

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

С. В. Каменев, К. С. Романенко

ТЕХНОЛОГИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Рекомендовано ученым советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 15.03.06 Мехатроника и робототехника и 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств

Оренбург
2017

УДК 621.01(075.8)
ББК 34.5я73
К18

Рецензент – доцент, кандидат технических наук И. В. Парфенов

Каменев, С. В.

К18 Технологии аддитивного производства: учебное пособие / С. В. Каменев, К.С. Романенко; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2017. – 144 с.
ISBN 978-5-7410-1696-1

В учебном пособии рассмотрены основные принципы и этапы аддитивного производства прототипов и функциональных образцов промышленных изделий различного назначения, и освещены вопросы, связанные с подготовкой аддитивного производства. Приведены подробные сведения о различных видах аддитивных процессов и технологий, распространенных в настоящее время во множестве отраслей промышленности. Дана краткая сводка характеристик наиболее популярных типов конструкционных материалов, применяемых для аддитивного производства изделий.

Учебное пособие предназначено для студентов направлений подготовки 15.03.06 Мехатроника и робототехника и 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, изучающих такие дисциплины, как «Конструирование мехатронных модулей» и «Основы технологии быстрого прототипирования».

Учебное пособие подготовлено в рамках проекта по совершенствованию содержания и технологий целевого обучения студентов в интересах организаций оборонно-промышленного комплекса («Новые кадры ОПК – 2016»)

УДК 621.01(075.8)
ББК 34.5я73

ISBN 978-5-7410-1696-1

© Каменев С. В.,
Романенко, К. С., 2017
© ОГУ, 2017

Содержание

Введение	5
1 Понятие аддитивного производства.....	6
1.1 Принципы формообразования изделий	6
1.2 Быстрое прототипирование или аддитивное производство	9
1.3 Назначение изделия аддитивного производства.....	11
1.4 Типовой процесс аддитивного производства	12
1.5 Основные термины, используемые для обозначения аддитивных технологий ...	16
1.6 Контрольные вопросы.....	18
2 Подготовка аддитивного производства	19
2.1 Подготовка CAD-модели.....	19
2.2 Спецификация интерфейса STL	22
2.3 Генерация STL данных	25
2.4 Обработка STL данных.....	27
2.4.1 Избыточность данных.....	28
2.4.2 Топологические проблемы	28
2.4.3 Геометрические проблемы.....	29
2.5 Ориентация детали и генерация поддерживающих структур	30
2.5.1 Факторы, влияющие на ориентацию детали	30
2.5.2 Функции поддержки детали	32
2.5.3 Конструкции поддерживающих структур	34
2.6 Разрезка модели на слои и организация контуров сечений.....	38
2.6.1 Разрезка с одинаковой толщиной слоя	38
2.6.2 Адаптивная разрезка модели.....	42
2.7 Генерация траектории движения инструмента	44
2.8 Контрольные вопросы.....	48
3 Процессы и технологии аддитивного производства	50
3.1 Процессы аддитивного производства на основе жидких материалов.....	50
3.1.1 Процесс стереолитографии	50
3.1.2 Аддитивные процессы, основанные на использовании маски.....	56
3.1.3 Процессы, основанные на впрыске жидкого материала	60

3.1.4	Процесс на основе быстрой заморозки	63
3.1.5	Процесс на основе тепловой полимеризации жидкости	66
3.1.6	Процесс на основе интерференции лазерных лучей	68
3.1.7	Процесс на основе голографической интерференции	69
3.1.8	Процесс на основе использования электрочувствительной жидкости (электроосаждение)	69
3.2	Аддитивные процессы на использования расплавов.....	70
3.2.1	Баллистическое осаждение частиц	70
3.2.2	Моделирование методом наплавления	73
3.2.3	Производство наращиванием формы (Shape Deposition Manufacturing).....	79
3.2.4	Трехмерная сварка.....	83
3.3	Процессы на основе использования порошковых материалов	84
3.3.1	Селективное лазерное спекание.....	85
3.3.2	Осаждение из газовой фазы (Gas Phase Deposition)	91
3.3.3	Объединение порошка связующим материалом.....	95
3.3.4	Процесс лазерного формообразования	100
3.3.5	Отверждение многофазной струи.....	103
3.3.6	Электронно-лучевая плавка	106
3.4	Аддитивные процессы на основе сплошных материалов	108
3.4.1	Изготовление объектов с использованием ламинирования.....	108
3.4.2	Селективно-наращиваемое наслоение	113
3.4.3	Процесс ультразвукового объединения	117
3.4.4	Автоматизированное производство ламинированных конструкционных материалов	123
3.5	Контрольные вопросы.....	127
4	Материалы для аддитивных процессов	130
4.1	Фотополимерные материалы	132
4.2	Порошкообразные пластики	135
4.3	Металлы.....	138
4.4	Термопластичные материалы.....	139
4.5	Контрольные вопросы.....	141
	Список использованных источников	143

