уменьшаться до шероховатости Ra от 20 до 30. Меньше она не может быть из-за того, что порошок, применяемый для печати, обладает размерами частиц от 40 до 80 мкм (в среднем 60 мкм).

Существует фиксированный список материалов, применяемых для 3D печати. Расширение данного списка является одним из основных требований со стороны заказчиков к рынку аддитивных технологий. И это одно из сильнейших направлений развития. Увеличение числа материалов является одним из главных направлений развития аддитивных технологий, т. к. помимо классических материалов, индустрия нуждается в новых материалах и других сплавах. Существует печать экструзионным методом с использованием ABS-пластика, PLA-пластика, PETG-пластика и других полимеров, но пользователь запрашивает пластик, который дает меньшую усадку и при этом имеет характеристики, как ABS-пластик.

Следующий недостаток аддитивных технологий — ограничение размеров изготавливаемых деталей объемом рабочей камеры 3D принтера. Если вести речь о фрезерной обработке, то станки могут быть, условно говоря, бесконечной длины. В аддитивных технологиях фактически до последнего времени большого рабочего пространства не было.

3D Принтер всегда подразумевает наличие рабочей камеры ограниченного размера, который начинается от 10Ч10Ч10 см, если говорить о стереолитографии, и заканчивается камерами 500Ч500Ч500 см, характерными для металлической печати. Также известны принтеры для экструзионной печати с размерами камеры 2Ч2 м.

Следует отметить, что появились 3D принтеры, которые могут печатать архитектурные сооружения. Они способны изготовить небольшие дома или же блоки, из которых в дальнейшем можно собрать сооружение. Отличительная особенность данных принтеров заключается в отсутствии закрытых рабочих камер. Они печатают в незакрытой камере с помощью руки-манипулятора от таких производителей, как Kuka, Fanuc, ABB и др. Когда имеется некое позиционирующее устройство и оно свободно перемещается, тогда данные манипуляторы способны осуществить работу, схожую с работой 3D принтеров.

Тем не менее даже у таких систем область построения ограничена тем, куда рука-манипулятор может дотянуться. Данная область в среднем составляет не более 6 м.

Мы перечислили все недостатки, которые на данный момент присущи аддитивным технологиям. Следует сразу отметить, что по каждому недостатку выполняются исследования и разработки, направленные на преодоление данных ограничений. Так стоимость постепенно снижается за счет увеличения числа пользователей, что приводит к удешевлению расходных материалов. Качество поверхности улучшается благодаря изменению расходных материалов, в частности благодаря уменьшению диаметра частиц порошков, применяемых для печати.

Также качество поверхности значительно улучшается за счет применения гибридных подходов. Самые известные гибридные установки — это DMG Mori, Lasertech 65. Список материалов всё время растёт и дополняется. Для увеличения области печати разрабатываются новые конструкции аддитивного оборудования. Так, например, совсем недавно было анонсировано появление машины с бесконечной областью печати. Это означает, что используется устройство перемещения, или транспортер, позволяющий 3D принтеру работать непрерывно вдоль некоторой области построения. В данном случае нет необходимости в закрытой рабочей камере.

2. Основы процесса компьютерного моделирования в системах автоматизированного проектирования

Аддитивное производство включает в себя ряд этапов для перехода от виртуального описания в САПР к изготовлению изделий на физическом уровне. Степень применения аддитивного производства изменяется в зависимости от конкретного изделия. В процессе изготовления небольших, относительно простых изделий аддитивное производство используется лишь для создания визуализационных моделей, в то время как в процессе изготовления более крупных, более сложных объектов, для проектирования которых необходима объемная проектная документация, используется аддитивное производство с многочисленными этапами и итерациями.

Кроме того, на ранних этапах процесса проектирования изделия могут проектироваться только заготовки, в этом случае прибегают к аддитивному производству из-за скорости, с которой они могут быть изготовлены. На более поздних стадиях процесса, изделиям требуется финишная обработка и доводка (в т. ч. шлифование, подготовка поверхности и покраска) перед использованием, здесь аддитивное производство полезно для создания сложных форм без необходимости подбора специальных инструментов.

Применение аддитивного производства вместо традиционных процессов изготовления изделий, таких как механическая обработка и литье под давлением, позволяет разработчикам игнорировать некоторые ограничения традиционного производства. Тем не менее традиционное производство остается той отправной точкой, которая определяет массовость производства. Таким образом, мы должны также разобраться, как традиционные технологии можно интегрировать с аддитивным производством. Данный подход может быть особенно актуальным для применения металлов в аддитивном производстве.

Ведя речь об аддитивном производстве, желательно представлять себе не конкретно процесс изготовления некоего изделия на 3D принтере, а всю цепочку создания объекта: проектирование 3D модели, слайсинг, печать на принтере и постобработка. Рассмотрим принципиальную схему аддитивного производства. Сначала должна быть CAD-модель печатаемого объекта или его 3D модель. Для осуществления печати, данная виртуальная модель передается на 3D принтер в формате STL/AMF. Уже на данном этапе аддитивные технологии отличаются от традиционных подходов. При передаче какой-то модели на станок с числовым программным управлением (ЧПУ), необходимо написать программу, описывающую движение режущего инструмента и параметры, при которых будет сниматься лишний материал.

Подобная программа может быть получена в полуавтоматическом режиме или же быть полностью написана вручную инженером-технологом при помощи так называемого G-кода. При 3D печати необходимо просто загрузить или открыть модель в формате STL и нажать на кнопку «печать». Всё, что необходимо от пользователя, — задать некоторые настройки печати, такие как скорость, толщина слоя печати и т. д. Для металлической печати нужно установить скорость движения лазера или температуру нагрева. Таким образом, с точки зрения трудоемкости подготовки производства аддитивные технологии значительно превосходят традиционные производственные технологии.

После получения 3D модели и запуска процесса печати остается только ждать, когда изделие будет готово. После получения напечатанного объекта наступает этап производства, при котором аддитивные технологии значительно проигрывают традиционным подходам.

Таким этапом является постобработка изделия. В случае с аддитивными технологиями необходимость осуществления постобработки связана с наличием различных неточностей, таких как высокая шероховатость поверхности или же наличие лишнего материала, используемого в процессе печати в качестве так называемой «поддержки».

В случае, когда деталь имеет простую геометрическую форму, без каких-либо пустот или же нависающих элементов, при 3D печати нет необходимости использовать различные вспомогательные «поддержки». При сложной геометрии, использование вспомогательных

построений является необходимым условием создания качественной детали. При завершении печати необходимость в подобных «поддержках» отсутствует, и их необходимо удалить. Данный этап называется постобработкой.

Для традиционных вычитающих технологий этап постобработки отсутствует, поскольку сами технологии изначально связаны с удалением лишнего материала [3].

Аддитивное производство включает следующие восемь этапов:

- концептуализацию изделия и его проектирование в среде САПР;
- преобразование данных САПР в STL- или AMF-формат;
- передачу STL- или AMF-файлов на машины аддитивного производства и их обработку;
- настройка машины;
- построение изделия;
- извлечение и очистку изделия;
- постобработку изделия;
- применение.

Вышеупомянутая последовательность этапов, как правило, соответствует всем технологиям аддитивного производства. Однако существуют некоторые исключения, зависящие от конкретной технологии и изделия. Некоторые шаги могут быть полностью внедрены в производстве на одних машинах и исключены из технологической цепочки на других. Есть другие способы разделения этой последовательности процесса в зависимости от вашей точки зрения и знания оборудования.

Этап 1. Концептуализации изделия и его проектирование в среде САПР

Изготовление любых деталей с использованием аддитивного производства должно начинаться с создания виртуальной модели с помощью специального программного обеспечения, которое полностью описывает геометрическую форму и размеры внешней поверхности изделия. Создание модели может включать использование практически любого профессионального программного обеспечения САПР для твердотельного моделирования, но в любом случае на выходе нужно получить трехмерное представление твердого тела или его поверхности. Оборудование для обратного инжиниринга (например, лазерного и оптического сканирования) также может потребоваться для создания этого представления.

Первый этап в любом процессе разработки изделия заключается в поиске концепции того, как оно будет выглядеть и функционировать. Концептуализация может принимать различные формы, от текстовых описаний и описательных эскизов до представления готовых моделей. При использовании аддитивного производства описание изделия нужно представить в цифровом виде, чтобы изготовить физическую модель. Может получиться так, что технология аддитивного производства будет использоваться для создания прототипа, а не для построения конечного продукта, но в любом случае есть много этапов в процессе разработки продукции, на которых требуются цифровые модели.

Технология аддитивного производства не смогла бы существовать без программного обеспечения 3D САПР. Только возможность представлять твердые объекты в цифровом виде на компьютерах позволила разработать технологию, способную воспроизвести объекты на физическом уровне. Первоначально целью работы была механическая обработка на станках ЧПУ, именно поэтому аддитивное производство можно охарактеризовать как прямое или корректирующее компьютерное проектирование и моделирование (Computer Aided Design) для автоматизированного производства (Computer Aided Manufacturing (CAD/CAM или САПР/CAM)). В отличие от большинства других технологий, где применяется CAD/CAM, при аддитивном производстве проектировщик практически не вмешивается в этапы производственного процесса.

Таким образом, общий процесс разработки и изготовления изделий в аддитивном производстве должен начинаться с организации информации в среде 3D САПР. Существует множество способов создания исходных данных о трехмерном объекте. Для описания моде-

ли можно применить следующие способы: инженер-проектировщик может создать его с нуля с использованием пользовательского интерфейса, описание можно также сгенерировать с помощью программного обеспечения в рамках алгоритма автоматизированной оптимизации путем 3D сканирования существующего на физическом уровне изделия или скомбинировать эти способы. Большинство видов программного обеспечения 3D САПР — это системы для твердотельного моделирования с компонентами моделирования поверхностей. Модели твердых объектов часто строятся путем объединения поверхностей или добавления слоев разной толщины на поверхность. В прошлом в среде программного обеспечения 3D САПР для моделирования было затруднительно создать твердотельную модель с полностью замкнутой поверхностью, поэтому случайному наблюдателю могло показаться, что поверхность этих моделей замкнута, но на самом деле с математической точки зрения это было не так. Подобные модели могут привести к непредсказуемым результатам при производстве на машине аддитивного производства. В каждой технологии аддитивного производства найдены свои решения проблемы закрытия разрывов в поверхностях.

Большинство современных инструментов твердотельного моделирования в среде САПР способно создавать файлы без разрывов в поверхности (например, герметичные объекты), в результате чего можно получить геометрически однозначное представление изделия. Большинство САПР обрабатывает данные о поверхностях, выступая в роли инструментов проектирования, которые используются для твердотельных моделей, и это позволяет сохранить целостность данных о твердом объекте. При условии соответствия машине аддитивного производства, любая модель, разработанная в среде САПР, может быть выполнена с использованием технологии аддитивного производства без особых проблем. Тем не менее всё еще остаются некоторые старые или плохо написанные программы 3D САПР, поэтому модели твердых объектов, выполненные в их среде, не будут иметь замкнутой поверхности, что приведет к производству некачественных изделий на машинах аддитивного производства. Проблема часто обнаруживается только после преобразования моделей САПР в формат STL для построения с использованием технологии аддитивного производства.

Этап 2. Преобразование данных САПР в STL- или AMF-форматы

Почти каждая машина аддитивного производства принимает формат STL (Stereo Lithography) файлов, которые стали стандартом де-факто, и почти каждый САПР может выводить такие файлы в этом формате. В таких файлах описаны внешние замкнутые поверхности изначальной САПР модели, они формируют основу для расчета слоев.

Почти каждая технология аддитивного производства использует формат STL-файлов. Термин «STL» является производным от названия технологии стереолитографии (Stereolithography), которая была первым коммерциализированным проектом компании 3D System в 1990-м г. STL — это просто способ описания модели, разработанной в среде САПР, в терминах одной геометрии. В этом формате из файлов САПР удаляются любые проектные данные, история моделирования и другая информация, а поверхности модели аппроксимируются серией треугольных граней.

Основная задача проектировщика — получить конвертированную геометрию без искажений. Для этого важно правильно выбрать размер треугольных граней, с помощью которых будут аппроксимированы поверхности САПР-модели. Минимальный размер треугольников можно задать в большинстве САПР. Размер треугольника на практике рассчитывается по принципу минимального расстояния между плоскостью самого треугольника и поверхностью, которую он должен представлять. Основная задача в данном случае заключается в том, что минимальный зазор между треугольником и реальной поверхностью должен быть меньше, чем разрешение машины аддитивного производства.

Процесс преобразования в формат STL автоматизирован в большинстве САПР, но есть вероятность ошибок, возникающих во время данного этапа, поэтому было разработано множество программных средств для выявления и исправления таких ошибок.

STL-файлы представляют собой неупорядоченный перечень данных о вершинах треугольников и векторах нормальных к поверхности.

Таким образом, STL-файл не имеет информации об элементах, цвете, материале или других свойствах изделия. Эти ограничения в STL-файлах привели к разработке нового формата AMF. Теперь он является международным стандартом, который расширяет формат STL. Использование формата AMF позволяет записать габаритные размеры, цвет, материалы и многие другие необходимые характеристики изделия. Таким образом, формат STL можно заменить на формат AMF как на более перспективный. В результате несколько крупных компаний, специализирующихся на разработке САПР, и производители аппаратного обеспечения аддитивного производства публично объявили, что они будут поддерживать формат AMF при разработке и использовании следующего поколения программного обеспечения.

Программное обеспечение, применяемое для восстановления STL-файлов, например Magics от бельгийской компаний Materialise [1], используется, когда есть проблемы с STL-файлами, которые могут нарушить правильность построения изделия. При изготовлении изделий сложной геометрической формы, человеку сложно обнаружить подобные проблемы при просмотре файлов САПР или впоследствии сгенерированных данных в формате STL. Если ошибки незначительны, то их можно даже не заметить, пока изделие не будет построено.

Поэтому такое программное обеспечение следует применять на этапе проверки, чтобы еще до начала производства гарантировать отсутствие ошибок в данных STL-файла.

Поскольку STL является описанием поверхности, соответствующие треугольники в файлах должны быть позиционированы и ориентированы правильно. Вектор нормали к плоскости треугольника должен указывать, какая сторона треугольника является внешней, а какая — внутренней. Поэтому поперечное сечение, соответствующее слоям изделия, расположенным вблизи перевернутого вектора нормали, может оказаться обратной стороной треугольника. Кроме того, из-за сложной геометрии изделия, состоящей из множества разнонаправленных поверхностей, вершины треугольников могут остаться неоцифрованными. Результатом этого станет разрыв поверхности.

Различные технологии аддитивного производства используют разные методы для решения данной проблемы. Некоторые машины могут обрабатывать данные STL таким образом, что разрывы перекрываются. Однако перекрытия разрывов не могут создать требуемую поверхность, и были случаи, когда вместо разрыва при построении изделия вводились дополнительные и нежелательные материалы.

В то время как большинство ошибок могут быть обнаружены и исправлены автоматически, иногда требуется исправление недочетов вручную, поэтому программное обеспечение должно зафиксировать проблему и указать место, где расположен перевернутый треугольник. По мере усложнения геометрии, для программного обеспечения становится затруднительным установить, является ли результат на самом деле ошибкой или частью первоначальной концепции конструкции.

Когда речь заходит об экспорте исходных CAD-файлов в STL-формат, необходимо помнить о нескольких важных моментах. В первую очередь следует стараться найти настройки данного формата.

Например, при экспорте из CATIA версии 4 или версии 5 не всегда очевидным является тот пункт меню, в котором указываются настройки STL-формата [3].

Обсудим основные настройки, на которые следует обратить внимание при настройке формата STL. Одним из ключевых параметров является максимально допустимый угол между плоскостями, в которых лежат смежные треугольники. Например, если речь идет о сфере, построенной в CAD-системе, то при экспорте в STL-формат, программа будет располагать плоскости, в которых лежат смежные треугольники, под небольшим углом друг к другу при скруглении. Управляя величиной данного угла, можно управлять точностью аппроксимации исходной геометрии.

Следующим параметром настройки формата является настройка количества треугольников. Следует напомнить, что от того, как много треугольников в сопредставлении объекта, зависит то, насколько быстро будет работать слайсер. Работа слайсера во многом основывается на анализе и чтении данных о каждом треугольнике для дальнейшего расслоения модели и заполнения каждого слоя. Когда речь идет о печати моделей размерами 200×200×200 мм, рекомендуется использование от 500 000 до 2 000 000 треугольников, но не более. Существует различие между технологиями. Например, если планируется применение SLA-печати высокодетализированной небольшой модели, то количество треугольников может быть и больше. При использовании профессиональной 3D печати, например печати из полиамида, или же использовании принтеров Stratasys Fortus, применяемое программное обеспечение позволит работать с большим количеством треугольников. Если же речь идет о компактных 3D принтерах и встроенном, бесплатном программном обеспечении, то рекомендуется использовать меньшее число треугольников.

После экспортирования САПР-модели в формат STL не следует забывать о необходимости проверки результатов экспортирования.

Для проверки рекомендуется использовать такие программные продукты, как Netfabb Studio от компании Autodesk или Magics от компании Materialise. При проведении проверки в первую очередь следует обратить внимание на наличие ошибок. Во-вторых, следует обратить внимание на корректное отображение всех граней модели. Ситуация, при которой экспортированный файл содержит целый набор неточностей и ошибок, является довольно частым явлением.

Еще одним важным моментом, на который следует обратить внимание — экспорт в бинарный формат. Если взять Word-файл и архивировать его, то он занимает меньше места на диске. Текстовое представление, или ASCII-представление для формата STL, есть бинарное, либо двоичное. При экспорте файлов следует найти опцию «сохранение» в бинарный формат [3].

Этап 3. Передача STL- или AMF-файлов на машины аддитивного производства и их обработка

В машину аддитивного производства передается STL-файл с описанием изделия. Здесь производятся некоторые общие манипуляции с файлом: исправление размеров, позиционирование и ориентация для изготовления изделия.

После создания и проверки, STL-файл загружают в машину аддитивного производства. В идеале у пользователя должна быть возможность нажать на кнопку «печать», чтобы машина сразу начала строить изделие. Однако дело обстоит совсем не так. Иногда требуется выполнить еще множество действий, необходимых для начала построения изделия.

Перед запуском процесса печати необходимо провести проверку правильности представления изделия. Программное обеспечение систем аддитивного производства обычно имеет инструмент визуализации, что позволяет пользователю просматривать и манипулировать виртуальным изображением изделия. Пользователь может изменить изделие или даже ориентацию будущего изделия, чтобы начать построение в определенной части рабочего объема машины. Довольно часто в машинах аддитивного производства строят не одно, а сразу много изделий. Это могут быть копии одного изделия (от машины требуется функция копирования) или совершенно разные изделия с разными STL-файлами. STL-Файлы можно легко масштабировать в линейном измерении. В некоторых приложениях требуется слегка изменить размеры изделия — увеличить или уменьшить по сравнению с оригиналом, чтобы учесть процесс усадки или нанесения покрытия, поэтому перед построением изделия требуется масштабирование. В других приложениях необходимо маркировать изделия тем или иным способом, даже были разработаны некоторые программные инструменты, чтобы добавить текст и простые функции для формирования данных STL для этой цели. Это можно сделать в форме выдавленных трехмерных символов. В исключительных случаях может даже потребоваться сегментация STL-файлов (например, для слишком большой детали) или

слияние нескольких STL-файлов. Следует отметить, что не все машины аддитивного производства имеют все упомянутые здесь функции, но можно найти множество программных средств для манипуляции STL-файлами, как платных, так и доступных для свободного скачивания. Они позволяют выполнить эти функции перед отправкой файла в машину.

Этап 4. Настройка машины

Перед началом послойного построения изделия машину аддитивного производства нужно правильно настроить: параметры изготовления, например предел использования материала, источник энергии, толщину слоя, тайминги и т. д.

Каждая машина аддитивного производства имеет некоторый набор функций и параметров, присущих только данной модели оборудования или процессу. Некоторые машины предназначены только для использования вполне определенных материалов, их функционал дает пользователю несколько вариантов толщины слоя или других параметров построения изделия. При работе на этих типах машин можно произвести очень ограниченные изменения настройки, следовательно, ассортимент изделий будет небольшим. Другие машины предназначены для работы с разнообразными материалами и позволяют изменять несколько параметров, чтобы оптимизировать процесс в соответствии с характером изготавливаемого изделия или ускорить процесс изготовления того же изделия, но с меньшим разрешением. Такие машины могут иметь многочисленные варианты настройки. В более сложных машинах общим местом является набор настроек по умолчанию или сохранение файлов из предыдущих загрузок и настроек, чтобы ускорить процесс настройки машины и предотвратить возможные ошибки.

Неправильно выполненная процедура настройки обычно сильно сказывается на качестве изготавливаемого изделия. В некоторых случаях оно даже оказывается неприемлемым.

В дополнение к настройке программируемых параметров, большинство машин следует подготовить к работе на физическом уровне.

Оператор должен проверить, достаточно ли материала загружается в машину, чтобы завершить построение изделия. Если машина использует порошок, его часто приходится просеивать, а затем загружать и разравнивать в машине, что также является частью процесса настройки. Если в процессах используются пластины, их нужно аккуратно вставить в машину и выровнять по отношению к ее осям.

Некоторые из этих операций подготовки машины автоматизированы в рамках запуска построения изделия, но в большинстве машин эти операции выполняются вручную оператором.

Этап 5. Построение изделия

Изготовление изделия представляет собой по большей части автоматизированный процесс, поэтому машина способна выполнять его практически без контроля оператора. Необходим только поверхностный мониторинг работы машины в отдельных случаях, чтобы не произошло ошибки, например, закончился материал для печати, отказал источник питания или программное обеспечение и т. д.

Несмотря на интеграцию компьютеров, несколько первых этапов процесса аддитивного производства имеют полуавтоматические задачи, для выполнения которых может потребоваться значительная степень ручного управления, взаимодействие с машиной и принятие решений оператором. После завершения данных этапов процесс переходит под компьютерное управление на этапе построения изделия.

Именно теперь происходит построение изделия на основе упомянутого ранее послойного синтеза. Все машины имеют аналогичную последовательность укладки слоев, регулирующую по высоте платформу или другие механизмы для распределения материала и формирования слоя в соответствии с поперечным сечением. Некоторые машины сочетают одновременное осаждение материалов и формирование слоя, в других — эти процессы выполня-

ются отдельно. До тех пор, пока не будет обнаружено ошибок во время построения, машина аддитивного производства будет повторять процесс послойного построения изделия до полного завершения.

Этап 6. Извлечение и очистка изделия

После завершения изготовления нужно извлечь изделие. Для этого иногда требуется провести некоторые манипуляции с машиной, в которую встроены блокировки безопасности, чтобы обеспечить снижение температуры или отсутствие активно движущихся частей.

Идеальный результат работы машины аддитивного производства должен быть готов к использованию с минимальной потребностью во вмешательстве оператора. Достаточно часто изделия на выходе из машины требуют значительной финишной обработки, прежде чем они будут полностью готовы к использованию. Во всех случаях изделие нужно отделить от рабочей платформы, на которой производилось построение изделия, или от избытков материала, накопившегося на этой платформе вокруг изделия. В некоторых процессах аддитивного производства, помимо основного материала, из которого происходит построение изделия, используется дополнительный материал (вспомогательный материал для опорных и поддерживающих элементов). На данном этапе вовсе не нужно точно представлять, как функционируют поддерживающие структуры, просто следует научиться правильно их использовать в процессе построения изделия. Несмотря на то что были специально разработаны процессы для производства быстровставляемых и удаляемых опор, слишком часто приходится прикладывать значительный объем ручной работы на данном этапе. При использовании металлических опор требуется электроэрозионный вырезной станок, ленточная пила и фрезервальное оборудование, чтобы отделить готовые изделия от опорной плиты и поддерживающих структур. Для аккуратного извлечения изделий из рабочего объема машины требуется определенная квалификация оператора, поскольку небрежное обращение с изделием и применение неправильной техники может привести к его повреждению. В принципе для каждого процесса аддитивного производства существуют свои требования к очистке изделия, однако есть и общие требования, которые можно применять ко всем технологиям аддитивного производства. Этап очистки также может рассматриваться в качестве начальной стадии последующей финишной обработки.

Этап 7. Постобработка изделия

После извлечения изделия из машины может потребоваться его дополнительная очистка перед использованием. На данном этапе изделия еще могут не набрать нужную прочность или в них могут остаться вспомогательные поверхности, которые должны быть удалены. Таким образом, на эти работы часто требуется время и тщательная ручная обработка опытным оператором.

Постобработка относится к стадии финишной обработки изделия (как правило, вручную) для прикладных целей. Она может включать абразивный финиш — полировку и шлифовку или нанесение покрытий. Данный этап в процессе обычно должен полностью соответствовать приложению. Некоторые приложения могут требовать только минимальной постобработки. Для других приложений необходимо очень бережное обращение с изделиями для сохранения высокой точности финишной обработки. Некоторые виды постобработки могут включать физическую или термическую обработку изделия для получения нужных свойств. Каждый процесс аддитивного производства имеет свою степень точности изготовления, поэтому может потребоваться обработка, чтобы изделие соответствовало конечным размерам. В ходе некоторых процессов производятся относительно хрупкие компоненты, которым нужна пропитка или нанесение поверхностного покрытия для упрочнения конечного изделия. Как уже говорилось, все эти операции часто выполняются вручную в большом объеме из-за сложности большинства изделий аддитивного производства. Тем не менее некоторые из задач можно решить с помощью электроинструментов, фрезерования на станках с ЧПУ и применения дополнительного оборудования, например, полировальных машин, сушки, закалки и отжига.

Когда речь заходит об экструзионной FDM-печати, следует понимать, что в качестве расходного материала обычно используется ABS, PLA, PETG и другие типы пластиков. Для данных материалов самой типовой обработкой является обработка напильником как разновидности механической постобработки. Также следует отметить, что для ABS-пластика возможно использование и химической обработки ацетоном. Это может быть так называемая «ацетоновая баня» или же непосредственное прохождение кисточкой по внешним граням изделия. Для обработки могут использоваться также пары ацетона, полученные в результате нагрева. В данном случае используется некое герметичное устройство, в котором подвешивается обрабатываемое полимерное изделие, к которому подаются пары ацетона.

Если речь идет о PLA-пластике, то также применяются средства для частичного растворения и подплавления PLA. При склейке деталей из PLA, наилучший эффект демонстрирует непосредственно нагретый PLA-пластик.

Значительно отличается от FDM-подхода SLS-печать, и, как следствие, отличаются применяемые методы постобработки. Например, при печати полиамидом, для постобработки обычно используется пескоструйная обработка, которая позволяет сглаживать данный участок.

Пескоструйный аппарат позволяет убрать слои лишнего материала, в особенности на участках с практически горизонтальной печатью. В случае со сферой это верхняя часть.

Если же речь идет о печати деталей SLS-методом из металлического сплава, то здесь можно использовать все технологии, применяемые для постобработки для других видов печати. Возможно применение как механической обработки (посредством напильника или же фрезерованием), а также различные электрохимические методы.

В качестве отдельной завершающей технологии следует отметить фотополимеризацию. Фотополимеризация, как способ постобработки, применяется исключительно для SLA- или DLP-технологий. Получаемые данными методами изделия зачастую должны подвергаться дофотополимеризации. Подразумевается процесс отверждения тех полимерных участков, которые не успели отвердеть в процессе печати. Во многом это может быть связано с необходимостью напечатать какие-то тонкие элементы, где лучше было посветить меньше, чем больше. После печати полученная деталь помещается в специальную камеру с ультрафиолетовыми лампами. В результате воздействия ультрафиолета происходит полное завершение процесса отверждения используемых фотополимеров.

Следует отметить, что при обработке больших прототипов рекомендуется изначально прибегать к обработке посредством автоматических или же полуавтоматических инструментов. Доведение качества изготавливаемой детали до высокого уровня подручным инструментом (напильниками, наждачной бумагой и т. д.) зачастую является не просто нерациональным, но и невозможным.

Этап 8. Применение изделия

В некоторых случаях детали уже могут быть готовы к использованию. В других случаях требуется дополнительная обработка перед эксплуатацией. Например, может потребоваться грунтовка и покраска для создания нужной текстуры поверхности и финишной обработки. Обработка может быть трудоемкой и длительной, если требования к конечному продукту очень высоки. Также по техническим условиям отдельные детали должны быть собраны вместе с другими механическими или электронными компонентами для формирования конечной модели или продукта.

После рассмотрения многочисленных этапов процесса аддитивного производства становится понятно, что многие машины аддитивного производства требуют тщательного технического обслуживания.

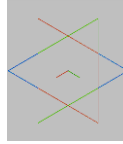
После постобработки изделия готовы к использованию. Следует отметить, что, хотя материалы для изделий аддитивного производства и других видов машиностроительного производства (например, обработки давлением и литья) могут быть аналогичными, свойства уже самих изделий аддитивного производства могут сильно отличаться от стандартной спе-

цификации. В некоторых технологиях аддитивного производства изделия изначально строят с небольшими внутренними пустотами, которые могут быть источником отказа изделия при определенном механическом воздействии. Кроме того, некоторые процессы могут привести к ухудшению качества материала во время построения или из-за неоптимального склеивания, соединения или кристаллизации. Почти в каждом случае свойства становятся анизотропными (отличие свойств в разных направлениях). Для большинства металлов, используемых в процессах аддитивного производства, быстрое охлаждение приводит к образованию различных микроструктур, которые отличаются от структуры материалов, применяемых в обычном производстве. В результате изготовленные в ходе аддитивного производства изделия ведут себя отлично от деталей, изготовленных в обычном производстве. Вновь приобретенные свойства могут быть лучше или хуже для конкретного применения. Разработчик должен учитывать эти различия и принимать их во внимание на этапе проектирования. Материалы и процессы аддитивного производства быстро совершенствуются, поэтому проектировщики должны быть в курсе последних достижений в области материаловедения и технологий производства, чтобы точно определить, как использовать аддитивное производство с наибольшей выгодой.

Вышеуказанные этапы типового процесса можно применить к каждой коммерческой технологии аддитивного производства. Различные технологии требуют разного уровня внимания к тому или иному этапу. Ниже мы рассмотрим реализацию этих различий не только в плане процессов, но также в некоторых случаях в пределах конкретной технологии.

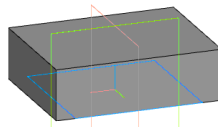
3. Создание цифровых 3D-моделей в системе автоматизированного проектирования «Компас-3D»

Для создания объемной (трехмерной) модели предмета (детали) используется документ «Деталь». С помощью меню «Файл» или кнопки-команды «Создать» на стандартной панели создается этот документ. В открывшемся окне появляется отображение трех координатных плоскостей, заданных четырехугольниками.



Курсором указывается одна из трех координатных плоскостей, потом на панели текущего состояния находится и нажимается кнопка-команда «Эскиз»  и начинается вычерчивание плоского контура соответствующей конфигурации с помощью команд панели «Геометрия». Координатную плоскость XY или XZ или YZ можно выбрать, указав ее в дереве построения модели. Кнопку-команду «Эскиз» можно найти не только на панели текущего состояния, но и в контекстном меню, которое вызывается нажатием правой кнопки мыши.

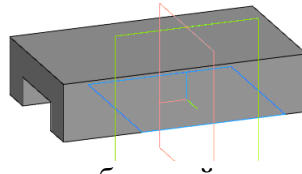
Моделирование детали начинается с воссоздания прямоугольной прямой призмы. Это, в свою очередь, требует вычерчивания прямоугольника размерами 65×50. Он явится основанием будущей модели (стиль строящихся линий – основная), и далее последующего выдавливания этого контура вверх на 20 мм.



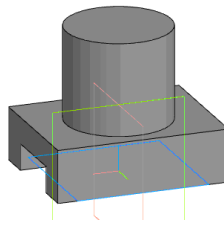
Для выполнения операции выдавливания на компактной панели документа «Деталь» находим кнопку-команду «Редактирование модели» (это первая кнопка) и в раскрывшейся инструментальной панели курсором указываем кнопку «Выдавливание» . Аналогичный результат для создания первой части будущей модели получается при вызове операции выдавливания посредством страницы «Операции» главного меню. В ней содержится не только эта операция, но и перечень всех объемных операций.



Дальнейшим этапом будет вырезание части построенной модели, создавая продольный паз прямоугольной формы размерами 26×10 мм. Для этого нужно построить очередной эскиз, то есть отрисовать на выбранной грани призмы соответствующий контур, который должен представлять замкнутую плоскую фигуру. Передвигаем курсор на левую торцевую грань призмы и, когда рядом с курсором появится значок поверхности, нажимаем левую кнопку мыши. Происходит выделение этой поверхности (окрашивается зеленым цветом), далее нажимаем кнопку «Эскиз» , и система поворачивает отмеченную поверхность, чтобы она совместилась с плоскостью экрана. Теперь на этой грани можно строить контур, в данном случае прямоугольник с размерами 26×10 мм. Чтобы выполнить вырез этой формы нужно найти на инструментальной панели кнопку «Вырезать выдавливанием»  и нажать на нее. На панели параметров указываем в поле «Расстояние» цифру, на которую должно произойти вырезание и на клавиатуре нажимаем «Enter». Происходит отображение паза в призме.

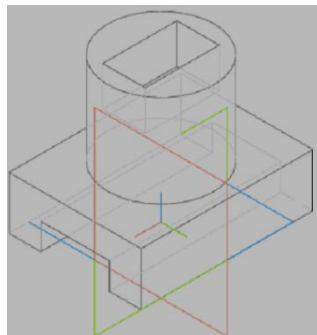


Следующим этапом в построении объемной модели будет построение цилиндра диаметром 40 мм и высотой 35 мм, опирающегося на верхнюю грань построенной призмы. Поэтому вновь сдвигаем курсор на эту верхнюю грань и, нажав левую кнопку мыши, выделяем грань. Далее находим кнопку «Эскиз» и нажимаем ее, т. е. строится уже третий по счету эскиз (контур) на указанной пользователем поверхности. Следует учитывать то обстоятельство, что эскиз можно строить только на плоской поверхности, либо на координатной плоскости. Эскизом на этом этапе будет окружность диаметром 40 мм. На инструментальной панели опять находим кнопку «Выдавливание», нажимаем ее. На панели параметров указываем расстояние для выдавливания (цифру 35 мм). Подтверждаем цифру командой «Enter», и система строит модель.



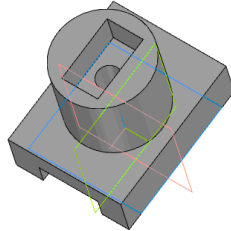
Дальнейшим действием в построении модели будет построение четвертого эскиза, форма которого должна соответствовать контуру очередного вырезания объемной части предмета. Если выполнять это вырезание сверху вниз, то сначала нужно вырезать прямоугольное отверстие размерами 28×16 мм и глубиной 15 мм, а затем, построив пятый эскиз, вырезать цилиндрическое отверстие диаметром 10 мм до поверхности ранее построенного паза.

Для построения четвертого эскиза курсор смещается на верхнее основание построенного цилиндра и выделяется этот круг. Далее нажимается кнопка-команда «Эскиз», система совмещает верхнее основание цилиндра с плоскостью экрана. Выбираем на панели «Геометрия» команду построения прямоугольника, привязываем его к центру окружности, задаем размеры прямоугольника по ширине и высоте (28×16). Отыскиваем на инструментальной панели команду «Вырезать выдавливанием» , нажимаем ее, а на панели параметров указываем глубину вырезания (15 мм). Нажимаем клавишу «Enter», или кнопку «Создать объект» «↵». Система выполняет соответствующее построение. На этом рисунке модель изображена каркасными линиями, чтобы указать и иные варианты отображений.

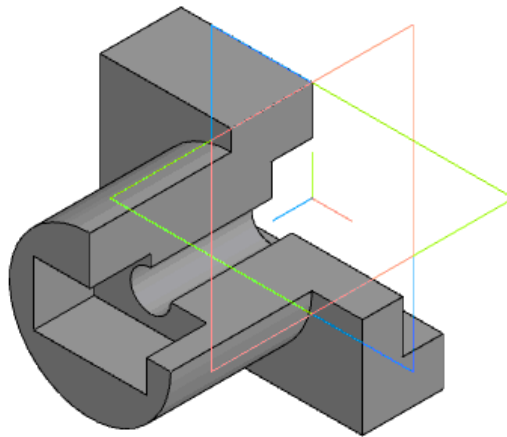


Следующее построение позволит закончить создание пространственной модели детали. Последняя операция – вырезание цилиндрического отверстия диаметром 10 мм. Курсор сдвигается на нижнюю внутреннюю поверхность вырезанного прямоугольного отверстия, и эта поверхность должна быть выделена, нажав левую кнопку мыши. Затем находим кнопку

«Эскиз» и нажимаем ее. Система совмещает в очередной раз указанную поверхность с плоскостью экрана, для построения на этой поверхности эскиза – окружности 10 мм. На инструментальной панели нажимается кнопка-команда «Вырезать выдавливанием», а на панели параметров указывается цифра, соответствующей глубины или выбирается вариант «Через все». Подтверждается действие клавишей «Enter». Система выстраивает изображение модели.



Для наглядности созданная модель повернута и дополнительно разрезана по двум координатным плоскостям.



Моделирование детали состоит в построении входящих в нее тел. Общепринятым порядком моделирования твердого тела является последовательное выполнение булевых операций (объединения, вычитания и пересечения) над объемными элементами (сферами, призмами, цилиндрами, конусами, пирамидами и т.д.). Пример выполнения таких операций показан на рис. 1.

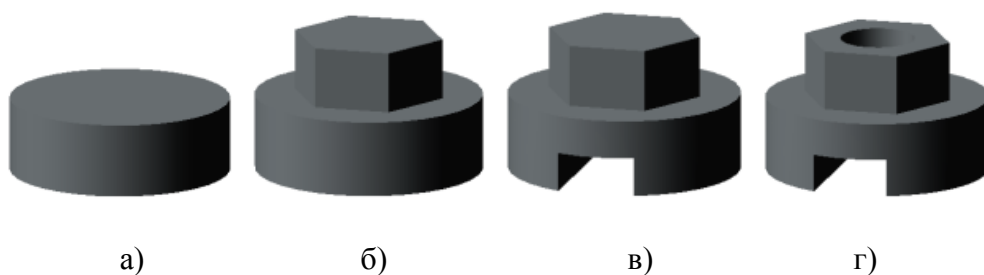


Рис. 1. Булевы операции над объемными элементами:

- а) цилиндр; б) объединение цилиндра и призмы;
в) вычитание призмы; г) вычитание цилиндра

В КОМПАС-3D для задания формы объемных элементов выполняется такое перемещение плоской фигуры в пространстве, след от которого определяет форму элемента (рис. 2). Например, поворот дуги окружности вокруг оси образует сферу или тор, смещение многоугольника — призму, и т.д.

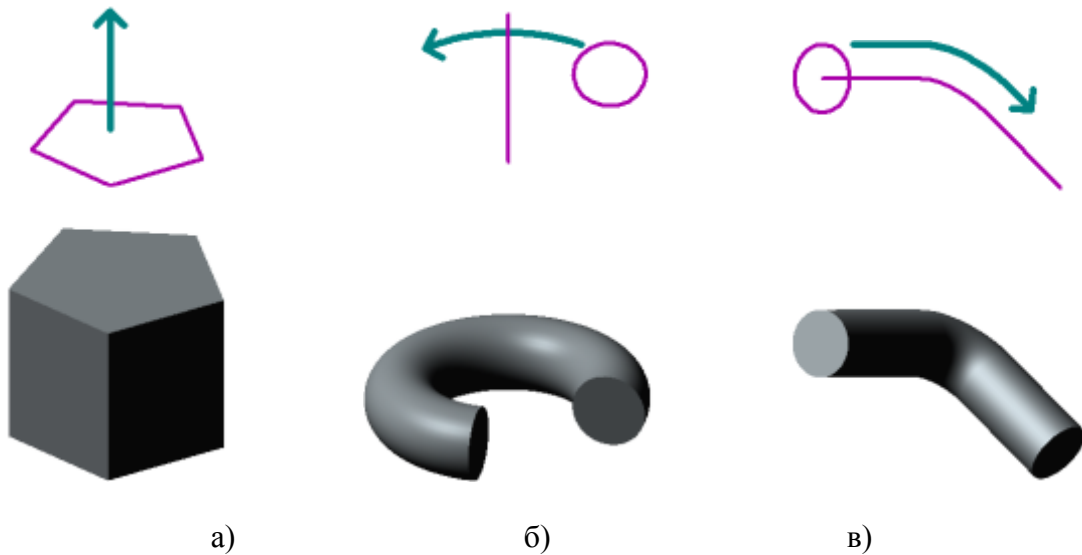


Рис.2. Образование объемных элементов: а) призмы, б) тора, в) кинематического элемента

Плоская фигура, на основе которой образуется тело, называется эскизом, а формообразующее перемещение эскиза — операцией. Модель может содержать несколько твердых тел. Над ними, в свою очередь, также могут производиться булевы операции.

Эскиз может располагаться в одной из ортогональных плоскостей координат, на плоской грани существующего тела или во вспомогательной плоскости, положение которой задано пользователем. Эскиз изображается на плоскости стандартными средствами чертежно-графического редактора КОМПАС-3D. При этом доступны все команды построения и редактирования изображения, команды параметризации и сервисные возможности. Единственным исключением является невозможность ввода некоторых технологических обозначений, объектов оформления и таблиц.

Эскиз может содержать текст. По окончании создания эскиза все тексты в нем преобразуются в один или несколько контуров, состоящих из кривых NURBS (нерегулярный рациональный В-сплайн). В эскиз можно перенести изображение из ранее подготовленного чертежа или фрагмента. Это позволяет при создании трехмерной модели опираться на существующую чертежно-конструкторскую документацию.