Введение

Прототипирование является неотъемлемой составляющей процесса разработки изделия, которая позволяет оценить геометрическую форму, собираемость и функциональность его конструкции, до начала значительного инвестирования в производство. До недавнего времени прототипы преимущественно изготавливались вручную квалифицированными рабочими, что добавляло недели или месяцы ко времени разработки продукта. Вследствие этого изделие перед своим непосредственным запуском в производство могло претерпевать лишь ограниченное число конструктивных изменений, в результате чего производимые детали, в лучшем случае, были плохо оптимизированы и, в худшем случае, не могли функционировать должным образом.

В условиях, растущих с каждым годом требований к производительности производства и качеству выпускаемых изделий, это стало представлять собой серьезную проблему, решение которой было найдено за счет разработки и внедрения автоматизированных компьютерных технологий быстрого прототипирования или аддитивных производственных технологий. Аддитивные производственные технологии представляют собой группу технологий, используемых для построения физических моделей, прототипов, инструментальной оснастки и функциональных деталей на основе трехмерных компьютерных CAD-моделей либо данных, получаемых при помощи 3D сканирования. Эти технологии связаны с изготовлением физически сложных форм непосредственно из данных CAD-модели с использованием принципа послойного наращивания материала.

В настоящее время аддитивные технологии во многих практических областях имеют преимущества над традиционными методами производства, такими как фрезерование, точение и т.д. По этой причине данные технологии активно развиваются и совершенствуются последние два десятка лет, и получают все более широкое применение в различных областях. Материал, изложенный в предлагаемом учебном пособии, освещает различные вопросы, связанные с основными принципами, видами и особенностями аддитивных технологий, распространенных в настоящее время.

1 Понятие аддитивного производства

1.1 Принципы формообразования изделий

С момента зарождения цивилизации человечество было занято разработкой и изготовлением различных изделий, призванных удовлетворять потребности местных потребителей и служить орудиями труда для других ремесленников. По существу, прогресс человеческой цивилизации, по большей части, обусловлен прогрессом в области производства изделий различного назначения.

Функциональность материальных объектов зависит от двух их характеристик: формы и состава материала. Например, хороший эстетичный вид скульптуры зависит от ее формы, в то время как, ее прочность зависит от физических свойств материала. Идеальным производственным процессом является такой процесс, посредством которого можно сгенерировать любую геометрическую форму из любого материала. Однако большинство традиционных производственных процессов крайне ограничено в этом отношении.

Существует три основных метода получения геометрической формы объекта: консервативный, субтрактивный и аддитивный. При использовании первого метода для придания формы материалу на него накладываются деформирующие силы без удаления или добавления материала, т.е. с его сохранением. Многие технологические процессы, такие как ковка, литье, штамповка и вытяжка основаны на данном методе.

Проблемой многих этих процессов является то, что они акцентированы на формообразовании без явного указания каких-либо средств для контроля состава материала. На самом деле даже собственно формообразование здесь не является прямым. Они просто дублируют внешнюю форму, приданную внешнему инструменту, такому как штампы и литейные формы, и внутреннюю форму, приданную, например, литейным стрелкам. До недавнего времени для создания инструментальной оснастки таких процессов требовалось прибегать к субтрактивным методам. Производство подобной оснастки может быть довольно дорогим и продолжитель-

ным, что ставит себестоимость единицы продукции в зависимость от объемов выпуска.

Субтрактивный подход предполагает удаление лишних сегментов с исходного блока материала. В современной промышленности по этому принципу работают металлорежущие станки, как универсальные, так и с ЧПУ. Достоинством ЧПУ является то, что оно позволяет использовать информацию, заложенную в САД-модель обрабатываемой детали. Помимо этого, формообразование здесь зависит от относительного движения вычитающего инструмента (например, фрезы) и заготовки. Иначе говоря, здесь не нужен инструмент, с заложенной в него требуемой формой, что позволяет производить изделия в малых объемах.

Однако при непосредственном изготовлении изделий обработка на станках с ЧПУ является экономически невыгодной для больших объемов производства. Кроме того, данным методом могут быть получены только те элементы формы, к которым может быть обеспечен доступ вычитающего инструмента. Это означает невозможность обработки входящих углов и закрытых полостей. Еще одна проблема состоит в том, что, несмотря на управление станка компьютером, сам процесс физической обработки требует внимания человека. И, наконец, как и в случае с консервативным подходом, субтрактивный подход сосредоточен на формообразовании без использования средств контроля состава материала.