Построение тела начинается с создания его основания путем вставки в файл готовой модели детали или выполнения операции над эскизом.

При этом доступны следующие типы операций:

- выдавливание эскиза в направлении, перпендикулярном его плоскости (рис. 3).

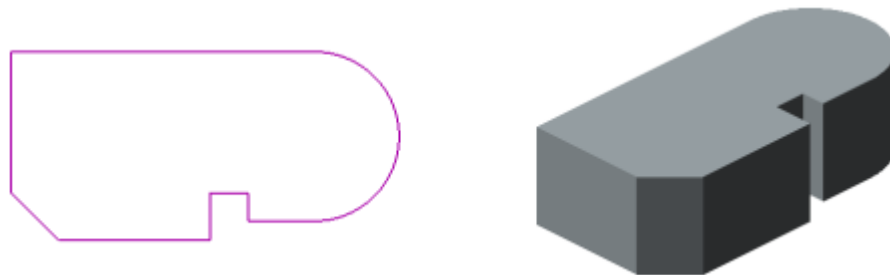


Рис. 3. Эскиз и элемент, образованный операцией выдавливания

- вращение эскиза вокруг оси, лежащей в его плоскости (рис. 4).



Рис. 4. Эскиз и элемент, образованный операцией вращения

– кинематическая операция – перемещение эскиза вдоль указанной направляющей



Рис. 5. Эскизы и элемент, образованный кинематической операцией

– построение тела по сечениям-эскизам (рис. 6)

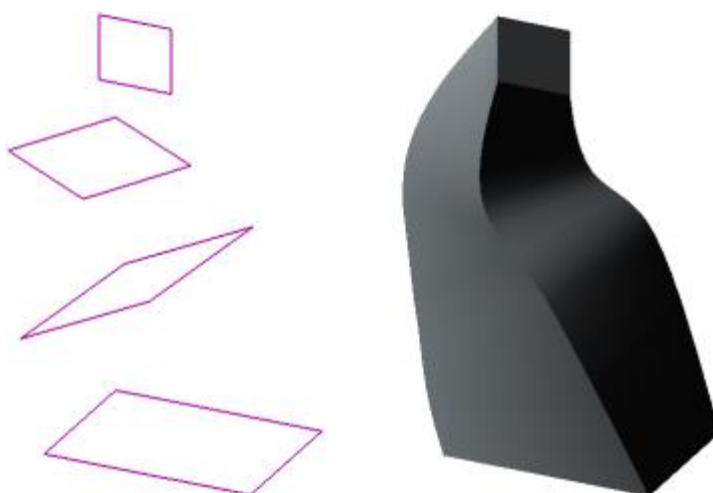


Рис. 6. Эскизы и элемент, образованный операцией по сечениям

Каждая операция имеет дополнительные опции, позволяющие варьировать правила построения основания. Эти опции будут рассмотрены ниже. После создания основания тела производится «приклеивание» или «вырезание» дополнительных объемов (рис. 6.7). Каждый из них представляет собой элемент, образованный при помощи перечисленных выше операций над новыми эскизами. При выборе типа операции нужно сразу указать, будет создаваемый элемент вычитаться из основного объема или добавляться к нему. Примерами вычитания объема из тела могут быть различные отверстия, проточки, канавки, а примерами добавления объема — бобышки, выступы, ребра.

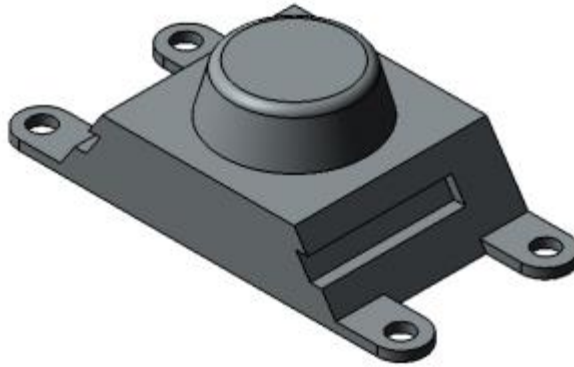


Рис. 7. Пример модели

Многотельное моделирование

Многотельное моделирование — процесс моделирования детали, включающий создание нескольких твердых тел.

Результатом многотельного моделирования может являться как одно тело, так и несколько тел (т.е. многотельная деталь).

Каждое тело в процессе многотельного моделирования создается обычным образом, т.е. путем выполнения булевых операций над объемными элементами. Сначала создается основание тела, затем к нему добавляются или из него вычитаются формообразующие элементы, создаются дополнительные конструктивные элементы.

В качестве наиболее типичных примеров использования многотельного моделирования являются проектирование «с нескольких сторон» и создание тел вычитанием.

Проектирование «с нескольких сторон» – способ проектирования, при котором отдельные части детали создаются как самостоятельные тела, а затем объединяются. При этом пересекающиеся тела можно объединить путем выполнения над ними булевой операции, а не пересекающиеся — путем построения нового пересекающегося с ними тела.

Создание тел вычитанием – способ проектирования, при котором тело детали формируется путем вычитания одних тел из других. В этом случае нужно создать два пересекающихся тела, первое из которых будет определять форму детали, а второе — форму полости. Затем следует произвести над телами булеву операцию вычитания второго тела из первого. Данный способ проектирования рекомендуется для создания деталей со сложными карманами или другими выборками, проходящими через сложные поверхности и имеющими скругления.

Существуют особенности работы при многотельном моделировании. Тело не может быть частично скрыто. Это означает, что нельзя скрыть, например, отдельный приклеенный к телу формообразующий элемент. Поэтому после вызова команды «Скрыть» для какого-либо элемента скрывается целиком все тело, в состав которого входит этот элемент. Изменение положения тел детали друг относительно друга возможно только путем изменения положения эскизов, использованных для создания тел. Для этого можно воспользоваться, например, командами «Разместить эскиз» и «Изменить плоскость» из контекстного меню эскиза в Дереве модели.

Общее количество тел детали отображается в Дереве детали — в скобках после ее названия. В Дереве сборки отображаются только названия вставленных в нее деталей. Количество тел в деталях не указываются.

Дерево модели может отображаться в одном из двух видов: в виде последовательности построения или в виде структуры модели (рис. 8 а, б). При работе с многотельной деталью можно рекомендовать отображение Дерева в виде структуры. Этот способ более наглядно представляет состав многотельной детали и порядок ее создания, чем отображение последовательности построения.

– Элементы, формирующие тела, группируются в разделы, соответствующие телам. Названия разделов совпадают с названиями оснований тел.

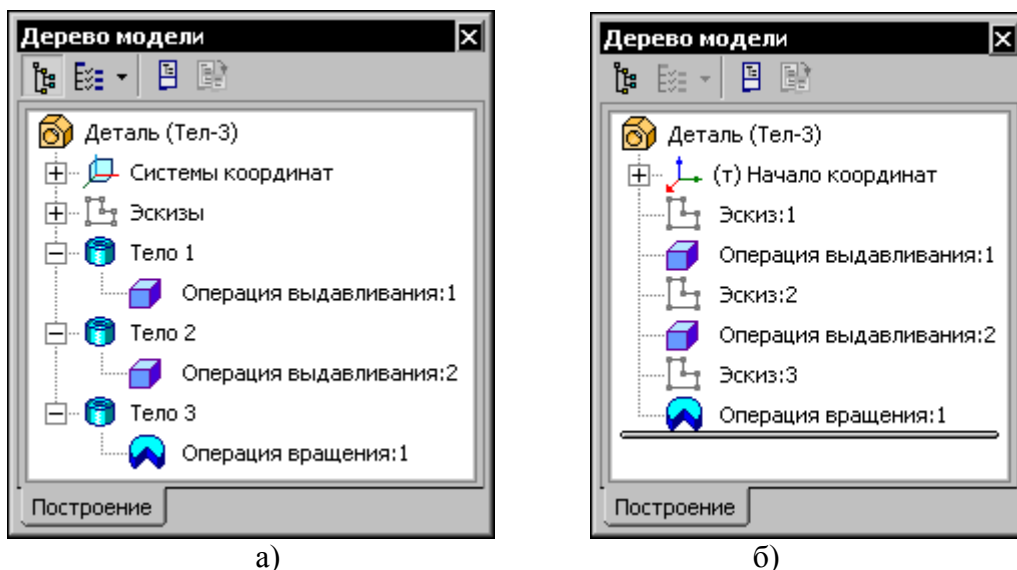


Рис. 8. Многотельная деталь в Дереве: а) структура, б) последовательность построения

Если в детали присутствует булева операция над телами, то она размещается в разделе, который соответствует первому из участвующих в ней тел. Второе тело, участвующее в этой булевой операции, отображается как подчиненное ей (рис. 9, а).

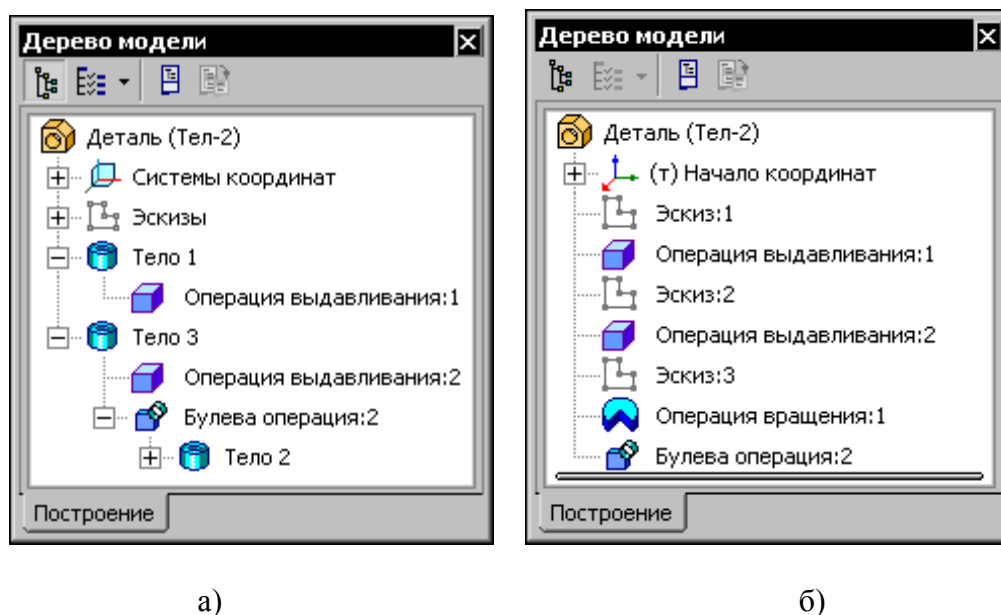
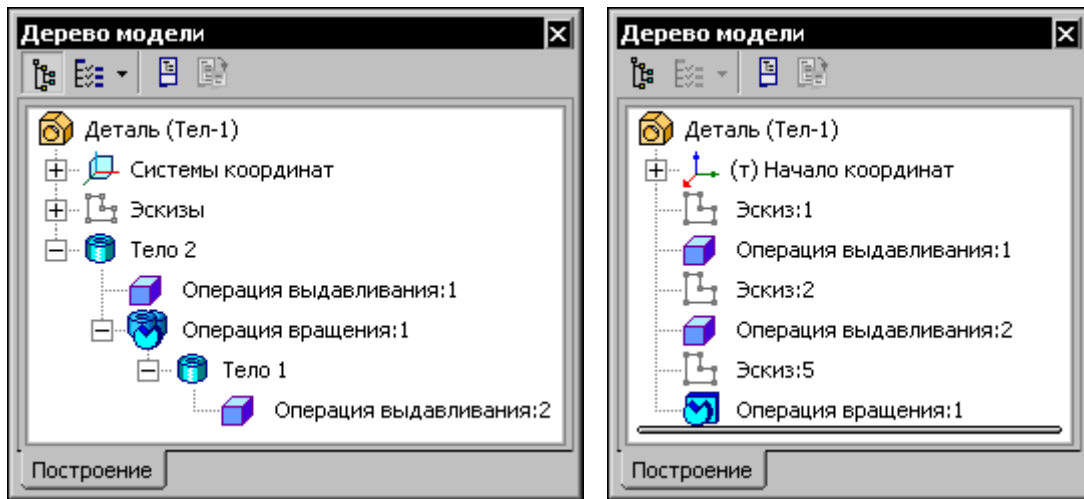


Рис. 9. Булева операция над телами детали:
а) структура, б) последовательность построения

Если в детали присутствует элемент, объединяющий несколько тел в одно, то он размещается в разделе, который соответствует первому из объединяемых тел. Остальные тела, объединяемые этим элементом, отображаются как подчиненные ему (рис. 10). Объединяющие элементы обозначаются в Дереве специальными пиктограммами.



а) б)
Рис. 10. Приклеенный элемент, объединяющий тела:
а) структура, б) последовательность построения

Над телами могут производиться булевы операции. Булева операция выполняется над двумя телами, имеющимися в текущей детали. Результатом операции является новое тело. Оно может участвовать в любых последующих операциях, в том числе булевых. Команда доступна, если в детали имеется более одного тела.

Для вызова команды нажмите кнопку «Булева операция»  на инструментальной панели редактирования детали или выберите ее название в меню «Операции». Укажите первое и второе тела на панели свойств, участвующие в операции (рис. 11).

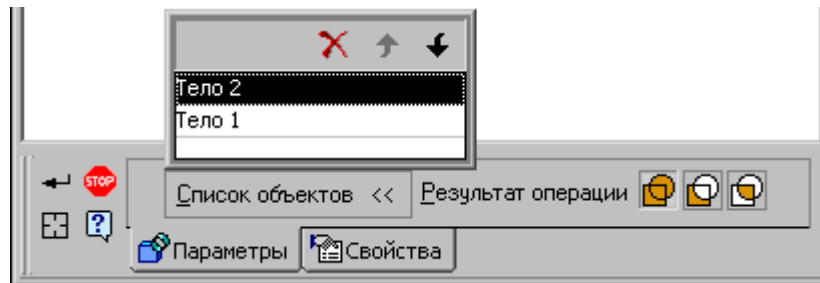


Рис. 11. Панель свойств при выполнении Булевой операции

Указанные тела подсвечиваются в окне модели. Соответствующие им пиктограммы выделяются цветом в Дереве модели. Названия тел отображаются в «Списке объектов» на вкладке «Параметры» панели свойств. Если необходимо отменить указание, нажмите кнопку «Указать заново»  на панели специального управления. Подсветка всех выбранных тел будет отменена, и вы сможете выбрать новые.

Тип булевой операции задается с помощью группы переключателей «Результат операции». Чтобы объединить выбранные тела, активизируйте переключатель «Объединение» . Чтобы удалить из первого тела объем, занимаемый вторым телом, активизируйте переключатель «Вычитание» . Первым считается тело, находящееся на первой позиции списка, а вторым — тело, находящееся на второй позиции. Для изменения порядка следования тел воспользуйтесь кнопками «Переместить вниз»  и «Переместить вверх»  на панели

Список тел. Чтобы удалить весь объем обоих тел, кроме их общего объема, активизируйте переключатель «Пересечение» .

Объединение тел возможно, если они пересекаются или имеют общую поверхность, а вычитание и пересечение возможны, только если тела пересекаются. Наименование объекта (название, которое отображается в Дереве модели) можно задать на вкладке Свойства Панели свойств.

Задав параметры операции, нажмите кнопку «Создать объект» на панели специального управления. В Дереве модели появится пиктограмма булевой операции, а в окне детали — тело, являющееся результатом операции. В Дереве модели появится пиктограмма булевой операции , а в окне детали — тело, являющееся результатом операции.

При выполнении операций в многотельной детали необходимо учитывать их область применения.

Область применения операции — набор тел, которые модифицируются в результате операции. Если тел в модели несколько, то кроме настройки параметров может понадобиться задание области применения операции. Для этого служит вкладка Панели свойств Результат операции. Подробно об области применения операций и способах ее задания рассказано ниже.

При добавлении материала модели (например, при приклеивании формообразующих элементов) область применения определяет тела, с которыми будет объединен создаваемый (редактируемый) элемент, а при удалении (например, при вырезании формообразующих элементов) — тела, материал которых будет удален в результате операции.

Например, имеется три тела. На верхней грани тела 1 создан эскиз для операции выдавливания — окружность (рис. 12, а).

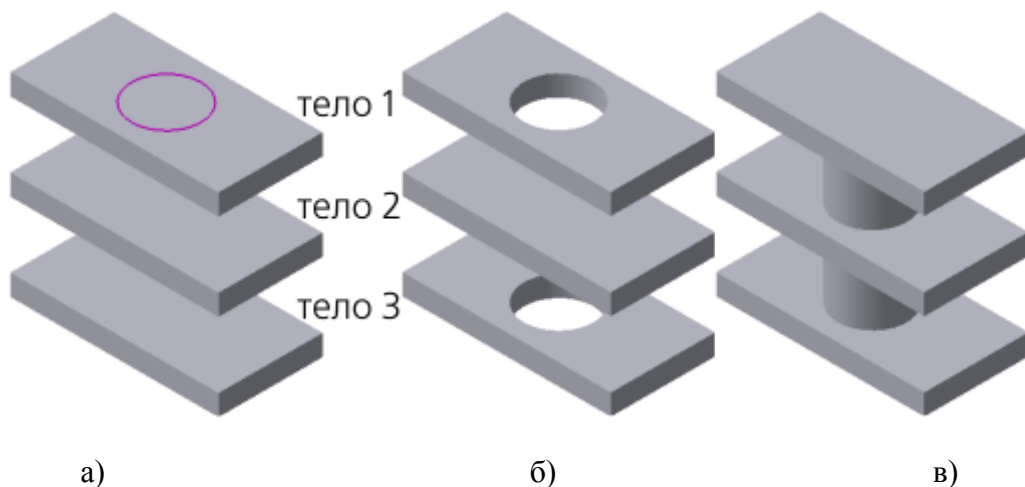


Рис. 12. Область применения операции выдавливания:
а) исходное состояние детали и эскиз операции,
б) результат вырезания, в) результат приклеивания

Способ определения глубины выдавливания — Через все. В область применения операции могут входить любые из этих тел в любом сочетании. Допустим, область применения составляют тела 1 и 3. Если элемент выдавливания вырезается, то в результате операции отверстие появится только в телах 1 и 3 (рис. 12, б). Несмотря на то, что элемент выдавливания проходит через тело 2, оно остается целым, поскольку не включено в область применения операции.

Если элемент выдавливания приклеивается, то получится новое тело, состоящее из тел 1 и 3 и элемента выдавливания (рис. 12, в). Несмотря на то, что элемент выдавливания про-

ходит через тело 2, оно остается самостоятельным, поскольку не включено в область применения операции выдавливания.

В область применения операции могут быть включены:

- те из видимых (не скрытых и не исключенных из расчета) тел, которые пересекаются с элементом, образующимся в результате операции,
- все видимые тела,
- произвольный набор тел.

По умолчанию область применения операции определяется автоматически: в нее включаются все видимые тела, с которыми пересекается элемент, являющийся результатом операции (до завершения операции он показывается в виде фантома).

В примерах, приведенных выше, результатом вырезания с автоопределением области применения были бы отверстия во всех трех телах, а результатом приклеивания — одно тело, образованное телами 1, 2, 3 и выдавленным элементом.

При необходимости область применения любой операции можно настроить вручную, включив в нее все видимые тела или произвольный набор тел.

При добавлении материала к модели область применения операции задается на вкладке «Результат операции» панели свойств (рис. 13).

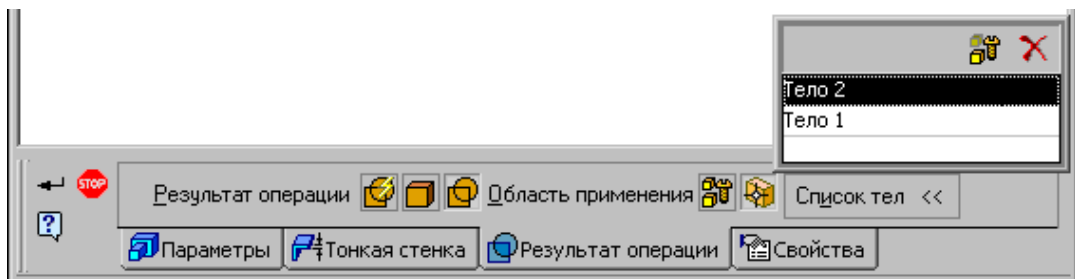


Рис. 13. Задание области применения приклеиваемого элемента выдавливания

Умолчательный способ определения области применения операции — автоопределение. При этом активен переключатель «Автообъединение» в группе «Результат операции». Если необходимо, вы можете настроить область применения операции произвольным образом. Для этого активизируйте переключатель «Объединение». На панели свойств станет доступна группа элементов «Область применения».

При вырезании формообразующих элементов область применения задается на вкладке «Вырезание» панели свойств (рис. 14).

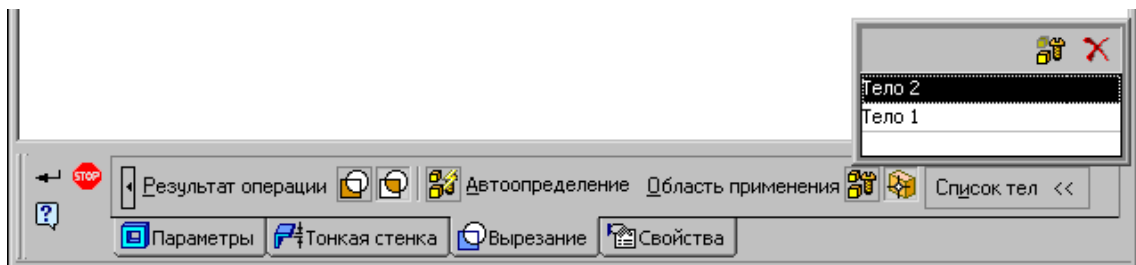


Рис. 14. Задание области применения вырезаемого элемента выдавливания

При построении круглого отверстия, а также при рассечении модели поверхностью или по эскизу область применения задается на вкладке «Результат операции» панели свойств (рис. 15).

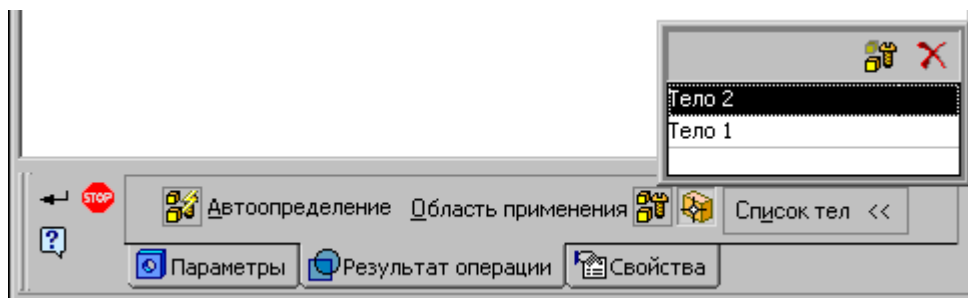


Рис. 15. Задание области применения круглого отверстия

При умолчательном способе определения области применения этой операции этим активен переключатель «Автоопределение» . Если необходимо, можно настроить область применения операции произвольным образом. Для этого выключается переключатель «Автоопределение». На панели свойств станет доступна группа элементов «Область применения».

Автоопределение области применения означает, что в нее включаются все тела, кроме скрытых и исключенных из расчетов, с которыми пересекается элемент, являющийся результатом операции. При этом на вкладке «Результат операции» активизируется переключатель «Новое тело» . Если при удалении материала не было обнаружено пересечений создаваемого элемента с другими телами, то в модели возникает ошибка. Если при добавлении материала не было обнаружено пересечений создаваемого элемента с другими телами, то элемент создается как самостоятельное тело.

Автоматическое определение области применения операции в некотором роде предпочтительнее других способов задания области применения, так как в последнем случае в нее можно случайно включить тела, не имеющие пересечений с редактируемым элементом. В этом случае элемент нельзя будет создать. Дело в том, что выполнение операции возможно только при условии, что элемент, являющийся результатом операции, действительно пересекается с телами, составляющими ее область применения. Если элемент не пересекается хотя бы с одним из тел, входящих в область применения операции, в модели возникает ошибка «Объекты не пересекаются».

При отключенном автоопределении области применения операции становится доступна группа элементов Область применения. Она содержит два переключателя: «Все тела»  и «Выбор тел» . Переключатель «Все тела» позволяет включить в область применения операции все тела, кроме скрытых и исключенных из расчета, вне зависимости от того, пересекаются они с редактируемым элементом или нет. Переключатель «Выбор тел» позволяет вручную указать тела, которые должны входить в область применения текущей операции. После активизации этого переключателя становится доступна панель «Список тел». Она содержит перечень тел, включенных в область применения операции, и две кнопки: «Выбрать все»  и «Удалить» . Для ручного добавления тел в область применения их следует указать в окне модели или в Дереве модели.

Набор тел, составляющих область применения операции, остается неизменным. Включение отображения тел, которые были скрыты в момент выполнения операции, а также «перетаскивание» тел в Дереве детали не приводят к изменению области применения. Благодаря этому возможно моделирование деталей путем вычитания одного тела из другого.

Например, нужно построить деталь с полостью сложной формы. Для этого можно действовать следующим образом.

1. Создать первое тело — тело, которое будет определять форму детали, и скрыть его.

2. Создать второе тело — тело, которое будет определять форму полости. Выполняя операции, формирующие тело, можно не производить никаких действий по заданию их областей применения, т.е. использовать умолчательный способ определения области применения — автоопределение. При этом в область применения всех операций будет входить только второе тело.

3. Включить показ первого тела. При этом область применения второго тела не изменится. Другими словами, все операции, выполненные в п.2, в том числе, например, операции вырезания Через все, будут по-прежнему относиться только ко второму телу.

4. Выполнить булеву операцию вычитания второго тела из первого.

Чтобы включить в область применения операции новые тела или исключить из нее имеющиеся, необходимо войти в режим редактирования этой операции и изменить область ее применения с помощью элементов управления панели свойств. Эти элементы и приемы работы с ними описаны в следующих разделах.

Многотельное моделирование расширяет возможности построения деталей и снимает ограничения на создание моделей, которые можно получить только объединением, вычитанием или пересечением тел. Например, используя многотельное моделирование, можно построить деталь путем объединения тонкостенных тел с разной толщиной стенки. Для каждого тела можно задать параметры МЦХ, цвет и свойства поверхности.

При необходимости построенные в детали тела можно сохранить как самостоятельные детали.

Листовые тела

Особый тип тела — листовое тело, способное «сгибаться» и «разгибаться». К нему можно добавлять листовые элементы — сгибы, пластины, штамповки и др. Таким образом в КОМПАС-3D моделируются детали, изготавливаемые из листового металла с помощью гибки. Пользователь может указать плотность детали (введя нужное значение вручную или выбрав определенный материал) или ее массу (а при необходимости и центр масс). Для тел возможно только задание плотности.

Листовое тело (рис. 16) характеризуется толщиной материала (S), из которого оно изготовлено.

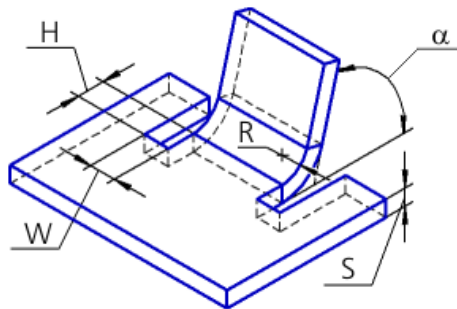


Рис. 16. Параметры листового тела

Изогнутые участки (сгибы) тела определяются:

- внутренним радиусом (R),
- углом сгиба (α),
- шириной освобождения (W),
- глубиной освобождения (H).

Сгиб может не иметь освобождений. Кроме того, каждый сгиб имеет параметр, определяющий длину развертки этого сгиба. Таким параметром — в зависимости от выбранного способа определения длины развертки — является коэффициент нейтрального слоя, или величина сгиба, или уменьшение сгиба. Параметр, определяющий длину развертки сгиба, далее будем называть параметром развертки этого сгиба.

Чтобы создать в модели листовое тело, вызовите команду «Листовое тело» . Эта команда доступна, если выделен один эскиз. Параметры листового тела задаются на вкладке панели свойств «Параметры». Завершив настройку, следует подтвердить выполнение операции. В окне модели появится листовое тело с заданными параметрами, а в Дереве модели — пиктограмма листового тела.

Требования к замкнутому эскизу листового тела:

- в эскизе может быть один или несколько контуров,
- если контуров несколько, один из них должен быть наружным, а другие — вложенными в него,
- допускается один уровень вложенности контуров.

Если эскиз замкнут, то для построения листового тела необходимо задать следующие его параметры:

- направление выдавливания эскиза. Прямое направление показано стрелкой в окне модели. Для изменения направления служит группа переключателей «Направление»;
- толщину листового тела. Фактически толщина является расстоянием, на которое выдавливается эскиз;
- определение длины развертки сгиба. Если длина развертки берется из таблицы сгибов, можно сменить умолчательную таблицу, нажав кнопку «Выбрать другую таблицу сгибов» .

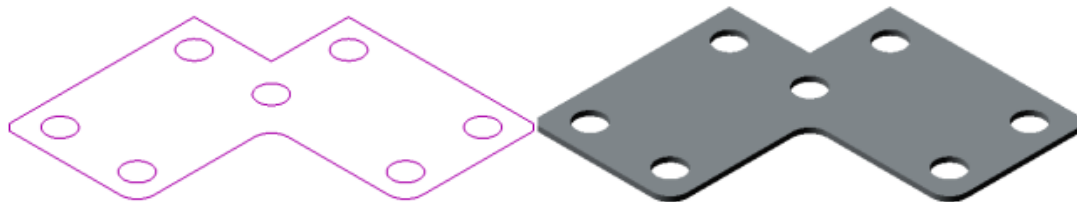


Рис. 17. Построение листового тела на основе замкнутого эскиза: эскиз, листовое тело

Требования к разомкнутому эскизу листового тела:

- в эскизе может быть только один контур,
- контур может состоять только из отрезков и дуг окружностей,
- дуги должны располагаться касательно к отрезкам и другим дугам и соединяться с ними в точках касания.

Построение листового тела на основе разомкнутого эскиза имеет следующие особенности:

- отрезки в эскизе формируют плоские участки листового тела;
- дуги в эскизе формируют сгибы соответствующих радиусов;
- углы контура в эскизе формируют сгибы с заданным пользователем внутренним радиусом.

Выбирается направление и глубина выдавливания. Это делается так же, как при построении элементов выдавливания. Вводится толщина слоя добавляемого материала (толщину листового тела) в поле «Толщина» и в поле «Радиус сгиба» значение внутреннего радиуса для сгибов, соответствующих углам контура. Ввод нулевого радиуса сгиба невозможен. Минимальное значение — 0,0002 мм.

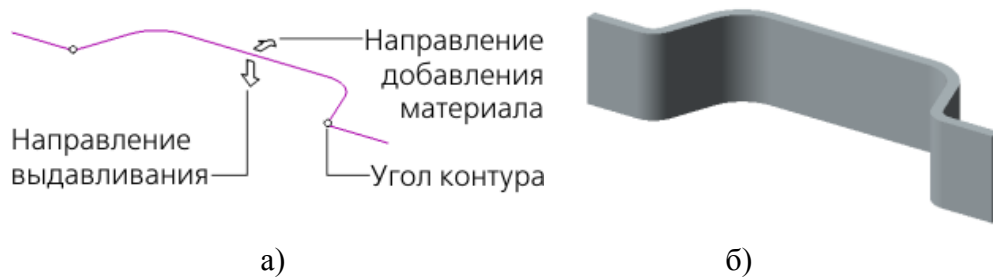


Рис. 17. Построение листового тела на основе разомкнутого эскиза:
а) эскиз, б) листовое тело

Настройте определение длины развертки сгиба. Если длина развертки берется из таблицы сгибов, то можно сменить умолчательную таблицу, нажав кнопку «Выбрать другую таблицу сгибов»

Опция «Разогнуть» управляет состоянием листового тела. Если она выключена, то результатом построения будет согнутое листовое тело. При включенной опции все сгибы листового тела будут разогнуты. Пиктограмма разогнутого листового тела отмечается в Дереве модели значком «разогнуто» . Управление признаком «разогнуто» для листового тела производится также, как для других листовых элементов, содержащих сгибы. Сгибы, получившиеся в результате построения листового тела с разомкнутым эскизом, не отличаются от сгибов, полученных с помощью специальных команд. Сгибы листового тела отображаются в Дереве модели так же, как остальные сгибы любой сгиб листового тела можно отредактировать.

Вся информация о детали (форма и размеры тел, плотность и т.д.) хранится в файле этой детали.

4. Подготовка созданных цифровых 3D-моделей для 3D-печати

Почти каждая машина аддитивного производства принимает формат STL (Stereo Lithography) файлов, которые стали стандартом де-факто, и почти каждый САПР может выводить такие файлы в этом формате. В таких файлах описаны внешние замкнутые поверхности изначальной САПР модели, они формируют основу для расчета слоев.

Почти каждая технология аддитивного производства использует формат STL-файлов. Термин «STL» является производным от названия технологии стереолитографии (Stereolithography), которая была первым коммерциализированным проектом компании 3D System в 1990-м г. STL — это просто способ описания модели, разработанной в среде САПР, в терминах одной геометрии. В этом формате из файлов САПР удаляются любые проектные данные, история моделирования и другая информация, а поверхности модели аппроксимируются серией треугольных граней.

Основная задача проектировщика — получить конвертированную геометрию без искажений. Для этого важно правильно выбрать размер треугольных граней, с помощью которых будут аппроксимированы поверхности САПР-модели. Минимальный размер треугольников можно задать в большинстве САПР. Размер треугольника на практике рассчитывается по принципу минимального расстояния между плоскостью самого треугольника и поверхностью, которую он должен представлять. Основная задача в данном случае заключается в том, что минимальный зазор между треугольником и реальной поверхностью должен быть меньше, чем разрешение машины аддитивного производства.

Процесс преобразования в формат STL автоматизирован в большинстве САПР, но есть вероятность ошибок, возникающих во время данного этапа, поэтому было разработано множество программных средств для выявления и исправления таких ошибок.

STL-файлы представляют собой неупорядоченный перечень данных о вершинах треугольников и векторах нормальных к поверхности.

Таким образом, STL-файл не имеет информации об элементах, цвете, материале или других свойствах изделия. Эти ограничения в STL-файлах привели к разработке нового формата AMF. Теперь он является международным стандартом, который расширяет формат STL. Использование формата AMF позволяет записать габаритные размеры, цвет, материалы и многие другие необходимые характеристики изделия. Таким образом, формат STL можно заменить на формат AMF как на более перспективный. В результате несколько крупных компаний, специализирующихся на разработке САПР, и производители аппаратного обеспечения аддитивного производства публично объявили, что они будут поддерживать формат AMF при разработке и использовании следующего поколения программного обеспечения.

Программное обеспечение, применяемое для восстановления STL-файлов, например Magics от бельгийской компаний Materialise [1], используется, когда есть проблемы с STL-файлами, которые могут нарушить правильность построения изделия. При изготовлении изделий сложной геометрической формы, человеку сложно обнаружить подобные проблемы при просмотре файлов САПР или впоследствии сгенерированных данных в формате STL. Если ошибки незначительны, то их можно даже не заметить, пока изделие не будет построено.

Поэтому такое программное обеспечение следует применять на этапе проверки, чтобы еще до начала производства гарантировать отсутствие ошибок в данных STL-файла.

Поскольку STL является описанием поверхности, соответствующие треугольники в файлах должны быть позиционированы и ориентированы правильно. Вектор нормали к плоскости треугольника должен указывать, какая сторона треугольника является внешней, а какая — внутренней. Поэтому поперечное сечение, соответствующее слоям изделия, расположенным вблизи перевернутого вектора нормали, может оказаться обратной стороной треугольника. Кроме того, из-за сложной геометрии изделия, состоящей из множества разна-

правленных поверхностей, вершины треугольников могут остаться неоцифрованными. Результатом этого станет разрыв поверхности.

Различные технологии аддитивного производства используют разные методы для решения данной проблемы. Некоторые машины могут обрабатывать данные STL таким образом, что разрывы перекрываются. Однако перекрытия разрывов не могут создать требуемую поверхность, и были случаи, когда вместо разрыва при построении изделия вводились дополнительные и нежелательные материалы.

В то время как большинство ошибок могут быть обнаружены и исправлены автоматически, иногда требуется исправление недочетов вручную, поэтому программное обеспечение должно зафиксировать проблему и указать место, где расположен перевернутый треугольник. По мере усложнения геометрии, для программного обеспечения становится затруднительным установить, является ли результат на самом деле ошибкой или частью первоначальной концепции конструкции.

Когда речь заходит об экспорте исходных CAD-файлов в STL-формат, необходимо помнить о нескольких важных моментах. В первую очередь следует стараться найти настройки данного формата.

Например, при экспорте из CATIA версии 4 или версии 5 не всегда очевидным является тот пункт меню, в котором указываются настройки STL-формата [3].

Обсудим основные настройки, на которые следует обратить внимание при настройке формата STL. Одним из ключевых параметров является максимально допустимый угол между плоскостями, в которых лежат смежные треугольники. Например, если речь идет о сфере, построенной в CAD-системе, то при экспорте в STL-формат, программа будет располагать плоскости, в которых лежат смежные треугольники, под небольшим углом друг к другу при скруглении. Управляя величиной данного угла, можно управлять точностью аппроксимации исходной геометрии.

Следующим параметром настройки формата является настройка количества треугольников. Следует напомнить, что от того, как много треугольников в сопредставлении объекта, зависит то, насколько быстро будет работать слайсер. Работа слайсера во многом основывается на анализе и чтении данных о каждом треугольнике для дальнейшего расслоения модели и заполнения каждого слоя. Когда речь идет о печати моделей размерами 200x200x200 мм, рекомендуется использование от 500 000 до 2 000 000 треугольников, но не более. Существует различие между технологиями. Например, если планируется применение SLA-печати высокодетализированной небольшой модели, то количество треугольников может быть и больше. При использовании профессиональной 3D печати, например печати из полиамида, или же использовании принтеров Stratasys Fortus, применяемое программное обеспечение позволит работать с большим количеством треугольников. Если же речь идет о компактных 3D принтерах и встроенном, бесплатном программном обеспечении, то рекомендуется использовать меньшее число треугольников.

После экспортирования САПР-модели в формат STL не следует забывать о необходимости проверки результатов экспортирования.

Для проверки рекомендуется использовать такие программные продукты, как Netfabb Studio от компании Autodesk или Magics от компании Materialise. При проведении проверки в первую очередь следует обратить внимание на наличие ошибок. Во-вторых, следует обратить внимание на корректное отображение всех граней модели. Ситуация, при которой экспортированный файл содержит целый набор неточностей и ошибок, является довольно частым явлением.

Еще одним важным моментом, на который следует обратить внимание — экспорт в бинарный формат. Если взять Word-файл и архивировать его, то он занимает меньше места на диске. Текстовое представление, или ASCII-представление для формата STL, есть бинарное, либо двоичное. При экспорте файлов следует найти опцию «сохранение» в бинарный формат.

Передача STL- или AMF-файлов на машины аддитивного производства и их обработка

В машину аддитивного производства передается STL-файл с описанием изделия. Здесь производятся некоторые общие манипуляции с файлом: исправление размеров, позиционирование и ориентация для изготовления изделия.

После создания и проверки, STL-файл загружают в машину аддитивного производства. В идеале у пользователя должна быть возможность нажать на кнопку «печать», чтобы машина сразу начала строить изделие. Однако дело обстоит совсем не так. Иногда требуется выполнить еще множество действий, необходимых для начала построения изделия.

Перед запуском процесса печати необходимо провести проверку правильности представления изделия. Программное обеспечение систем аддитивного производства обычно имеет инструмент визуализации, что позволяет пользователю просматривать и манипулировать виртуальным изображением изделия. Пользователь может изменить изделие или даже ориентацию будущего изделия, чтобы начать построение в определенной части рабочего объема машины. Довольно часто в машинах аддитивного производства строят не одно, а сразу много изделий. Это могут быть копии одного изделия (от машины требуется функция копирования) или совершенно разные изделия с разными STL-файлами. STL-Файлы можно легко масштабировать в линейном измерении. В некоторых приложениях требуется слегка изменить размеры изделия — увеличить или уменьшить по сравнению с оригиналом, чтобы учесть процесс усадки или нанесения покрытия, поэтому перед построением изделия требуется масштабирование. В других приложениях необходимо маркировать изделия тем или иным способом, даже были разработаны некоторые программные инструменты, чтобы добавить текст и простые функции для формирования данных STL для этой цели. Это можно сделать в форме выдавленных трехмерных символов. В исключительных случаях может даже потребоваться сегментация STL-файлов (например, для слишком большой детали) или слияние нескольких STL-файлов. Следует отметить, что не все машины аддитивного производства имеют все упомянутые здесь функции, но можно найти множество программных средств для манипуляции STL-файлами, как платных, так и доступных для свободного скачивания. Они позволяют выполнить эти функции перед отправкой файла в машину.

5. FDM-печать, принципы, характеристики, особенности процессов термоэкструдерной печати

При использовании FDM-технологии печать выполняют на рабочей платформе (рис. 1).

При печати ABS-пластиком, платформа должна быть нагрета от 100 до 110 °С. Далее подходит экструдер и наносит первый слой печати, потом поднимается на высоту первого слоя, печатает следующий слой, затем — на высоту следующего слоя и т. д. Печать каждого слоя происходит в два этапа. На первом этапе экструдер оформляет

контур формируемого слоя, на втором — контур заполняется материалом. Для заполнения контура материалом выполняется штриховка, в ходе которой экструдер укладывает материал полосами внутри ранее очерченного контура. При формировании следующего слоя направление штриховки меняется. Это позволяет сделать изделие более крепким и предотвращает деламинацию слоев. Процесс легко представить, если вспомнить кондитерский шприц. Шприцем сначала наносим первый слой. Возможно, штрихуем. Далее поднимаем инструмент, наносим следующий слой и так продолжаем, пока не построим или не напечатаем какой-то объект. Конечно, это очень упрощенная модель.