Аддитивный подход предполагает создание объекта на «пустом месте» путем постепенного добавления материала. Материал, добавляемый каждый раз, может быть одинаковым или различным. Таким образом, здесь обеспечивается возможность одновременного решения задач формообразования и контроля состава материала в рамках одного и того же процесса. Чем меньше объем материала, добавляемого на каждом этапе, тем больше достижимая точность формы и степень контроля состава материала. Прямым преимуществом этого подхода, является то, что теоретически с его помощью может быть получена любая трехмерная форма без использования внешних инструментальных средств с заданной формой. Это позволяет полностью избежать проблем, связанных с консервативным и субтрактивным методами.

К сожалению, до недавнего времени, аддитивный принцип получения изделий не мог применяться в промышленности в силу отсутствия подходящих материалов и поддерживающих технологий. Однако в 1980 годах прогресс в области разработки фотополимеров, лазерных технологий, САD моделирования и т.д. развился настолько, что стал достаточным для разработки технологии послойного аддитивного формирования трехмерных физических объектов путем селективной полимеризации светочувствительной смолы.

Первое коммерчески доступное оборудование, основанное на этом принципе, и получившее название «StereoLithography Apparatus-1», было выпущено компанией «3D Systems, Inc.» (США) в 1987 г. Это послужило началом новой революции в промышленности. И эта революция все еще продолжается, что становится очевидным по причине растущего с каждым годом числа коммерчески доступных технологий создания твердотельных объектов свободной формы (SFF – Solid Freeform Fabrication): селективное лазерное спекание (SLS); моделирование методом наплавления (FDM); послойное изготовление объектов (LOM); 3D печать (3DP) и т.д.

С другой точки зрения появление аддитивных SFF-технологий было своевременным. К 1990 годам промышленность переживала небывалую трансформацию, обусловленную быстро изменяющимися отношениями с потребителями и глобализацией производства. Все чаще состоятельные потребители начинали требовать большего разнообразия продукции. Это означало то, что производственный цикл должен был становиться меньше, а темпы производства инновационной продукции увеличиться на порядок. Вдобавок к производительности и качеству, орудием конкуренции стал срок вывода продукции на рынок. То есть компании должны были выпускать и поставлять продукцию на рынок как можно скорее.

Но разработка изделия является итерационным процессом, требующим оценки промежуточных вариантов его конструкции посредством виртуальных (компьютерных) и физических прототипов. К счастью, прогресс в области САD-моделирования и виртуальной реальности позволил преодолеть ряд «узких мест» в создании виртуальных прототипов, в то время как, FSS-технологии показали свою пользу в преодолении «узких мест» при подготовке физических прототипов. В связи с этим, есте-

ственно, что данные технологии начали именоваться технологиями быстрого прототипирования (RP – Rapid Prototyping) [1].

1.2 Быстрое прототипирование или аддитивное производство

В настоящее время термин «Быстрое прототипирование» используется в разнообразных отраслях промышленности для описания процесса быстрого создания полного или частичного представления продукта перед его окончательным выпуском или коммерциализацией. Иначе говоря, акцент здесь делается на быстром создании чего-либо, результат которого выступает прототипом или базовой моделью для последующих моделей и, в конце концов, для получения окончательного изделия.

Консультанты по вопросам управления производством и специалисты по программному обеспечению используют термин «Быстрое прототипирование» для описания процесса разработки бизнес и программных решений «кусочным» способом, который позволяет клиентам тестировать идеи и давать их оценки в течение процесса разработки.

В контексте разработки изделий термин «Быстрое прототипирование» широко используется для описания технологий, при помощи которых создаются физические прототипы непосредственно на основе цифровых данных [2].

Среди пользователей RP технологий есть мнение, что данный термин не является полноценным и не может эффективно описывать новейшие формы практической реализации данных технологий. Повышенное качество получаемого с их помощью выходного продукта максимально приближает его к окончательному изделию. На самом деле многие изделия сейчас непосредственно производятся на оборудовании, реализующем такие технологии, и поэтому уже невозможно обозначать их как прототипы. Кроме того, термин «Быстрое прототипирование» упускает из вида базовые принципы данных технологий, состоящие в том, что они производят детали с использованием аддитивного подхода. По этой причине Технический Комитет в составе организации «ASTM International» (American Society for Testing and

Materials) принял решение о том, что должна быть введена новая терминология. Обсуждения по этому вопросу все еще ведутся, но в ряде недавно принятых ASTM стандартов теперь используется термин «Аддитивное производство» (AM – Additive Manufacturing).

Базовый принцип этой технологии состоит в том, что трехмерная модель, первоначально построенная с использованием CAD-системы, может быть изготовлена напрямую без какой-либо технологической подготовки производства. Несмотря на то, что в действительности это не так просто, как выглядит на первый взгляд, AM-технология определенно значительно упрощает процесс изготовления сложных трехмерных объектов непосредственно из CAD данных.

Другие производственные процессы требуют тщательного анализа геометрии детали для выяснения таких обстоятельств, как порядок, в котором должны производиться различные элементы геометрии, какие инструменты и процессы должны для этого использоваться, и какие вспомогательные приспособления могут потребоваться для завершения детали. В отличие от этого, аддитивное производство нуждается только в информации о некоторых особенностях геометрии и понимании того, как работает AM оборудование и какие материалы оно использует.

Ключевой особенностью работы аддитивного производства является то, что детали изготавливаются путем послойного добавления материала, и каждый добавляемый слой представляет собой тонкий срез детали, получаемый из исходной CAD-модели. Очевидно, что из-за физической природы процесса каждый слой должен иметь конечную толщину, вследствие чего деталь на выходе будет аппроксимацией исходных данных, как показано на рисунке 1.1.

Чем меньше толщина каждого слоя, тем ближе конечная форма детали к оригиналу. Все существующие образцы коммерческого оборудования для аддитивного производства в настоящее время используют послойный подход, и главное их отличие заключается в материалах, которые они могут использовать, в технике создания слоев и способах связывания слоев между собой. Данные различия определяют такие факторы, как точность завершённой детали, а также состав ее материала и механические свойства. Кроме того, они определяют, как быстро может быть изготовле-

на деталь, размеры используемого АМ-оборудования и общую стоимость оборудования и процесса [2].



Рисунок 1.1 – Изображение САД-модели чашки и дополнительные изображения, показывающие, как воспроизводится ее форма набором слоев различной толщины

1.3 Назначение изделия аддитивного производства

Первоначально аддитивное производство, главным образом, использовалось для создания демонстрационных моделей изделий в процессе их разработки. Общеизвестно, что эти модели могут быть намного полезнее, чем чертежи или изображения для полного понимания концепции изделия при концептуальном проектировании. Несмотря на наличие быстро и просто создаваемых чертежей, в конечном итоге, практически всегда требуется использование физических моделей, чтобы проверить работоспособность изделия.

Преследуя эту первоначальную цель простого создания моделей, аддитивное производство развилось в направлении улучшения материалов, точности и общего качества выходного продукта. Получаемые модели быстро стали использоваться для обеспечения информации о том, что сейчас называется «3F» (Form – форма; Fit – собираемость; Function – функция). Первоначальные модели были призваны, в полной мере, оценить форму и общее назначение конструкции (форма). Повышенная точность процесса их производства, означала, что компоненты могли изготавливаться с допусками, требуемыми для сборочных операций (собираемость). Улучшенные свойства материала означали, что детали могли правильно обрабатываться, чтобы иметь возможность оценки в соответствии с их конечными условиями работы (функция) [2].

Если сказать, что технология аддитивного производства полезна только создания моделей, то это будет неточной и заниженной оценкой данной технологии. Аддитивное производство в его сочетании с другими технологиями для формирования технологических цепочек может быть использовано для значительного сокращения сроков разработки и стоимости продукции. В последнее время, некоторые из этих технологий были разработаны до такой степени, что результат их применения подходит для конечного использования. Это объясняет, почему терминология естественным образом эволюционировала от «Быстрого прототипирования» до «Аддитивного производства». Более того, современные технологии, основанные на использовании мощных лазеров, позволяют сейчас изготавливать детали из разнообразных металлов, что позволяет расширить их область применения еще больше.

1.4 Типовой процесс аддитивного производства

Аддитивное производство включает в себя несколько этапов, начиная с виртуального CAD описания детали и заканчивая физическим результатом ее создания. Различные изделия включают в себя аддитивное производство различными путями и в различной степени. Небольшие относительно простые изделия могут использовать аддитивное производство только для демонстрационных моделей, в то время

как, более крупные и сложные изделия с большим инженерным наполнением могут использовать аддитивное производство на многих этапах процесса разработки. На ранних этапах разработки изделия могут потребоваться лишь его черновые образцы, быстрое создание которых может быть обеспечено аддитивным производством. На более поздних этапах процесса разработки, детали могут потребовать тщательной очистки и последующей обработки (включая шлифовку, подготовку поверхности и окраску) перед своим использованием, и аддитивное производство здесь полезно в силу своей возможности создания сложных геометрических форм без инструментальной обработки. В общем виде большинство существующих процессов аддитивного производства включают в себя, как минимум, восемь основных этапов, указанных на рисунке 1.2 [2].



Рисунок 1.2 – Типовые этапы процесса аддитивного производства

1 *CAD-моделирование*. Изготовление всех изделий аддитивного производства должно начинаться с подготовки программной модели, которая полностью описы-

вает внешнюю геометрию изделия. Для этого можно использовать практически любое профессиональное программное обеспечение твердотельного CAD моделирования, но выходная модель должна иметь твердотельную или поверхностную геометрию. Также для создания представления детали может быть использовано оборудование для обратного проектирования (например, лазерный 3D сканер).