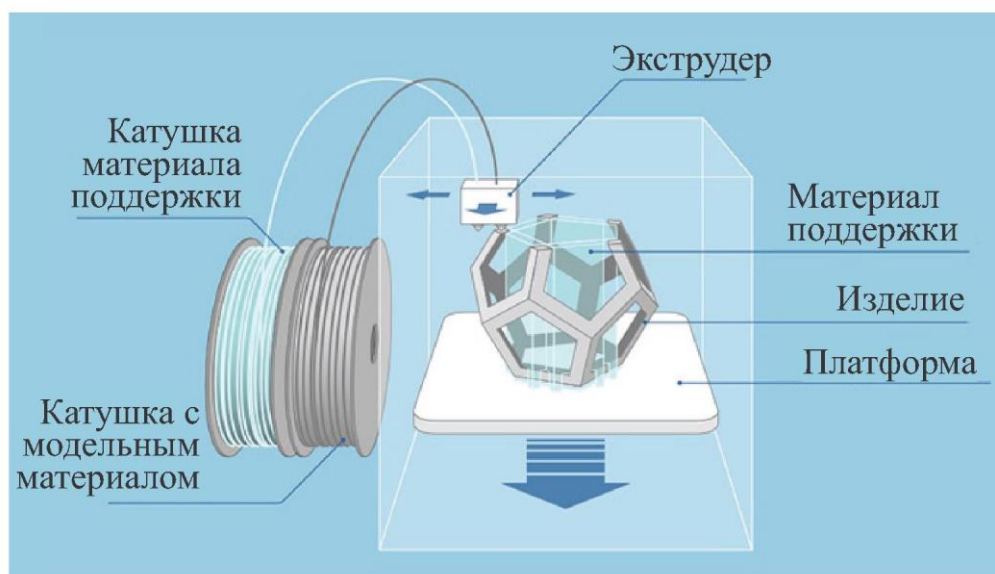


Рис. 1. Схема печати изделия при использовании FDM-технологии

FDM-Технология больше всего распространена среди обычных, компактных, настольных, домашних, бытовых или учебно-бытовых 3D принтеров благодаря тому, что расходный материал для данной технологии относительно недорогой.

Необходимо отметить, что существуют профессиональные 3D принтеры по данной технологии. Промышленные 3D принтеры имеют закрытую камеру, которая предотвращает расслаивание. У них очень точно откалибрована подача расходного материала, который заходит в экструдер. Если для бытовых принтеров диаметр прутка составляет $1,75 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, то для промышленного прутка такая точность будет слишком низкой. Там допуск составляет ($\pm 0,02$) или ($\pm 0,03$) мм. Иногда производители стараются еще улучшить этот допуск, чтобы модели получались более точными.

Основные ограничения FDM-технологии: точность; шероховатость; необходимость в поддержках; деламинация и усадка; минимальная толщина стенки.

Точность

Точность для FDM-технологий составляет от 0,1 до 0,2 мм. Необходимо понимать, что точность в печати — понятие относительное, потому что те программы, которые разбивают объект на слои, т. е. подготавливают 3D модель к печати, обычно ориентируются на точность по внешнему краю модели.

Программа будет стараться точно выдержать внешние габариты, например, при печати чашки, но может ошибаться с внутренними габаритами. Это связано с шириной экструдированного прутка. Представьте, если экструдировается прутки шириной в одну условную единицу, а нужно напечатать стенку шириной 2,5 единицы. Это означает, что будет обход по контуру, дальше по внутреннему контуру и в середине будет пустота. С внешней стороны стенка толщиной единица, с внутренней стороны стенка толщиной единица и половина единицы — это пустота. Если программа по какой-то причине решит заполнить эту пустоту, например в настройках стоит 100 % заполнение, система будет пытаться исхитриться и делать какое-либо заполнение. В этом случае она может внутреннюю стенку подвинуть на половину единицы, т. е. на 0,5 наших условных единиц, чтобы общая толщина стенки чашки стала 3 единицы. В итоге программа сможет подготовить объект следующим образом: будет внешний контур толщиной 1, внутренний контур толщиной 1 и внутри заполнение опять также толщиной в 1, если у нас из сопла выходит поток диаметром 1.

Важно понимать, что программа обычно настроена так, чтобы сохранять внешние габариты изделия, но при этом могут нарушаться внутренние габариты. Следовательно, если планируется изготовить какой-то паз под винт, под гайку, под еще какую-то вставку другой модели, всегда необходимо помнить о том, что внутренние размеры нужно проверять или запускать тестовую печать какой-то части изделия, чтобы посмотреть, как нужная деталь встанет на свое место [3].

И, конечно, никто не отменял постобработку. При FDM-печати есть возможность использовать обычную наждачную бумагу и напильники. При работе с металлом лучше использовать способ предварительной печати фрагмента детали, чтобы посмотреть, входит она или не входит, подкорректировать, возможно, размер и после этого ставить на печать всю деталь.

Что касается металла, то допуски составляют порядка 50 мкм, но допуск зависит от режима печати, материала, принтера. При любом типе печати всегда есть возможность печатать чуть быстрее, но менее качественно либо наоборот, медленнее и более качественно.

Представьте обычный струйный 2D принтер, который печатает просто на бумаге. У него, как правило, есть 2 режима печати. Все пользуются каким-то стандартным, но можно поставить галочку и выбрать такой пункт, чтобы он печатал медленнее, но качественнее. Если же надо напечатать какой-то раздаточный материал, который не очень важен и, возможно, будет утилизирован спустя полчаса после того, как его выдали, то можно поставить режим более быстрой печати, соответственно будут возникать полосы, какие-то элементы будут хуже пропечатываться. То же самое происходит и при 3D печати.

Так, если экструдер движется достаточно медленно, то он проходит каждый угол отдельно, в результате чего углы модели получаются ровные, прямые, точные. Теперь если необходимо по какой-то причине напечатать модель быстрее, то мы увеличиваем скорость печати. При этом экструдер движется быстрее, и пластик будет подаваться быстрее. При экструдировании, когда экструдер проходит угол, он проходит его слишком быстро. Материал может хуже прилипать к предыдущему слою, загибаться на повороте, и вместо углов получится закругление. Это всё зависит от того, какой высотой печатается слой, насколько подняли скорость, при какой температуре происходила печать. Важно запомнить, что 3D печать это не какой-то один режим печати. Это всегда выбор из нескольких режимов печати [3].

Шероховатость поверхности

При FDM-печати можно заметить на стенке приплюснутые цилиндры друг над другом. Данная впадина составляет порядка половины толщины слоя. При печати слоем порядка 200 мкм, т. е. 0,2 мм, радиус впадины будет составлять примерно 0,1 мм (рис. 3.2). Это означает, что для устранения шероховатости необходимо использовать постобработку. Однако впадину в 100 мкм (кстати, это толщина стандартного листа бумаги формата А4) достаточно легко сгладить обычной наждачной бумагой либо использовать «ацетоновую баню» [3].

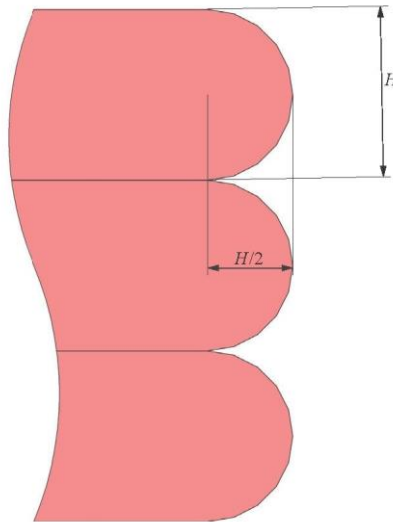


Рис. 2. Схематическое представление шероховатости поверхности при FDM-печати (H — толщина слоя печати)

Необходимо упомянуть, что при использовании FDM-технологий широко применяют четырехсотую наждачную бумагу (т. е. бумагу с маркировкой 400). Она хорошо подходит для ABS-, PLA- и КТГ-пластика. Ей возможно убрать неровности, но при этом сохранить геометрию. При использовании более грубой наждачной бумаги (с маркировкой 80, 120) есть вероятность повреждения геометрии изделия.

Очень важная характеристике печати — время и его взаимосвязь с толщиной слоя. Одной из частых ошибок тех, кто начинает что-то печатать, применять аддитивные технологии, является стремление печатать минимальной толщиной слоя, чтобы сразу получать более гладкие изделия.

Например, можно построить дом, используя для этого кирпич высотой 9 см. Представим, что на то чтобы выложить кирпичом весь дом, от фундамента до конца крыши, требуется 24 ч. Если использовать кирпич высотой 3 см и выложить тот же самый дом, то потребуется примерно в 3 раза больше времени. То же самое и с 3D печатью.

Если печатать какое-то изделие толщиной слоя 0,2 мм (200 мкм), на изготовление этого изделия требуется 10 ч. Если напечатать то же самое изделие толщиной слоя 50 мкм (в 4 раза тоньше), то на изготовление изделия уйдет в 4 раза больше времени, т. е. 40 ч. Лучше напечатать изделие толщиной слоя 200 мкм, т. е. более грубым слоем (легко представить: 200 мкм — толщина двух листов бумаги A4), но с легкостью потом обработать наждачной бумагой.

Таким образом, при настройке машины важно сделать выбор: печатать более гладким слоем и не тратить время на постобработку либо печатать более толстым слоем, более грубой печатью, но потом потратить время на постобработку. Это очень важный момент, который справедлив для любого вида печати: и для FDM-технологии, и для печати металлом, полиамидом или фотополимером.

Необходимость в поддержках

Любой человек, работающий в 3D печати, в области аддитивных технологий, всегда сталкивается с поддержками, причем сталкивается с ними уже при печати первого, второго или максимум десятого изделия.

Допустим, планируется печать вертикальной буквы «Г». Пока печатается основной столбик, всё хорошо. Как только начинается печать выступающего элемента, экструдер идет по воздуху, пластик экструдируется, ни на что не опираясь. Понятно, что под действием силы тяжести часть, которая ни на что не опиралась, просто упадет вниз. Нужно использовать поддержки, дополнительные столбики, вспомогательные элементы конструкции, поэтому

будем печатать не букву «Г», а букву «П», после чего мы отпилим одну ножку и получим букву «Г». Однако то, как далеко могут отстоять 2 столбика так, чтобы было небольшое провисание либо вообще не было провисания пластика, зависит от скорости печати, расходного материала (более качественный, менее качественный), температуры экструдера (с этим связана скорость печати). Если столбики отстоят друг от друга на расстоянии 50 мм (5 см), то получится напечатать такой элемент конструкции (обычно его называют мостом). Длина моста может составлять 50, иногда 60 мм. Необходимо понимать: если 2 столбика стоят на расстоянии 60 мм, когда экструдер проходит над ними, пластик естественным образом будет прогибаться. Главное, чтобы он не порвался. Обычно программа делает так: экструдер проходит первую и вторую часть, затем штрихует область между ними по диагонали; потом проходит заново и штрихует область по диагонали под другим углом. Таких проблемных слоев, когда пластик прогибается, может быть от 3 до 5. После пяти слоев всё налаживается, и далее будет ровная печать.

Если это не ответственное место или его легко обработать наждачной бумагой и доработать, то можно использовать большие мосты.

Если это ответственное место или здесь по какой-то причине нужна точная печать, например будет сопряжение с другими деталями, то такое провисание, а оно может составлять для моста длиной 50 мм почти 5 мм (10 %), уже не подходит. Соответственно придется ставить больше таких поддержек.

Однако здесь мы сталкиваемся с непростой задачей: какое минимальное расстояние между поддержками должно быть, чтобы был соблюден баланс между тем, сколько у нас поддержек (ведь на их печать требуется время), и тем, насколько провисает пруток. Можно дать лишь ориентиры. Обычно, когда требуется совсем ровная поверхность, поддержки можно ставить на расстоянии порядка диаметра экструдированного прутка. Если при FDM-технологии обычно стоят сопла диаметром 0,4 мм, то можно ставить поддержки, например, через 0,6 мм.

Это будут не столбики, а стенки на расстоянии примерно 0,6 мм. Рекомендация для решения подобного рода следующая: если есть понимание, что у модели существуют проблемные места, вырежете эти проблемные места и постарайтесь напечатать их отдельно. Определите, подходит ли тот режим печати, который планируется использовать для всей модели, на этом конкретном месте.

Часто возникает вопрос: какое есть правило для определения того, нужно ставить поддержки или нет? Рассмотрим такой пример.

Допустим, нужно напечатать кубик. Кубик можно напечатать без поддержек, поскольку никаких проблем нет. Теперь кубик мы начинаем вращать. Допустим, подняли дно и повернули его на угол 30°. Потребуются поддержки или нет? Поддержки потребуются.

Минимальный угол, при котором можно печатать без поддержек, — 45°. Очень важно понять, почему именно 45°, а не просто запомнить, поэтому приведем еще один пример. При экструзионной печати из экструдера выталкивается пруток. Этот пруток имеет некую ширину. Далее рассмотрим стенку изделия, например стенку кубика.

У нас есть экструдированный приплюснутый цилиндр, на него опирается следующий цилиндр. Чтобы верхний цилиндр не падал с нижнего, нужно, чтобы он опирался на нижний не менее чем наполовину его ширины (рис. 3), т. е. чтобы верхний слой не менее чем наполовину опирался на нижний. Такое достижимо, если угол печати составляет 45°. Если угол меньше, то верхний слой опирается на нижний менее, чем наполовину, и он упадет.

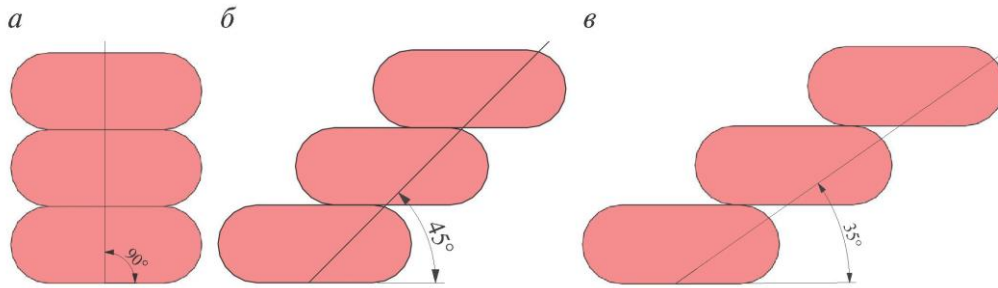


Рис. 3. Принцип определения минимального угла наклона, при котором можно печатать без поддержек

В качестве примера целесообразности использования поддержек рассмотрим поддержки между колесом и аркой колеса, которые очень тяжело удалить. Если встречается изделие такого плана, то проще будет напечатать отдельно колесо и автомобиль без колес. Поддержки будут на автомобиле под колесными арками. После удаления этих поддержек можно будет установить колесо.

Деламинация (расслаивание) и усадка

Проблемы деламинации связаны с напряжениями в материале, которые возникают из-за усадочных процессов, возникающих в изделии при печати. Кроме того, вероятность возникновения деламинации во многом зависит от технологических параметров процесса.

Для примера рассмотрим процесс печати на установке FDM с соплом диаметром 0,4 мм. В данном случае при печати изделия из экструдера выходит горячая пластиковая нить диаметром 0,4 мм. Если печатать изделие с толщиной слоя 0,1 мм, то горячая нить, выходящая из экструдера, сплющивается, и ее толщина уменьшается в 4 раза (рис. 4, а). В этом случае слои, из которых состоит изделие, формируются из приплюснутых цилиндров. Цилиндры из верхнего и нижнего слоя имеют достаточно большую площадь контакта, поэтому вероятность возникновения деламинации (расслоения) невысока. Если печатать изделие с толщиной слоя равной диаметру отверстия в сопле (0,4 мм), то горячая нить не деформируется (рис. 4, б). В этом случае слои, из которых состоит изделие, формируются из не приплюснутых цилиндров. Площадь контакта между цилиндрами существенно снижается, поэтому такие слои могут разойтись друг от друга при малейших нагрузках.

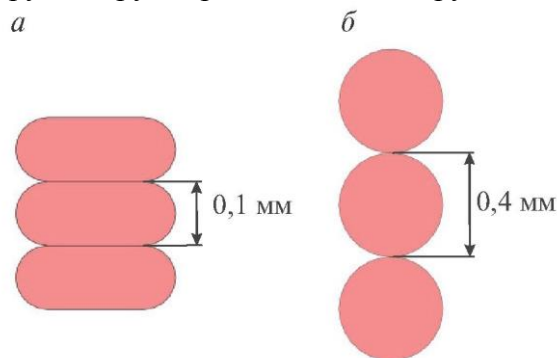


Рис. 4. Схема укладки слоев при печати соплом диаметром 0,4 мм с разной толщиной слоя:
а — толщина слоя 0,1 мм; б — толщина слоя 0,4 мм

Понятно, что существуют условия, когда слои будут достаточно хорошо держаться. Экспериментальные данные [3] показывают, что для предотвращения проблем с деламинацией толщина слоя печати не должна превышать половину диаметра отверстия сопла, поэтому при использовании сопла диаметром 0,4 мм, можно печатать с толщиной слоя до 0,2

мм. В этом случае изделие будет напечатано быстро, и в 90 % случаев деламинация не образуется.

Под усадочными процессами понимают совокупность явлений сокращения размеров и объема расходного материала (металла, пластика, фотополимера и др.) при его затвердевании и охлаждении. Для того чтобы понять, как усадочные процессы связаны с расслоением материала, вернемся к послойной печати, например, ABS-пластиком.

Печать выполняют на платформе, подогретой до температуры от 100 до 110 °С. В экструдере ABS-пластик нагревается до температуры от 240 до 250 °С. Нагретый пластик формирует слои на платформе принтера (рис. 5). В процессе охлаждения в каждом новом слое протекают усадочные процессы. Материал, из которого выполнен слой, уменьшается в объеме, что приводит к сжиманию слоя и сокращению его длины. Сокращение длины происходит в малых диапазонах и, как правило, незаметно при визуальном осмотре. Рассмотрим процесс послойной печати.

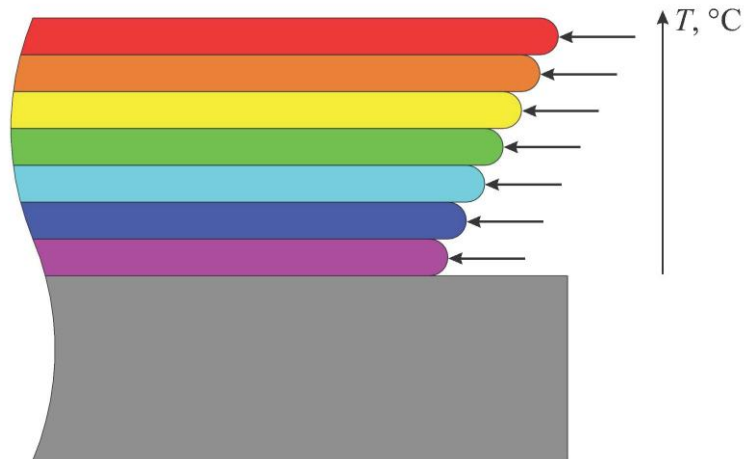


Рис. 5. Схема усадки

К тому времени, как верхний слой будет сформирован из пластика с температурой от 240 до 250 °С, нижний слой успевает остыть до температуры платформы, т. е. до 110 °С. Таким образом, возникает перепад температур по высоте изделия. Перепад температур приводит к тому, что в момент времени t все слои находятся на разных стадиях усадки, а значит, имеют едва заметное отличие по длине. При этом слои в процессе печати прочно склеиваются между собой. После завершения печати температура по высоте изделия выравнивается. Верхние слои изделия остывают и сжимаются последними, в это время нижние слои уже остыли и усадочные процессы в них завершены. В результате нижние слои сжимаются под действием усадочных процессов, протекающих в верхних слоях изделия. Усилия, которые возникают при сжатии верхних слоев, могут быть достаточно большими и приводят к деформации изделия, отрыву изделия от платформы или деламинации материала.

Минимальная толщина стенки

Один из важных параметров при 3D печати — это минимальная толщина стенки. Этот параметр особенно актуален для FDM- и фотополимеризационных технологий. Допустим, есть модель — дом с балконом с достаточно тонкими перилами. Если для печати используется сопло диаметром 0,4 мм и нужно напечатать перила толщиной 0,3 мм, то напечатать их не получится. В таком случае есть 2 варианта: либо перила будут толще, либо их в принципе не будет. Если экструдируется пруток диаметром 0,4 мм (шириной 0,4 мм), то возможно напечатать стенку толщиной 0,4 мм; если изменить толщину слоя печати (приплюсовать цилиндр), толщина стенки будет чуть шире, допустим, 0,5 либо 0,55 мм. В этом случае невозможно напечатать стенку толщиной 0,3 мм, потому что пластик никак не сможет сузиться до таких значений после экструзии. То же самое со стенками 0,2 мм, 0,1 мм или 0,05 мм. Разные программы по-разному подходят к решению этой проблемы. Некоторые считают, что лучше

напечатать хоть что-то и используют округление. Если программа выбирает, куда округлять 0,3 мм — в сторону 0,4 мм либо 0, то есть вариант вообще не печатать. Если значение — 0,2 мм, здесь уже могут быть проблемы. Какое-то программное обеспечение решит печатать, какое-то решит не печатать. Если толщина — 0,1 мм, скорее всего элемент не будет печататься.