2 Конвертация в формат STL. Практически все установки для аддитивного производства поддерживают формат файлов STL, который фактически стал стандартом, и практически каждая CAD-система способна выводить информацию в данном формате. Файл данного формата описывает внешние замкнутые поверхности исходной CAD-модели и создает базис для вычисления срезов.

3 Передача STL файла на АМ-машину и его обработка. STL-файл, описывающий деталь, должен быть передан оборудованию для аддитивного производства. Здесь над ним могут быть выполнены некоторые общие операции, такие как коррекция размера, положения и ориентации модели для ее последующего построения.

4 Настройка машины. АМ-машина должна быть правильно настроена перед запуском процесса построения. Эти настройки могут соотноситься с такими параметрами построения как ограничения материала, источники питания, толщина слоя, назначение времени и т.п.

5 Построение. Построение детали является преимущественно автоматическим процессом, который может выполняться без непосредственного наблюдения. На данном этапе может иметь место только поверхностное наблюдение за процессом на предмет возникновения ошибок в выходе материала, проблем с питанием или программным обеспечением и т.п.

6 Удаление. Как только АМ-машина завершит построение, детали должны быть из нее удалены. Это может потребовать взаимодействия с машиной, которая может иметь защитные блокировки, обеспечивающие, например, безопасную температуру в рабочей зоне машины или отсутствие активных подвижных частей.

7 Постпроцессинг. Детали, будучи удаленными из машины, могут потребовать некоторую дополнительную очистку, прежде чем они будут готовы для использования. На данном этапе детали могут требовать доводки или удаления поддержи

вающих элементов. Поэтому здесь часто требуется продолжительная и тщательная ручная обработка.

8 Практическое использование. После постпроцессинга детали готовы использоваться. Однако они могут потребовать дополнительной обработки, прежде чем станут приемлемыми для использования. Например, они могут потребовать грунтовки или окраски для получения необходимого качества поверхности. Эта обработка может быть трудоемкой и продолжительной в случае высоких требований к качеству отделки поверхностей. Здесь также может потребоваться сборка изделия с другими механическими или электронными компонентами для формирования окончательной модели изделия.

При рассмотрении многочисленных этапов аддитивного производства важно осознавать, что многие АМ-машины требуют бережного обслуживания. Многие АМ-машины используют хрупкий лазер или печатающую технику, которые должны внимательно контролироваться и не использоваться в загрязненной или зашумленной среде. Поскольку машины предназначены для автоматической работы, важно включать в график их технического обслуживания регулярные проверки, с учетом того, что различные технологии требуют различных уровней обслуживания.

Также важно заметить, что большинство процессов аддитивного производства выходят за рамки большинства стандартов в области материалов и технологических процессов, чем объясняется проявляемый в последнее время ASTM интерес к аддитивному производству, которая активно работает над преодолением этой проблемы. Тем не менее, многие производители машин рекомендуют и поставляют тестовые комбинации, которые могут периодически использоваться для подтверждения того, что рабочие параметры машины находятся в допустимых пределах.

Помимо оборудования, тщательного отношения к себе могут требовать и используемые материалы. Исходные материалы, используемые в некоторых АМ-процессах, имеют ограниченный срок годности и должны храниться в условиях, предохраняющих их от нежелательных химических реакций. Подвержение их воздействию влаги, избыточного освещения и различных загрязнителей должно быть исключено. В большинстве аддитивных процессов применяются материалы, кото-

рые могут быть повторно использованы для нескольких построений. Однако в результате многократного повторного использования свойства материала могут ухудшаться, в связи с чем, также должно уделяться внимание процедуре поддержания целостного качества материала при повторении цикла построения.

1.5 Основные термины, используемые для обозначения аддитивных технологий

Рассматриваемые технологии преимущественно основаны на аддитивных процессах, сутью которых является послойное комбинирование материалов. Термин «Аддитивное производство», очевидно, описывает эти технологии достаточно хорошо, но на практике можно встретить и другие термины, используемые для обозначения этих технологий [2].

Автоматизированное формообразование (Automated Fabrication – Autofab). Данный термин был предложен американским изобретателем Маршаллом Бёрнсом в одноименной книге, которая была одним из первых текстов, посвященных рассматриваемым технологиям в начале 1990 г. Акцент здесь делается на использовании автоматизации производства изделий, что подразумевает упрощение или устранение ручных работ из производственного процесса. Для управления исполнительными механизмами и наблюдения за параметрами системы используются компьютеры и микроконтроллеры. Данный термин также применим и для обрабатывающих центров с ЧПУ, так как здесь не оговаривается способ получения деталей и число этапов их построения, хотя Бёрнс акцентировал внимание именно на аддитивных технологиях.

Свободное формообразование или твердотельное свободное формообразование (Freeform Fabrication or Solid Freeform Fabrication). Акцент здесь ставится на способности процессов производить сложные геометрические формы. Иногда достоинство этих технологий выражается термином «сложность для произвольной формы», подразумевающим, что действительная форма объекта не имеет существенного значения. То есть изготовление простого куба или цилиндра на машине

будет занимать почти столько же времени, что и изготовление сложной анатомической структуры сходного объема. Обозначение «Свободная форма» указывает на независимость формы от производственного процесса. Это сильно отличается от большинства традиционных производственных процессов, которые становятся весьма замысловатыми с возрастанием сложности требуемой формы.

Аддитивное производство или послойное производство. Данные названия указывают на способ, которым процессы производят детали, состоящий в послойном добавлении материала. В этом заключается отличие от технологий механической обработки, при помощи которых материал удаляется из исходной заготовки. Нужно заметить, что некоторые из этих процессов не являются чисто аддитивными, поскольку на одной своей стадии они могут добавлять материал, а на другой своей стадии также и удалять его. В настоящее время, все коммерчески доступные аддитивные процессы используют послойный принцип построения.

Слегка видоизмененным термином является «Аддитивная формовка». Данный термин получил популярность благодаря Терри Уолерсу – известному консультанту по вопросам промышленного производства в рассматриваемой области. Однако многие профессионалы предпочитают термин «производство» термину «формовка», поскольку «формовка» имеет некоторые негативные смысловые значения, подразумевающие, что деталь все еще может быть прототипом, а не готовым изделием. Кроме того, в некоторых регионах мира термин формовка ассоциируется с получением изделий из листового металла и поэтому специалисты по аддитивным технологиям в этих регионах часто возражают против использования слова формовка для данной промышленности. По этой причине все большее распространение начинает получать термин «Аддитивное производство».

Стереолитография или 3D печать. Эти два понятия первоначально использовались для описания специальных видов оборудования. Термин «Стереолитография» был предложен американской компанией «3D Systems», а термин «3D печать» широко использовался исследователями в Массачусетском технологическом институте, которые разработали технологию, основанную на струйной печати. Оба этих термина ссылаются на 2D процессы (литографию и печать), распространяя их на

третье измерение. Так как большинство людей хорошо знакомы с технологиями печати, идея печати трехмерного физического объекта должна быть понятной. Многие полагают, что термин «3D печать» со временем станет наиболее распространенным понятием, используемым в обиходе для описания технологий аддитивного производства.

1.6 Контрольные вопросы

1 В чем заключается основной принцип методов консервативного формообразования объектов?

2 В чем заключается основной принцип методов субтрактивного формообразования объектов?

3 В чем заключается основной принцип методов аддитивного формообразования объектов?

4 Чем объясняется появление и распространение аддитивных технологий в промышленности?

5 Что в настоящее время понимается под термином «Быстрое прототипирование»?

6 По какой причине наблюдается постепенный переход от термина «Быстрое прототипирование» к термину «Аддитивное производство»?

7 Что является ключевой особенностью работы процессов аддитивного производства?

8 Для каких целей в настоящее время используются изделия аддитивного производства?

9 Какие основные этапы включает в себя типовой процесс аддитивного производства?

10 Что понимается под термином «Автоматизированное формообразование»?

11 На чем делается основной акцент при использовании терминов «Свободное формообразование или твердотельное свободное формообразование»?

12 С чем связана популярность термина «3D печать» для обозначения аддитивных технологий?

2 Подготовка аддитивного производства

2.1 Подготовка САD-модели

Аддитивное производство включает в себя группу полностью автоматизированных производственных технологий, при помощи которых можно получать прототипирующие модели произвольной геометрической формы при наличии их компьютерного описания. Большинство существующих систем аддитивного производства используют в качестве такого описания файл формата STL. Для получения корректного STL-файла в большинстве случаев требуется однозначная геометрическая САD-модель объекта. Поверхности такой модели должны единственным возможным образом разделять внутреннее и наружное пространство рассматриваемого объекта. Наиболее полное, правильное и однозначное представление обеспечивают твердотельные геометрические модели, подходящие для проведения различных видов автоматизированной обработки, такой как анализ пересечений между отдельными объектами, вычисление массо-инерционных свойств, автоматическая генерация сетки для конечно-элементного анализа и быстрое прототипирование.

Поверхностные САD модели обеспечивают только геометрическую информацию об объекте. Поверхности, из которых они состоят, являются главными строительными блоками для твердотельного моделирования, и твердотельные модели формируются на их основе. В случае если САD-поверхности получаются техниками обратного проектирования, то для их преобразования в твердотельные модели часто может потребоваться их дополнительная обработка. Эта дополнительная обработка может включать увеличение размеров поверхностей, нахождение пересечений между поверхностями, построение фасок и скруглений и, наконец, формирование замкнутых объемов.