При печати стакана толщиной стенки 0,4 проблем не возникнет.

Если увеличить толщину стенки до 0,6 мм, т. е. в 1,5 раза, то получим невозможную толщину экструзии. На практике получим либо 0,4 мм, т. е. один контур за один проход, либо 0,8 мм, два раза по 0,4. Это будет внешний и внутренний контур, и он будет больше 0,6 мм. Таким образом, между 0,4 и 0,8 мм есть недостижимые показатели: стенки толщиной 0,5, 0,6 и 0,7 мм.

Напечатать, например, толщину стенки стакана 0,9 мм скорее всего не получится. При печати будет стенка 0,4 мм, пустота толщиной 0,1 мм и дальше снова стенка 0,4 мм, т. е. $0,4 + 0,1 + 0,4$. Будут напечатаны два независимых друг от друга цилиндра. Где-то сверху программа попытается их заштриховать. Допустим, ей это удастся. Однако эти стенки можно будет легко прогнуть и деформировать пальцами, поэтому при печати модели с достаточно тонкими стенками нужно думать о том, как они будут выполнены. Если использовать программное обеспечение, которое позволяет посмотреть, как будет печататься каждый слой, можно открыть нужный слой и проверить, будут соединены стенки или нет. Допустим, можно увеличить пространство между внешним и внутренним контуром в стенке стакана. Получается $0,4 + 0,2 + 0,4$.

Общая ширина при этом — ровно 1 мм. Печать также затруднительна, как и в первом случае, но программа может сделать хитрее. Она может сделать внешний контур. Поскольку программное обеспечение нацелено на лучший внешний вид внешнего контура, внутренний контур оно может не делать сплошным, а пытаться заштриховывать, т. е. будет внешний контур и штриховка. Получится очень рваный внутренний контур, но программное обеспечение будет следовать желанию оператора и сделает толщину стенки стакана ровно 1 мм.

Таким образом, минимальная толщина стенки при печати по технологии FDM — это диаметр экструдированного прутка. Если используется сопло 0,4 мм, из него экструдирован минимально 0,4 мм. Если мы говорим про печать металла, то минимальная толщина стенки составляет 0,2 мм, а экспериментально можно печатать толщину стенки 0,1 мм. Размер каждой сферической части составляет от 40 до 80 мкм, потому что там используется порошок. Среднее значение — 60 микрон. Когда есть два элемента, которые сплавляются, получается минимальная толщина стенки 100 мкм.

При экструзии 0,4 мм возможен такой эффект: когда что-то выдавливается, оно становится шире, чем диаметр сопла. По нашим экспериментальным результатам, при размере сопла 0,4 мм минимальная толщина стенки, т. е. минимальная толщина экструдированного прутка, составляет 0,55 мм. Если быстро печатать, т. е. быстро тянуть, вытягивать, получается 0,5 мм. Это всё равно больше, чем 0,4 мм, поэтому, если печатать модель с толщиной стенки 0,5 мм, ее можно напечатать за один проход. Если печатать деталь с толщиной стенки 0,7 мм, толщина экструдированного прутка будет 0,5 мм. Если же толщина стенки — 1,1 мм или 1,2 мм, то будет две стенки, независимые друг от друга, по 0,5 или 0,55 мм, и пустота между ними, и они будут легко деформироваться.

Важно понимать, как работает сама технология, как работает оборудование. На данный момент 3D принтеры не являются таким черным ящиком, куда можно просто отправить модель, ни о чем не думать и получить хорошее изделие. Это сложное оборудование. Нужно понимать особенности технологии, чтобы получать хороший результат, и проектировать изделия под изготовление аддитивными технологиями. Большинство специалистов проектируют изделия под изготовление субтрактивными технологиями: или под штамповку, или под фрезеровку или токарную обработку, — и мало кто понимает, какие есть нюансы и возможности при использовании аддитивных технологий.

Работа с разными видами материала

Рассмотрим стандартные типовые материалы: ABS-, PLA- и PETG-пластики (полиэтилентерефталатгликоль). Самыми популярными материалами при FDM-печати являются ABS- и PLA-пластик. Каждый из этих материалов имеет свои свойства, но обычно их противопоставляют друг другу. Экспериментальным путем доказано, что ABS-пластик имеет большую усадку, чем PLA-пластик, и поэтому им сложнее печатать. Однако он имеет лучшие конструкционные свойства.

ABS-Пластик пластичный, его можно его гнуть, при этом он не трескается и не разрушается. PLA-Пластик более хрупкий, поэтому при попытке его согнуть, он трескается. PETG-Пластик (полиэтилентерефталатгликоль) — это материал, который совмещает в себе свойства ABS- и PLA-пластика.

Если необходимо напечатать изделие в основании больше, чем 150×150 мм (тем более 200×200 мм), значительно проще печатать PLA-пластиком. Он имеет небольшую усадку, поэтому края модели не будут отрываться от платформы в процессе печати. При использовании ABS-пластика первый слой рано или поздно оторвет от платформы под действием усадочных процессов.

В настоящее время существует от 15 до 20 различных производителей пластика для 3D печати из России, Европы, Китая и др. Однако свойства ABS-пластика могут отличаться даже у одного и того же производителя в зависимости от партии (больше свойственно для отечественных материалов). Бывают разновидности ABS-пластика у одного производителя: с меньшей усадкой или с большей усадкой; менее пластичный или более пластичный, — поэтому всегда лучше провести эксперимент и посмотреть, что лучше, ведь кто-то печатает объекты меньше, а кто-то больше; кто-то с тонкими стенками, а кто-то с более крупными. Иногда требуется визуальный макет, а иногда мастер-макет. Иногда нужно сделать мастер-модель большого размера и склеивать элементы друг с другом.

При склеивании лучше работает ABS-пластик: можно просто капнуть ацетоном и приложить детали друг к другу, и они склеятся. Склеить PLA-пластик значительно сложнее, но он дает меньшую усадку: можно напечатать несколько условно кубиков размерами 200×200 мм, а потом соединить — и получится почти идеальный стол.

Слайсеры для FDM-принтеров

Когда мы говорим об аддитивном производстве, обычно подразумеваем уже не непосредственно печать на 3D принтере, а неполный цикл — от момента подготовки stl-файла, проверки его на ошибки, разбивки на слои (слайсинг) до печати непосредственно на 3D принтере и постобработки. Так вот, процесс слайсинга (разбиения на слои) — это процесс, который проходит непосредственно перед 3D печатью.

Важно отметить, что многие эксперты считают, что программное обеспечение 3D принтера значительно важнее, чем механика самого 3D принтера. От того, какое программное обеспечение используете, качество печати зависит больше, чем непосредственно от 3D принтера. Выделим несколько причин данного мнения.

Во-первых, существует огромное количество самых разнообразных программных продуктов, таких как Slic3r, Cura, KISSlicer, Simplify3D и др. Важно, чтобы программный продукт обрабатывал любые модели, которые в него загружают, т. е. любые stl-файлы. Есть разница для печати и программ, когда можно загрузить сферу, цилиндр, модель, в которой от 100 до 200 тысяч треугольников, а когда сложную механическую инженерную модель, многополигональную, на 2 млн треугольников, или художественную модель, детализированную фигуру человека или какого-то живого существа, тогда возникают миллионы треугольников и некоторые слайсеры попросту не справляются с такими stl-файлами.

Во-вторых, может ли слайсер работать с файлами с ошибками в stl. Ошибки бывают разного типа. Одно дело, когда есть разрыв в геометрии, т. е. когда присутствуют пустоты, треугольники и т. п. Это сложные ошибки, и слайсер может не работать, может выдавать некорректный результат для таких файлов. Однако когда есть более простые ошибки, напри-

мер, в одной точке сходится разное количество — 5 треугольников либо в одном из треугольников эта точка не указана, но нет пустот, тогда предполагается, что слайсер справится с такой геометрией.

В-третьих, скорость, с которой происходит слайсинг. Существуют современные слайсеры, которые работают за секунды, т. е. отличие в скорости может составлять 100 раз. Какой-то слайсер может отработать за 5–6 с, какой-то может работать 600 с, а это уже 10 мин; некоторые еще дольше.

Последний пункт — это то, насколько грамотно происходит непосредственно слайсинг и процесс движения экструдера. Приведем пример: есть заказ построить две башни с одним общим основанием. Их печатают одновременно, и башни отстают, допустим, от 80 до 100 мм друг от друга. Предполагается, что эти башни будут полностью заполненными от 40 до 60 %. Внутри они полностью заштрихованы.

Рассмотрим один слой. Экструдер должен пройти контур, после этого заштриховать одну башню, потом перейти ко второй, обвести контур и заштриховать вторую башню. Это логичный порядок обхода. Некоторые слайсеры предлагают обвести первый контур, перейти ко второй башне, обвести у нее контур, вернуться, заполнить первую половину. Поскольку там канал в середине, они как-то обойдут его, заполнят одну половину, перейдут ко второй башне, заполнят первую половину второй башни, вторую половину первой башни и вторую половину второй башни. В этом случае, во-первых, снижается скорость печати, увеличивается время, поскольку есть пустые прогоны экструдера. И во-вторых, самое главное — снижается качество, поскольку когда происходит переход между башнями, тогда экструдер должен делать либо ретракт — затягивание пластика наверх, либо, при неточной настройке, пластик будет стекать, капать, растягиваться во время перехода от одной башни к другой.

Качество того, насколько грамотно проведен слайсинг, напрямую влияет на финальное качество печати. Иногда то, как мы определили предыдущий порядок неправильным — контур 1, контур 2, на самом деле может быть правильным для некоторых случаев печати. Так если печатается башня диаметром от 1 до 2 см, то контур может быть обведен за 2 с, и в момент начала штриховки он еще не застыл. В этом случае удобно обвести первый контур, переключиться на вторую башню, обвести ее, вернуться, заштриховать; тогда бортик — контур, который удерживает внутреннюю штриховку с внешней стороны, будет лучше и качество печати будет лучше.

Обратим еще раз внимание на то, что программное обеспечение важнее, чем механика 3D принтера. Слайсер, тот же Simplify3D, позволяет работать с 99 % FDM-принтеров, он выдает результат лучше, чем другие слайсеры либо программное обеспечение, которое идет в комплекте с принтерами, поэтому обращайтесь внимание на слайсер, а также на то, как печатаются слои. Именно это позволит увеличить скорость печати и превзойти по качеству конкурентов.

«Твердые» аддитивные технологии

«Твердые» технологии аддитивного производства — это технологии, которые используют твердый расходный материал. Выше уже подробно говорили об экструзионной технологии, или FDM-технологии.

Рассмотрим так называемую технологию LOM на примере печати на бумаге. В технологии Laminated object manufacturing (LOM) для печати используются листы, которые обрезаются и склеиваются друг с другом (рис. 6). Материалами выступают бумага или ее аналоги, а также листы металла.

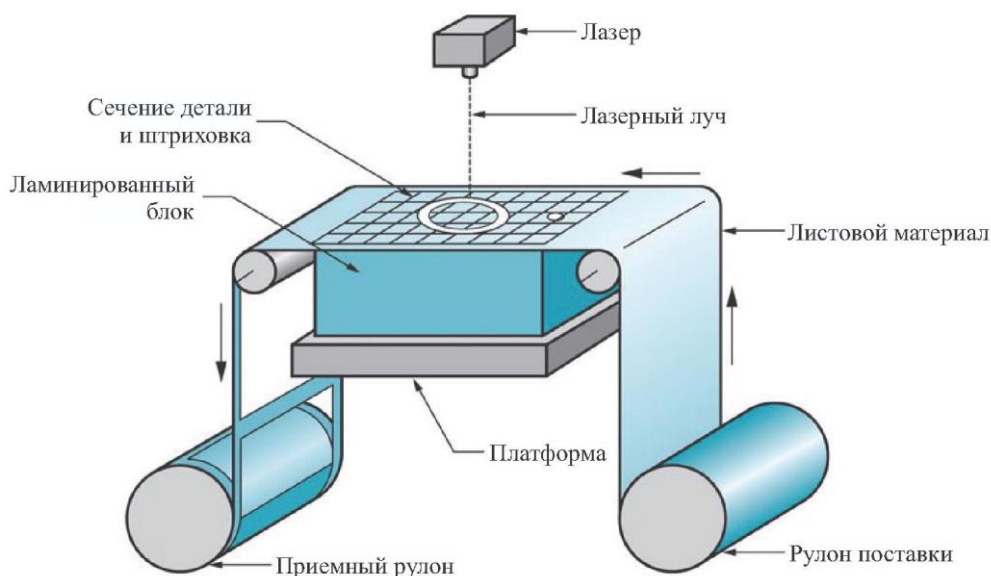


Рис. 6. Схема процесса печати по технологии LOM

В нашем примере используется лист бумаги, который изначально кладется на основание, на платформу. После этого используется нож или лазер для того, чтобы вырезать и отделить будущее изделие от того, что будет являться поддержкой. Данная манипуляция немного похожа на технологию фрезерования, когда убираем лишнее, но в данном случае мы очерчиваем границу. После этого наносят клей и кладут следующий лист, и процесс повторяется [3].

Применение бумаги позволяет получать многоцветные (полноцветные) образцы, т. е. использовать печатающую головку с цветным картриджем, как в обычном 3D принтере. В усложненном варианте технология уже выглядит так: кладем бумагу, приклеиваем ее к предыдущему слою, после этого проходит цветная головка и окрашивает данный слой, потом проходит головка и отрезает ненужное, после наносится клей, следующий лист бумаги, следующий слой, и всё повторяется. Интересный факт: именно с применением LOM-технологии лучше всего получаются человеческие лица или маски.

6. Стереолитография (SLA), принципы фотополимерной печати

Лазерная стереолитография (SLA) — технология 3D печати, основанная на послойном отверждении жидкого материала (фотополимера) под действием луча лазера. Используется в промышленных 3D принтерах компаний 3D Systems и Uniontech.

Фотополимер — это вещество, изменяющее свои свойства под воздействием ультрафиолетового света. В обычном состоянии фотополимер жидкий, а при попадании под УФ-излучение приобретает прочность. Продолжительность облучения и длина волны УФ-излучения рассчитывается в зависимости от материала, размеров объекта и условий окружающей среды.

Принцип работы установки SLA заключается в следующем (рис.): в емкость с жидким фотополимером помещается сетчатая платформа, на которой будет происходить выращивание прототипа.

Изначально платформа устанавливается на такой глубине, чтобы ее покрывал тончайший слой вещества, толщиной всего от 0,05 до 0,13 мм.

По сути это и есть толщина слоя в лазерной стереолитографии. Далее включается лазер, воздействующий на те участки полимера, которые соответствуют стенкам заданного объекта, вызывая их затвердевание. После этого вся платформа погружается ровно на один слой, т. е. на глубину от 0,05 до 0,13 мм. По завершении построения объект погружают в ванну со специальным составом для удаления лишних элементов и полной очистки. Далее выполняют финальное облучение светом для окончательного отверждения изделия. Как и многие другие методы 3D прототипирования, SLA (лазерная стереолитография) требует возведения поддерживающих структур, которые вручную удаляются по завершении строительства.

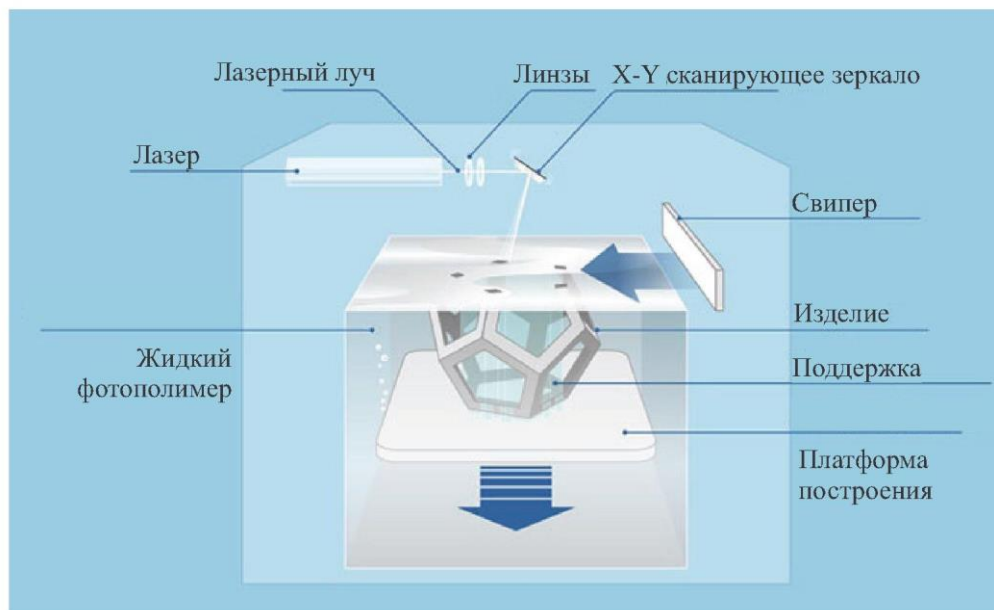


Рис. Схематическое представление технологического процесса SLA

Необходимо обратить внимание на то, что существует прямая и обратная стереолитография. При прямой стереолитографии источник УФ-излучения расположен сверху, а модель в процессе печати постепенно погружается в ванну с полимером. При обратной стереолитографии источник излучения, тот же лазер, находится снизу, под ванной с прозрачным дном, платформа в процессе печати постепенно поднимается от дна ванны с шагом равным толщине слоя печати.

Обсуждая технологию SLA, невозможно забыть о технологии печати с применением цифровой обработки света Direct Light Processing (DLP). Многие считают, что DLP это не

SLA, однако они очень близки и их можно объединить. Мы будем рассматривать эти технологии в сравнении друг с другом. Цифровая обработка света (DLP) использует другой источник ультрафиолетового света. Вместо лазеров DLP-принтеры оснащены УФ-проекторами, которые работают с использованием микрозеркал для управления проецируемым светом (рис.).

Поперечные сечения каждого слоя проецируются один раз, засвечивая весь слой за один этап. При этом, по сравнению со SLA, ухудшается разрешение проекции, а используемые проекторы могут быть громоздкими и дорогими. Тем не менее технология DLP обеспечивает более высокую скорость печати, т. к. весь слой может быть отвержден за один акт засветки.

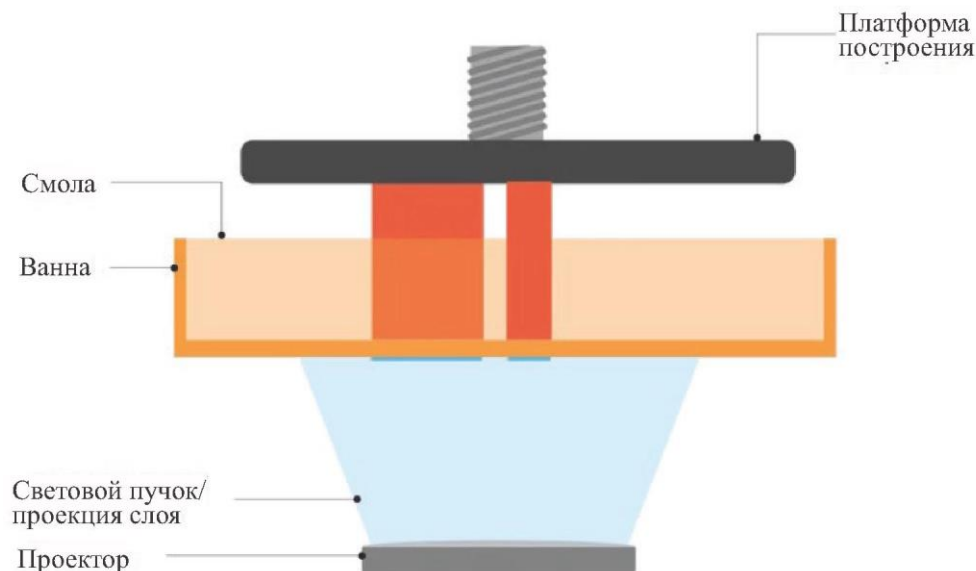


Рис. Схематическое представление технологического процесса DLP

В характеристиках 3D принтеров разрешающей способности уделяют больше всего внимания, но это часто приводит к путанице. Процессы SLA и DLP характеризуются разными параметрами, что затрудняет сравнение принтеров только по числовым характеристикам.