В настоящее время существуют различные схемы реализации твердотельных моделей [1]. Одной из наиболее значимых схем для твердотельного моделирования является конструктивная твердотельная геометрия (Constructive Solid Geometry). Она базируется на использовании трех ключевых элементов: твердотельных геометрических примитивов, преобразующих операций и булевых операций. Твердотель-

ные примитивы представляют собой стандартные твердотельные элементы простейшей формы, такие как блок, цилиндр, призма и т.д. Эти примитивы могут быть легко определены всего лишь несколькими параметрами. Булевы операции включают объединение (\cup), пересечение (\cap) и вычитание ($-$). Начиная построение с формирования простых твердотельных примитивов и комбинируя их с преобразующими операциями, такими как, вытягивание, вращение, сдвиг, масштабирование и т.д. можно постепенно создать очень сложную геометрию детали. Рисунок 2.1 показывает основную идею моделирования методом конструктивной твердотельной геометрии, представленную в виде дерева модели.

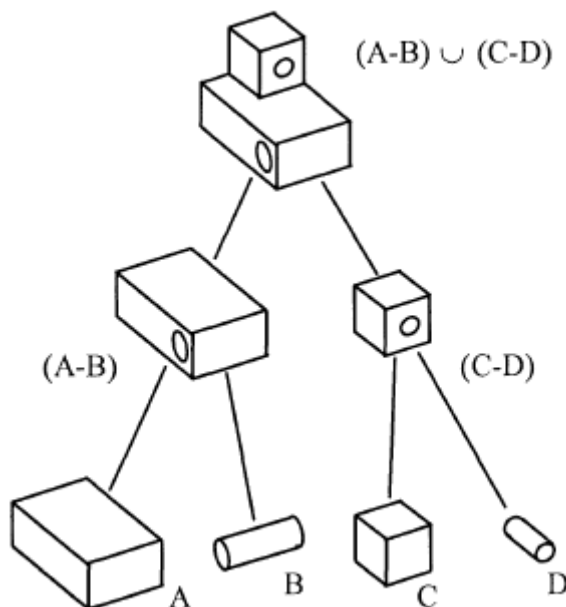


Рисунок 2.1 – Моделирование с использованием конструктивной твердотельной геометрии

Конструктивная твердотельная геометрия является интуитивно понятной и дружественной для пользователя схемой моделирования. Однако в зависимости от особенностей используемой CAD-системы ее возможности моделирования могут оказаться недостаточными из-за ограниченной доступности твердотельных примитивов. Альтернативной схемой твердотельного моделирования является контурное представление (Boundary representation – B-rep), которое полностью совместимо с конструктивной геометрией при моделировании. Контурное представление очень

мощная и гибкая схема, которая может быть использована для формирования геометрии практически любого физического объекта. Как следует из названия этой схемы, контурное представление определяет объект набором ограничивающих поверхностей, которые могут быть как плоскими, так и иметь произвольную форму. В свою очередь, каждая граничная поверхность замыкается контуром ограничивающих линий, которые могут быть как прямыми, так и кривыми. Помимо геометрических параметров каждая граничная линия должна задаваться двумя конечными/граничными точками. Это находит свое отражение в хорошо известных схемах топологической структуры контурного представления модели, изображенных на рисунках 2.2 и 2.3.