В 3D печати нужно учитывать три измерения: два плоскостных двумерных измерения (X и Y) и одно вертикальное измерение Z, с помощью которого и осуществляется трехмерная печать. Разрешающая способность измерения Z определяется толщиной слоя, который может напечатать 3D принтер. Принтеры на основе технологий SLA и DLP отличаются одной из лучших разрешающих способностей Z по сравнению с другими процессами, что позволяет печатать слои с минимальной толщиной. Как правило, пользователи могут установить высоту слоя на уровне от 25 до 300 мкм, благодаря чему разработчики могут достичь компромисса между уровнем детализации и скоростью.

В стереолитографических 3D принтерах разрешающая способность XY определяется на основании размера лазерного пятна и величины шагов, с помощью которых можно управлять лучом. Например, в 3D принтере Form 3 на основе технологии LFS установлен лазер с размером пятна в 85 мкм, но благодаря постоянному процессу линейного сканирования, лазер может двигаться с меньшим шагом и принтер может на постоянной основе печатать модели с разрешающей способностью XY в 25 мкм (рис 9, а).

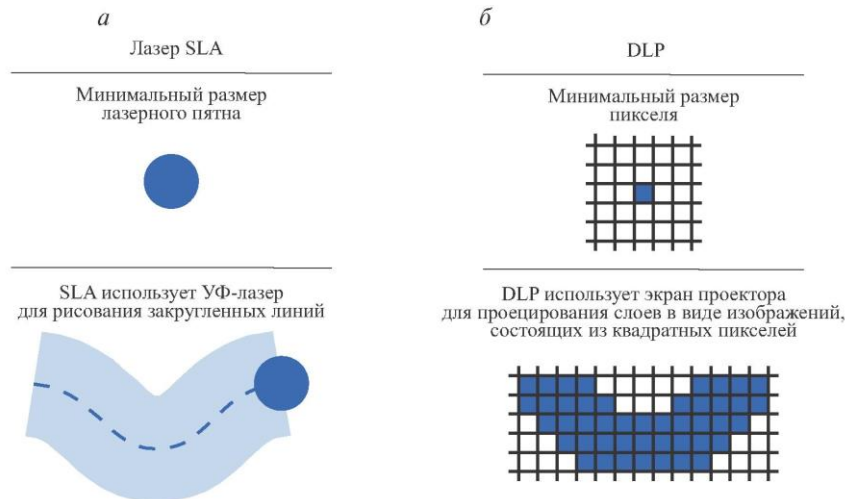


Рис. Пример разрешающей способности 3D принтеров, работающих по технологии SLA (а) и DLP (б)

В DLP-принтерах разрешающая способность XY определяется по размеру пикселя — наименьшей детали, которую проектор может воспроизвести в одном слое. Она зависит от разрешающей способности проектора (самая распространенная — Full HD (1080p)) и его удаленности от оптического стекла, поэтому большинство настольных DLP-принтеров имеет постоянную разрешающую способность XY от 35 до 100 мкм (см. рис 3.9, б).

К основным достоинствам технологий SLA и DLP относят:

- изготовление моделей любой сложности (тонкостенные детали, мелкие детали);
- легкую обработку изготовленного прототипа;
- высокую точность построения и высокое качество поверхности;
- благодаря свойствам применяемых полимеров, использование выращенного прототипа в качестве готового изделия.

Большинство 3D принтеров, работающих по технологии SLA, создают объекты размером примерно 50450460 см, но есть и исключения. Американская компания 3D Systems создала аппарат, способный создавать объекты размером значительно больше классических — 150047504550 мм, что раскрывает новые горизонты применения данной технологии.

Поскольку получить пластиковую модель практически любой сложности для любых целей можно в считанные часы, SLA- и DLP-технологии становятся незаменимым помощником в различного рода научно-исследовательских изысканиях. Модели обладают достаточной прочностью, а также прозрачностью, поэтому имеется возможность визуализации газо- и гидродинамических потоков внутри моделей. В челюстно-лицевой хирургии и ортодонтии, с появлением SLA- и DLP-технологии, сформировалось новое направление: пациенту делают магниторезонансную томографию проблемного участка, из нее формируется компьютерная 3D модель, а по ней выращивается реальная 3D модель костной ткани. Таким образом, доктор уже на следующий день имеет в своем распоряжении модель костей или зубов реального пациента.

Скульпторы, модельеры и ювелиры, благодаря SLA- и DLP-технологии, выходят на новый уровень производства. Процесс 3D печати прототипов значительно уменьшает время на тестирование экспериментальных образцов, что благоприятно влияет на скорость и качество создания будущего ювелирного изделия или скульптуры. SLA-Технология очень хорошо подходит для этого: модели прочные, легко красятся.

При возникновении потребности в получении металлической детали, применяется следующая технология: SLA- или DLP-модель заливается формовочной смесью, затем прокаливается при высоких температурах (до 1000 °C). При этом пластик полностью выгорает, а на

его место в образовавшуюся форму под вакуумом заливается металл. После его застывания форма разрушается и деталь извлекается.

PolyJet

PolyJet — технология 3D печати, основанная на послойном отверждении жидкого фотополимерного материала под воздействием ультрафиолетового излучения. Используется в 3D принтерах серии Objet компании Stratasys (рис.).



Рис. 3D принтер Objet Eden350

Печатающий блок 3D принтера тонкими слоями (от 16 до 30 мкм) распыляет материал модели и материал поддержки согласно данным математической 3D модели (рис.). Сразу же после нанесения каждый слой полимеризуется светом ультрафиолетовой лампы. В итоге получается объект, не требующий какой-либо дополнительной обработки поверхности. Модель, отпечатанную по технологии PolyJet, можно использовать после завершения процесса печати.

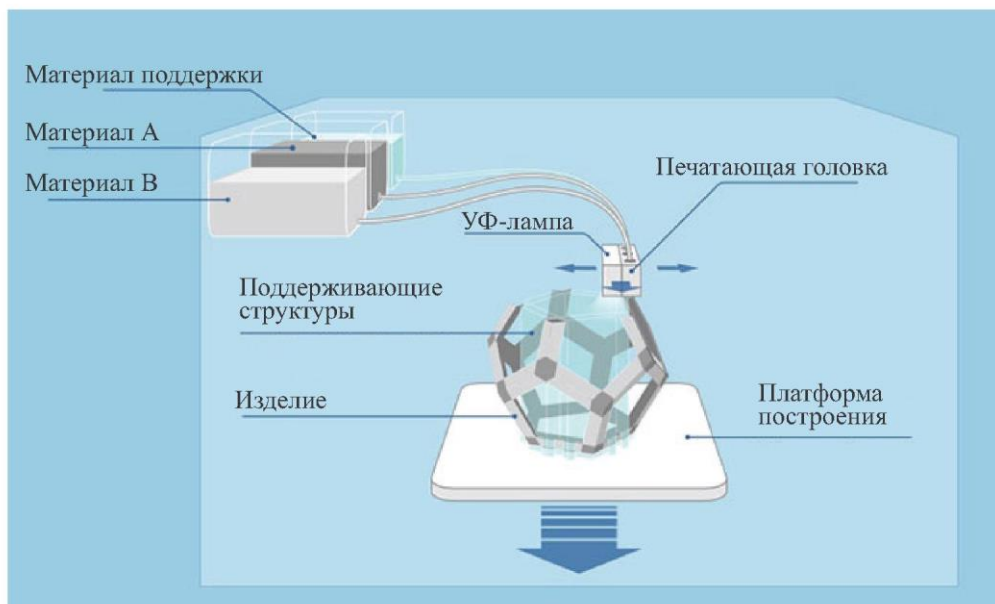


Рис. Схематическое представление технологического процесса PolyJet

Технология PolyJet обеспечивает высокую точность построения: от 0,02 до 0,085 мм для объектов размером до 50 мм. Для объектов более 50 мм точность построения варьируется в пределах от 0,1 до 0,2 мм.

Точность печати зависит от геометрии модели, параметров ее построения и ориентации, а также используемого материала.

В процессе построения сложных изделий часто присутствуют различные полости, нависающие конструкции. Для предотвращения их обрушения все пустоты под такими элементами заполняются специальным материалом — материалом поддержки. В технологии PolyJet используется универсальная вымываемая поддержка, которая легко удаляется водой в специальной станции промывки.

Данная технология идеально подходит для изготовления прототипов продукции, тестовых моделей, выжигаемых мастер-моделей, образцов для литья в силикон. Объекты, выраженные по технологии PolyJet, обладают различными свойствами в зависимости от используемого материала. Материалы различаются между собой по механическим, термическим, электрическим и химическим характеристикам.

Выращенные прототипы легко клеить, шлифовать, сверлить и пилить, а также красить, грунтовать и наносить различные покрытия (никелировка, гальванопластика и т. п.).

«Порошковые» технологии аддитивного производства

В данном разделе мы рассмотрим три технологии:

- селективное лазерное сплавление — SLM (Selective Laser Melting);
- технологию спекания порошков — SLS (Selective Laser Sintering);
- технологию изготовления песчаных форм (Binder Jetting).

Селективное лазерное сплавление (SLM)

SLM — Selective laser melting — инновационная технология производства сложных изделий посредством лазерного плавления металлического порошка по математическим CAD-моделям (3D печать металлом). С помощью SLM создают как точные металлические детали для работы в составе узлов и агрегатов, так и неразборные конструкции, меняющие геометрию в процессе эксплуатации.

Технология использует мощные лазеры для создания трехмерных физических объектов. Данный процесс успешно заменяет традиционные методы производства, т. к. физико-механические свойства изделий, построенных по технологии SLM, зачастую превосходят свойства изделий, изготовленных по традиционным технологиям.

Процесс печати начинается с разделения цифровой 3D модели изделия на слои толщиной от 20 до 100 мкм в целях создания 2D изображения каждого слоя изделия. Отраслевым стандартным форматом является STL-файл. Он поступает в специальное машинное программное обеспечение, где происходит анализ информации и ее соизмерение с техническими возможностями машины. На основе полученных данных запускается производственный цикл построения, состоящий из множества циклов построения отдельных слоев изделия. Цикл построения слоя состоит из типовых операций:

- нанесения слоя порошка заданной толщины (от 20 до 100 мкм) на плиту построения, закрепленную на подогреваемой платформе построения;
- сканирования лучом лазера сечения слоя изделия;
- опускания платформы вглубь колодца построения на величину, соответствующую толщине слоя построения.

Процесс построения изделий осуществляется в камере SLM-машины (рис.), заполненной инертным газом аргоном или азотом (в зависимости от типа порошка, из которого происходит построение). Основной расход инертного газа происходит в начале работы, при продувке камеры построения, когда из нее полностью удаляется воздух (допустимое содержание кислорода — менее 0,15 %).

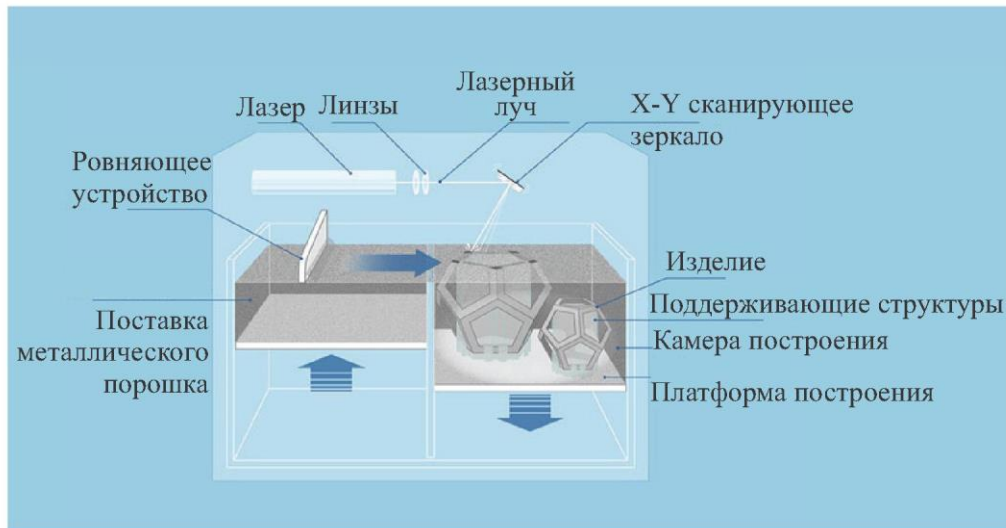


Рис. Схематическое представление технологического процесса SLM

Построенное изделие вместе с плитой извлекается из камеры SLM-машины, после чего изделие отделяется от плиты механическим способом. От построенного изделия удаляются поддержки, производится его финишная обработка.

Практически полное отсутствие кислорода позволяет избегать окисления расходного материала, что делает возможной печать такими материалами, как титан.

Установки SLM помогают решать сложные производственные задачи промышленных предприятий, работающих в авиакосмической, энергетической, машиностроительной и приборостроительной отраслях. Установки также применяются в университетах, конструкторских бюро, используются при проведении научно-исследовательских и экспериментальных работ.

Основные достоинства технологии SLM:

- решение сложных технологических задач;
- производство изделий со сложной геометрией, с внутренними полостями и каналами для охлаждения без изготовления дорогостоящей оснастки;
- уменьшение массы изделий.

Построение происходит с помощью послойного добавления в тело изделия необходимого количества материала. При построении, от 50 до 97 % порошка остается несплавленным и после просеивания пригоден к повторному использованию. Материал, задействованный на построение поддержек, утилизируется вместе с порошком, не прошедшим операцию просеивания.

Области применения SLM:

- изготовление функциональных деталей для работы в составе различных узлов и агрегатов;
- изготовление сложных конструкций, в т. ч. неразборных, меняющих в процессе эксплуатации геометрию, а также имеющих в своем составе множество элементов;
- производство формообразующих элементов пресс-форм для литья термопластов и легких материалов;
- изготовление технических прототипов для отработки конструкции изделий;
- создание формообразующих вставок для кокильного литья;
- производство индивидуальных стоматологических протезов и имплантатов;
- изготовление штампов.

Технология спекания порошков (SLS)

SLS — Selective Laser Sintering — технология аддитивного производства, основанная на послойном спекании порошковых материалов (полиамиды, пластик) с помощью луча лазера.

Процесс печати по технологии Selective Laser Sintering заключается в послойном спекании частиц порошкообразного материала до образования физического объекта по заданной CAD-модели. Спекание материала происходит под воздействием луча одного или нескольких лазеров. Перед началом процесса построения расходный материал разогревается до температуры близкой к температуре плавления, что облегчает и ускоряет работу SLS-установки.

Процесс построения по технологии SLS аддитивен, т. е. «выращивание» изделия происходит слой за слоем снизу вверх. Специальный равняющий механизм подает порошок из камеры с расходным материалом в камеру построения, затем лазер «прожигает» слой изделия на основе компьютерной модели, после этого в камеру построения подается следующий слой материала. Процесс повторяется до тех пор, пока объект не будет полностью построен. В ходе печати платформа построения постоянно опускается вниз (шаг равен толщине печатного слоя). Таким образом, зона взаимодействия материала и луча лазера всегда находится на одном уровне (рис.).

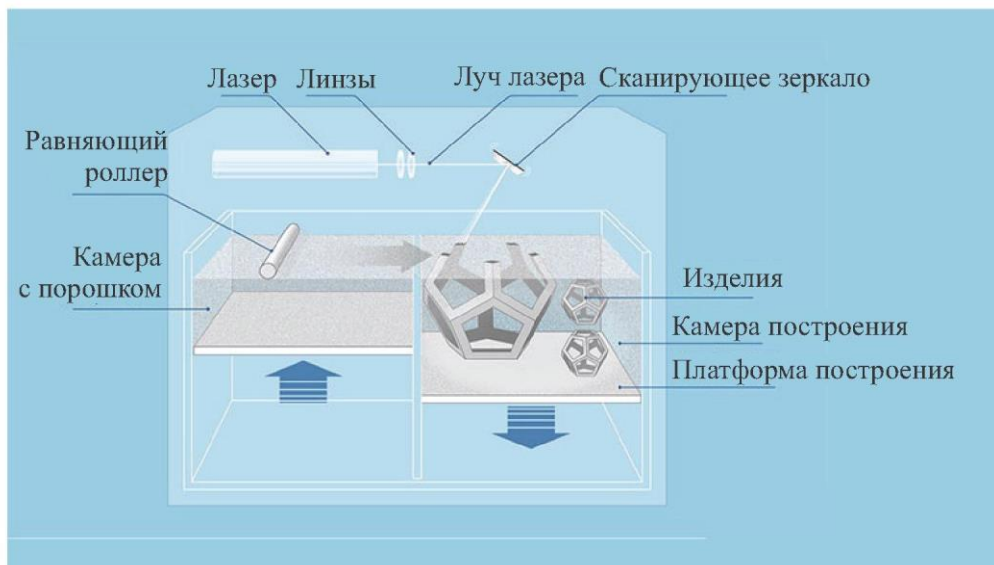


Рис. Схематическое представление технологического процесса SLM

SLS-Процесс не нуждается в использовании специальных материалов поддержки. В качестве опорных структур для строящейся модели здесь выступает неиспользованный порошок (который после извлечения готового объекта очищается и может снова использоваться для печати). 3D Принтеры, работающие по технологии SLS, используют для печати различные виды порошковых пластиков.

Технологию SLS часто путают с другой схожей порошковой технологией 3D печати — SLM. Главное различие этих процессов состоит в том, что SLS-технология производит лишь частичное плавление поверхности частиц, необходимое для спекания их вместе. В свою очередь технология SLM (сплавление материала) обеспечивает полную лазерную плавку частиц, необходимую для построения монолитных изделий.

Достоинства технологии селективного лазерного спекания:

- прекрасные механические свойства готовой продукции — высокая прочность, точность построения, качественные поверхности;
- оборудование для SLS-печати оснащается большими камерами построения (до 750 мм), что позволяет изготавливать большие изделия или целые партии небольших объектов за одну печатную сессию;
- не требует материала поддержки — процесс практически безотходен, неиспользованный материал может повторно использоваться для печати;

- высокая производительность — SLS-принтеры не нуждаются в полном расплавлении частиц материала, что позволяет им работать гораздо быстрее других порошковых 3D принтеров.

К недостаткам технологии селективного лазерного спекания можно отнести высокую стоимость расходных материалов и оборудования.

7. Технологии оптического 3D-сканирования. Бесконтактное сканирование лазерным 3D-сканером

Трехмерное сканирование представляет собой технологию перенесения физических параметров объекта в цифровой формат в виде объемной модели и появившуюся в 60-х годах 20-го века.

Первые образцы 3D-сканеров были довольно просты и не обладали широким функционалом. Постепенно они усложнялись и совершенствовались, позволяя добиваться все более четкого изображения объекта.

3D-сканер – это устройство, которое исследует какой-либо объект, оцифровывая его с помощью датчиков, и использует полученную информацию для создания трехмерной модели. Таким образом, 3D-сканер создает цифровую копию физического объекта любой конфигурации и степени сложности. Этим он принципиально отличается своих предшественников – обычных сканеров, способных лишь считывать информацию с документов и фото.

Сам процесс 3D-сканирования может происходить по-разному – в зависимости от вида 3D-устройства и применяемой технологии, а также от того, какой объект требуется обработать с его помощью – движущийся или статичный.

Существует два основных вида 3D-сканеров – лазерные и оптические. Их принципиальное отличие состоит в том, как и с помощью чего происходит считывание данных.

Лазерное 3D-сканирование происходит с использованием лазера и может осуществляться как на ближних, так и на дальних расстояниях от объекта.

В большинстве своем лазерные 3D-сканеры работают по принципу триангуляции, когда камера находит луч на поверхности объекта и измеряет расстояния до него, после чего создается облако точек, каждая из которых имеет свои координаты в пространстве, и строится 3D-модель объекта. Их достоинствами являются доступная цена и простота в применении в совокупности с высокой точностью сканирования. Из недостатков можно отметить ограничения по удаленности и размерам сканируемого объекта.

Другой тип лазерных сканеров работает по принципу так называемого лазерного дальномера, измеряя время отклика луча от поверхности объекта. Данный тип сканеров широко применяются там, где необходимо создавать 3D-модели различных зданий и сооружений. Их нецелесообразно использовать на небольших расстояниях, так как в таких случаях время отклика очень мало и точность данных снижается. Так же этот вид сканеров отличается высокой скоростью сканирования и детализацией получаемых изображений.

Недостатком лазерных 3D-сканеров является невозможность их применения на движущихся объектах. В этом случае необходимо использовать оптические 3D-сканеры, которые снимают одной или несколькими камерами с разных ракурсов подсвеченный специальным проектором объект. На основе полученной картинки и строится его трехмерное изображение.

Ограничением для применения этой технологии служат отражающие и пропускающие свет поверхности – блестящие, зеркальные или прозрачные.

Проводить сканирование любого объекта можно как контактным, так и бесконтактным способом. В первом случае необходимо активное взаимодействие с объектом 3D-сканирования, во втором – нет. Оба этих метода имеют свои преимущества и недостатки.

Контактные 3D-сканеры имеют механический щуп со специальным датчиком, который проводит замеры параметров объекта и собранную информацию передает на устройство обработки данных. Для этого исследуемый объект помещают на специальную поверхность и закрепляют. Такой плотный физический контакт дает возможность максимально точно определить и построить 3D-модель объекта, однако, есть риск повреждения сканируемого изделия.

Бесконтактные 3D-сканеры – это устройства, способные осуществлять 3D-сканирование, находясь на расстоянии от объекта. Особенно это актуально для объектов, расположенных в труднодоступных местах.

Поток излучения (ультразвук, свет, рентгеновские лучи или лазерное излучение) направляется на объект и отражаясь от него, распознается 3D-сканером. Они схожи по принципу действия с видеокамерой и могут требовать использования дополнительных устройств для лучшего освещения.

Бесконтактные трехмерные сканеры бывают 2-х видов:

- активные – работают при помощи направленного на объект луча лазера или структурированного света, которые, отражаясь, дают информацию о местонахождении предмета в виде координат.

- пассивные – используют времяпролетные дальномеры, которые считывают время и расстояние, которое проходит лазерный луч до предмета, и так по каждой точке в пространстве, что в итоге позволяет точно воссоздавать его трехмерное изображение.

Очень востребованными и распространенными являются настольные 3D-сканеры, поскольку они в большинстве своем просты и безопасны в эксплуатации, не требуют каких-то специальных технических навыков и стоят довольно дешево.

3D-сканеры по принципу применения делятся на:

- ручные – удобные и простые модели, которыми легко пользоваться, так как они довольно компактны и не требуют особых навыков эксплуатации. Однако, и их технические возможности несколько ограниченными.

- портативные – применяются в основном для работы на выезде, отличаются повышенной мобильностью.

- настольные – имеют расширенную функциональность и применяются для создания точных 3D-моделей объектов.

- стационарные – применяются на производстве, различных предприятиях, так как могут сканировать сразу большое количество однотипных объектов. Устанавливаются на специальных поворотных столиках.

Преимущества 3D-сканеров:

- возможность сканирования объектов, расположенных на удаленном расстоянии и в недоступных для присутствия местах;

- обладают возможностью передавать не только цвета, но и текстуру поверхности;

- существенно ускоряют процесс получения данных с любого объекта, даже имеющего сложную геометрическую форму;

- разнообразие моделей позволяет подобрать наиболее удобный вариант 3D-сканера.

Недостатки 3D-сканеров:

- некоторые виды сканеров не способны распознавать прозрачные или черно-белые предметы. В этом случае требуется их предварительная подготовка (обработка специальным матирующим составом);

- некорректное отображение сложных объектов, с большим количеством вставок и перегородок;

- для получения качественного результата требуют умений и навыков работы с определенными компьютерными программами по созданию 3D-моделей.

При необходимости создания высокоточных и качественных трехмерных копий объектов 3D-сканер является наиболее простым инструментом для реализации поставленной задачи. Он дает возможность работать практически в любых условиях: в специальных лабораториях и вне оборудованных рабочих мест, с любыми предметами по виду и размеру.

При выборе 3D-сканера необходимо ориентироваться на следующие параметры:

- точность 3D-сканирования;

- разрешающая способность;

- диапазон работы устройства (насколько близко/далеко может находиться устройство от объекта 3D-сканирования);

- поле 3D-сканирования (диагональ рабочей зоны);

- портативность, мобильность устройства;
- время необходимое на подготовку 3D-сканера к работе, а также длительность самого процесса непрерывной оцифровки.

Трехмерные сканеры востребованы во многих сферах человеческой жизни. Они незаменимы как в промышленности, так и для бытовых нужд.

Самыми распространенными областями использования 3D-сканеров являются: медицина; промышленность; архитектура; строительство; киноиндустрия и дизайн.

Например, в стоматологии эти устройства позволяют создавать сверхточные трехмерные модели зубных протезов. В строительстве и промышленности также не обойтись без подобных технологий. Цифровые прототипы зданий сейчас получить гораздо проще и быстрее, чем раньше, когда для этого требовались множественные замеры вручную с последующим занесением их в базу данных. Любой физический объект сейчас можно воссоздать в трехмерном формате, причем, в кратчайшие сроки и с минимальной погрешностью.

В кинотеатрах мы можем видеть достаточно большое количество «оживших» фантастических персонажей, при создании которых применялась технология захвата движений, что позволило их сделать максимально реалистичными и впечатляющими. Это было бы невозможно без 3D-сканеров.

Технология бесконтактного оптического сканирования обеспечивает оперативный сбор данных и высокий уровень детализации, а на выходе вы получаете трехмерную модель сканируемого объекта [14]. В этом оборудовании применяется технология подсветки структурированным светом, позволяющая сократить время одного снимка одной секунды, независимо от размера и сложности объекта сканирования.

Система Breuckmann OPTO-TOP HE – бесконтактный оптический 3-D сканер и предназначена для решения широкого спектра задач [15]: реверс-инжиниринг, метрологический контроль отклонений формы сложных изделий, оценка геометрических погрешностей изготовления, измерение объектов, 3D-моделирование.

При использовании 3-D сканера Breuckmann OPTO-TOP HE с фотограмметрической системой Aicon 3D Studio могут быть оцифрованы крупногабаритные объекты до мельчайших деталей.

Благодаря модульной конструкции и камерам высокого разрешения, система Breuckmann OPTO-TOP HE легко адаптируется для решения, практически, любых задач за минимальное время. Использование в конструкции углепластиковых компонентов обеспечивает высокий уровень термической и механической стабильности сенсоров, таким образом, позволяя добиваться высокого качества результатов даже в сложных условиях работы.

Результаты сканирования доступны в различных стандартных форматах файлов, что делает их совместимыми с различными существующими программными средствами для дальнейшей работы. В качестве программного обеспечения использует AICON OptoCAT.

Неотъемлемой составляющей развития аддитивных технологий являются технологии создания цифровых моделей физических объектов. Оптическое 3D-сканирование объектов – процесс получения компьютерной модели на основе геометрии исследуемого изделия.

Данные технологии используются для метрологического контроля изделий, изготовленных как традиционным методом, так и с помощью аддитивных технологий. 3D-сканер позволяет сравнивать цифровую модель, полученную с помощью сканирования, и CAD-модель, на базе которой на ЧПУ или на SD-принтере была изготовлена данная деталь.

Также технологии сканирования физических объектов востребованы для реверс-инжиниринга, когда стоит задача разработать точную копию физического объекта. CAD-модель, полученная методом SD-сканирования, позволяет измерять любые геометрические параметры изделий с помощью компьютерных алгоритмов, а также может быть использована для изготовления копии детали на SD-принтере.

Точность сканирования объектов составляет десятки микрон, что позволяет использовать технологии SD-сканирования в машиностроении, автомобилестроении, приборострое-

нии, на предприятиях аэрокосмической отрасли, а также в опытно-конструкторских бюро, НИИ и лабораториях.

Современные SD-сканеры представляют собой высокотехнологичные устройства, основным назначением которых является создание трехмерных моделей различного рода физических объектов. Рассмотрим сканеры оптического типа, которые используются во многих профессиональных сферах и обладают массой уникальных возможностей.

Принцип работы оптических SD-сканеров прост (рис. 1). Процесс сканирования заключается в подсвечивании объектов создаваемым проектором структурированным светом и съемке отраженного света с определенных ракурсов. Объект сканирования засвечивают световой полоской или паттерном - эталонным монохромным рисунком. Перерабатывая отраженный сигнал и высчитывая расположение точек его поверхности на основе разницы между спроецированным и отраженным изображением, компьютер получает информацию для построения SD-модели.

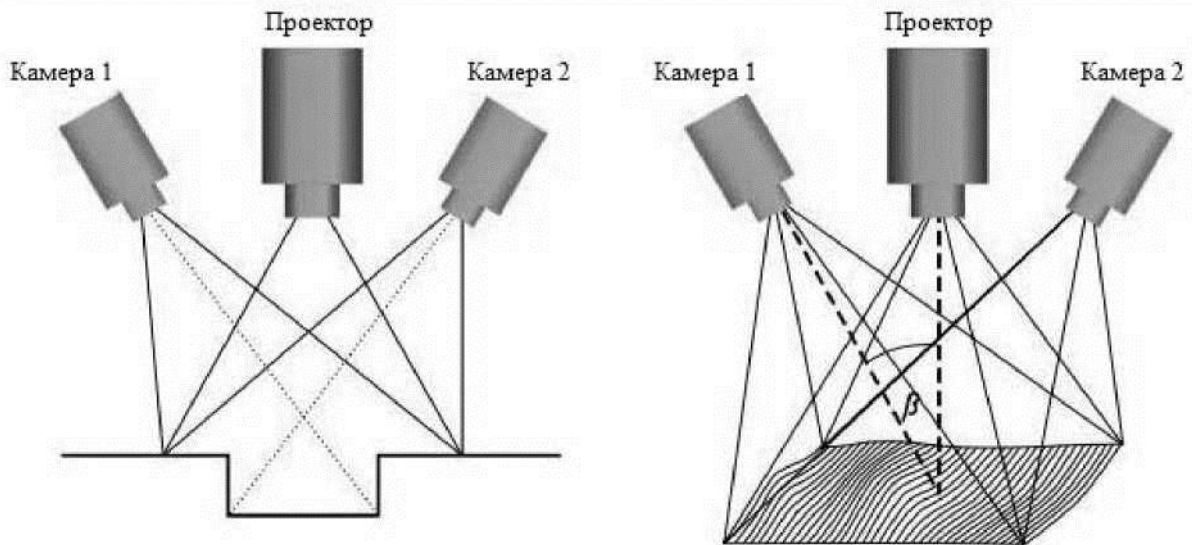


Рис. 1. Принцип работы оптического SD-сканера

Все сканеры оптического типа делятся на ручные, настольные и напольные. Отдельные модели оснащены функцией цветного сканирования. Перейдем от теории к практике.

Реализованные возможности SD-печати хорошо демонстрирует примерный спектр применения этих технологий.

Авиационное подразделение General Electric - GE Aviation совместно с французским производителем авиационных двигателей Snecma разработало оптимизированную конструкцию топливной форсунки и изготовило методом аддитивных технологий 19 форсунок для установки в камеру сгорания на новый реактивный двигатель LEAP. Новое поколение пассажирских реактивных самолетов A320neo Airbus будет оснащено подобными типами двигателей. В 2015 г. в Тулузе успешно осуществлен первый полет опытного образца воздушного судна с двигателями LEAP. С 2016 г. GE Aviation намерено выпускать подобные двигатели на коммерческой основе. Каждая топливная форсунка изготавливается аддитивным методом как единое изделие, что позволяет избежать сложной мехобработки и последующей сборки деталей. Также напечатанные форсунки могут выдерживать температуры до 2400 °C внутри камеры сгорания. Детали, изготовленные традиционным способом, теряют свои механические свойства при таких значениях температуры. Другими преимуществами перехода на аддитивный метод производства топливных форсунок стали:

- более низкие весовые характеристики (вес детали снижен на 25 %);
- упрощенная конструкция (18 деталей, необходимых для изготовления топливной форсунки традиционным методом, функционально интегрированы в одну);

- доступны новые элементы топологии детали (более сложные внутренние каналы охлаждения и прочностные элементы конструкции позволяют в 5 раз увеличить прочностные характеристики форсунок).

В сферу инжиниринговых услуг по переходу предприятий на цифровое производство также можно включить работы по оптимизации топологии изделий под 3D-печать и подготовку послойных STL-моделей к печати. Оптимизация топологии подразумевает изменение внутренней топологии деталей, снижение весовых характеристик и повышение их функциональности при сохранении прочностных и габаритных параметров. Оптимизация топологии необходима при решении задач перехода от традиционных методов изготовления деталей и узлов к цифровому производству.

Подготовка STL-моделей к печати включает в себя выбор оптимальной ориентации модели на рабочей платформе и моделирование вспомогательных элементов конструкции для отвода тепла в процессе лазерного плавления металлических порошков.

Аддитивные технологии производства в первую очередь ориентированы на создание деталей сложной геометрии, функциональную интеграцию изделий либо на ограниченные тиражи продукции.

Следует упомянуть и о технологических ограничениях на использование материала в процессах лазерного спекания и плавления - материал должен быть доступен в порошковой форме. Тем более, что имеются ограничения на использование аддитивных технологий в производстве. Это прежде всего высокая стоимость изготовления средних и больших тиражей деталей, а также ограниченный спектр материалов, которые доступны в порошковой форме.

Учитывая большое количество технологий SD-печати (со своими преимуществами и недостатками), сложно обобщить все факторы, влияющие на экологию при использовании аддитивных технологий производства, и сравнить их с традиционными технологиями. Но можно однозначно говорить, что общей характеристикой всех процессов промышленной SD-печати является снижение расходного материала - при изготовлении аддитивным методом на деталь тратится существенно меньше материала, чем при изготовлении ее по традиционным субтрактивным технологиям.

В дальнейшем к экологическим преимуществам можно будет отнести снижение расхода топлива при доставке товаров - вместо отправки набора пластиковых деталей с фабрики изготовителя заказчик сможет распечатать их на SD-принтере. Для объективности надо заметить, что использование аддитивных технологий достаточно энергоемко. О лобби производителей традиционного оборудования ничего неизвестно, поскольку аддитивные технологии не являются конкурентом и полноценной заменой традиционным технологиям в широком спектре задач. Например, сферы применения термопласт-автомата и SD-принтера для печати пластиковых изделий различны. Так же как и металлический SD-принтер и мехобработывающий станок с ЧПУ не взаимозаменяемы.

8. Постобработка полимерных 3D-моделей

После завершения изготовления нужно извлечь изделие. Для этого иногда требуется провести некоторые манипуляции с машиной, в которую встроены блокировки безопасности, чтобы обеспечить снижение температуры или отсутствие активно движущихся частей.

Идеальный результат работы машины аддитивного производства должен быть готов к использованию с минимальной потребностью во вмешательстве оператора. Достаточно часто изделия на выходе из машины требуют значительной финишной обработки, прежде чем они будут полностью готовы к использованию.

Во всех случаях изделие нужно отделить от рабочей платформы, на которой производилось построение изделия, или от избытков материала, накопившегося на этой платформе вокруг изделия.

В некоторых процессах аддитивного производства, помимо основного материала, из которого происходит построение изделия, используется дополнительный материал (вспомогательный материал для опорных и поддерживающих элементов). На данном этапе вовсе не нужно точно представлять, как функционируют поддерживающие структуры, просто следует научиться правильно их использовать в процессе построения изделия.

Несмотря на то что были специально разработаны процессы для производства быстровставляемых и удаляемых опор, слишком часто приходится прикладывать значительный объем ручной работы на данном этапе.

При использовании металлических опор требуется электроэрозионный вырезной станок, ленточная пила и фрезеровальное оборудование, чтобы отделить готовые изделия от опорной плиты и поддерживающих структур. Для аккуратного извлечения изделий из рабочего объема машины требуется определенная квалификация оператора, поскольку небрежное обращение с изделием и применение неправильной техники может привести к его повреждению.

В принципе для каждого процесса аддитивного производства существуют свои требования к очистке изделия, однако есть и общие требования, которые можно применять ко всем технологиям аддитивного производства. Этап очистки также может рассматриваться в качестве начальной стадии последующей финишной обработки.

Постобработка изделия

После извлечения изделия из машины может потребоваться его дополнительная очистка перед использованием. На данном этапе изделия еще могут не набрать нужную прочность или в них могут остаться вспомогательные поверхности, которые должны быть удалены. Таким образом, на эти работы часто требуется время и тщательная ручная обработка опытным оператором.

Постобработка относится к стадии финишной обработки изделия (как правило, вручную) для прикладных целей. Она может включать абразивный финиш — полировку и шлифовку или нанесение покрытий. Данный этап в процессе обычно должен полностью соответствовать приложению.

Некоторые приложения могут требовать только минимальной постобработки. Для других приложений необходимо очень бережное обращение с изделиями для сохранения высокой точности финишной обработки. Некоторые виды постобработки могут включать физическую или термическую обработку изделия для получения нужных свойств.

Каждый процесс аддитивного производства имеет свою степень точности изготовления, поэтому может потребоваться обработка, чтобы изделие соответствовало конечным размерам. В ходе некоторых процессов производятся относительно хрупкие компоненты, которым нужна пропитка или нанесение поверхностного покрытия для упрочнения конечного изделия. Как уже говорилось, все эти операции часто выполняются вручную в большом объеме из-за сложности большинства изделий аддитивного производства. Тем не менее некоторые из задач можно решить с помощью электроинструментов, фрезерования на станках с

ЧПУ и применения дополнительного оборудования, например, полировальных машин, сушилки, закалки и отжига.

Когда речь заходит об экструзионной **FDM-печати**, следует понимать, что в качестве расходного материала обычно используется ABS, PLA, PETG и другие типы пластиков. Для данных материалов самой типовой обработкой является обработка напильником как разновидности механической постобработки.

Также следует отметить, что для ABS-пластика возможно использование и химической обработки ацетоном. Это может быть так называемая «ацетоновая баня» или же непосредственное прохождение кисточкой по внешним граням изделия. Для обработки могут использоваться также пары ацетона, полученные в результате нагрева. В данном случае используется некое герметичное устройство, в котором подвешивается обрабатываемое полимерное изделие, к которому подаются пары ацетона.

Если речь идет о PLA-пластике, то также применяются средства для частичного растворения и подплавления PLA. При склейке деталей из PLA, наилучший эффект демонстрирует непосредственно нагретый PLA-пластик.

Значительно отличается от FDM-подхода **SLS-печать**, и, как следствие, отличаются применяемые методы постобработки. Например, при печати полиамидом, для постобработки обычно используется пескоструйная обработка, которая позволяет сглаживать данный участок.

Пескоструйный аппарат позволяет убрать слои лишнего материала, в особенности на участках с практически горизонтальной печатью. В случае со сферой это верхняя часть.

Если же речь идет о печати деталей SLS-методом из металлического сплава, то здесь можно использовать все технологии, применяемые для постобработки для других видов печати. Возможно применение как механической обработки (посредством напильника или же фрезерованием), а также различные электрохимические методы.

В качестве отдельной завершающей технологии следует отметить фотополимеризацию. Фотополимеризация, как способ постобработки, применяется исключительно для SLA- или DLP-технологий. Получаемые данными методами изделия зачастую должны подвергаться дофотополимеризации. Подразумевается процесс отверждения тех полимерных участков, которые не успели отвердеть в процессе печати.

Во многом это может быть связано с необходимостью напечатать какие-то тонкие элементы, где лучше было посветить меньше, чем больше. После печати полученная деталь помещается в специальную камеру с ультрафиолетовыми лампами. В результате воздействия ультрафиолета происходит полное завершение процесса отверждения используемых фотополимеров.

Следует отметить, что при обработке больших прототипов рекомендуется изначально прибегать к обработке посредством автоматических или же полуавтоматических инструментов. Доведение качества изготавливаемой детали до высокого уровня подручным инструментом (напильниками, наждачной бумагой и т. д.) зачастую является не просто нерациональным, но и невозможным.

Применение изделия

В некоторых случаях детали уже могут быть готовы к использованию. В других случаях требуется дополнительная обработка перед эксплуатацией. Например, может потребоваться грунтовка и покраска для создания нужной текстуры поверхности и финишной обработки. Обработка может быть трудоемкой и длительной, если требования к конечному продукту очень высоки. Также по техническим условиям отдельные детали должны быть собраны вместе с другими механическими или электронными компонентами для формирования конечной модели или продукта.

После рассмотрения многочисленных этапов процесса аддитивного производства становится понятно, что многие машины аддитивного производства требуют тщательного технического обслуживания.

После постобработки изделия готовы к использованию. Следует отметить, что, хотя материалы для изделий аддитивного производства и других видов машиностроительного производства (например, обработки давлением и литья) могут быть аналогичными, свойства уже самих изделий аддитивного производства могут сильно отличаться от стандартной спецификации.

В некоторых технологиях аддитивного производства изделия изначально строят с большими внутренними пустотами, которые могут быть источником отказа изделия при определенном механическом воздействии. Кроме того, некоторые процессы могут привести к ухудшению качества материала во время построения или из-за неоптимального склеивания, соединения или кристаллизации.

Почти в каждом случае свойства становятся анизотропными (отличие свойств в разных направлениях). Для большинства металлов, используемых в процессах аддитивного производства, быстрое охлаждение приводит к образованию различных микроструктур, которые отличаются от структуры материалов, применяемых в обычном производстве. В результате изготовленные в ходе аддитивного производства изделия ведут себя отлично от деталей, изготовленных в обычном производстве.

Вновь приобретенные свойства могут быть лучше или хуже для конкретного применения. Разработчик должен учитывать эти различия и принимать их во внимание на этапе проектирования. Материалы и процессы аддитивного производства быстро совершенствуются, поэтому проектировщики должны быть в курсе последних достижений в области материаловедения и технологий производства, чтобы точно определить, как использовать аддитивное производство с наибольшей выгодой.

Вышеуказанные этапы типового процесса можно применить к каждой коммерческой технологии аддитивного производства. Различные технологии требуют разного уровня внимания к тому или иному этапу. Ниже мы рассмотрим реализацию этих различий не только в плане процессов, но также в некоторых случаях в пределах конкретной технологии.