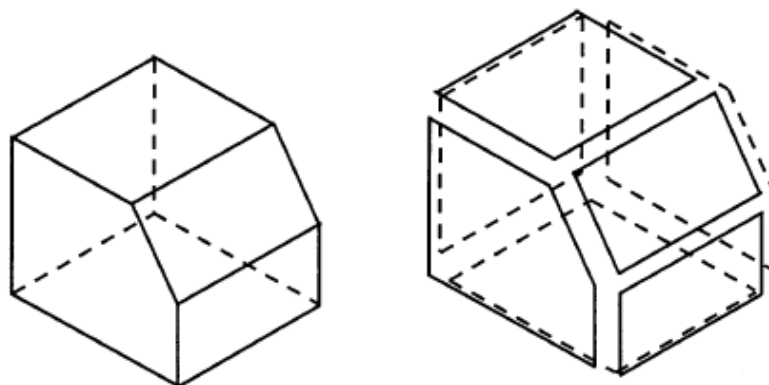


Рисунок 2.2 – Контурное представление твердотельной модели

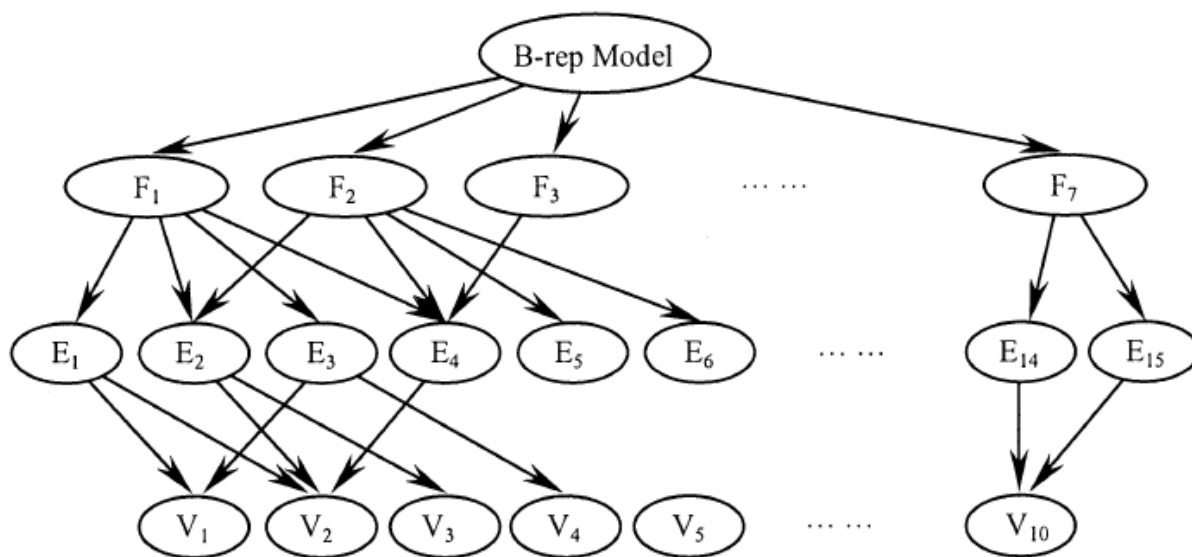


Рисунок 2.3 – Топологическая структура контурного представления твердотельной модели

Несмотря на то, что контурное представление, несомненно, является эффективной схемой твердотельного моделирования, она может быть неудобной для пользователя, если ему каждый раз приходится начинать с определения поверхностей даже при создании типовых простейших элементов. Для обеспечения пользователей интуитивно понятным и дружелюбным интерфейсом в сочетании с мощной базой данных в большинстве систем автоматизации проектирования и технологической подготовки производства (CAD/CAM) применяются гибридные схемы моделирования с контурным представлением для легко изменяемого отображения модели и конструктивной геометрией для взаимодействия с пользователем.

Для пользователя такие CAD/CAM системы выглядят как системы моделирования на основе конструктивной твердотельной геометрии с твердотельными примитивами и булевыми операциями. Однако для внутреннего представления данных в них используется структура контурного представления. Таким образом, все возможные моделирующие операции, применимые для конструктивной твердотельной геометрии, доступны пользователю. Пользователь также может определять любые элементы свободной формы, построенные на основе техник поверхностного моделирования. При включении других моделирующих операций, таких как твердотельное заметание, автоматическое построение скруглений и фасок, современные CAD/CAM системы предлагают пользователю мощные многофункциональные инструменты для расширенного твердотельного моделирования.

Кроме схем конструктивной геометрии и контурного представления также существуют несколько схем моделирования, основанных на воксельном представлении, таких как, ячеечная декомпозиция и октантное дерево. Эти схемы часто используются для научной и медицинской визуализации трехмерных данных и могут быть очень полезны для быстрого прототипирования многоцветных моделей.

2.2 Спецификация интерфейса STL

Интерфейс STL является спецификацией формата файлов для взаимодействия CAD-модели с оборудованием для быстрого прототипирования. Спецификация бы-

ла первоначально разработана компанией «3D Systems, Inc» (США) для своей стереолитографической системы и фактически стала стандартом входных данных для всех систем аддитивного производства [1]. Интерфейс STL был разработан на основе полиэдрического представления, широко используемого в графических ядрах и твердотельных моделировщиках. В соответствии с ним точные CAD поверхности аппроксимируются плоскими линейными геометрическими элементами простейшей треугольной формы для получения поверхностной модели, ограниченной мозаичными гранями. Точность преобразования криволинейной поверхности в мозаичную поверхность с плоскими фасетами контролируется числом фасет, приходящимся на эту поверхность. Для плоских поверхностей преобразование является точным, поскольку каждая из фасет, полученных в результате преобразования, лежит в исходной плоскости поверхности.

В настоящее время доступны две формы представления спецификации STL: в формате ASCII и бинарном формате. Оба представления обеспечивают список треугольных фасет, которые формируют STL модель, где для каждой фасеты указываются координаты ее вершин в трехмерном пространстве и вектор нормали, направленный наружу поверхности модели. На рисунке 2.4 показана простейшая STL модель с 4 фасетами. STL описание этого объекта в кодировке ASCII приведено на рисунке 2.5.

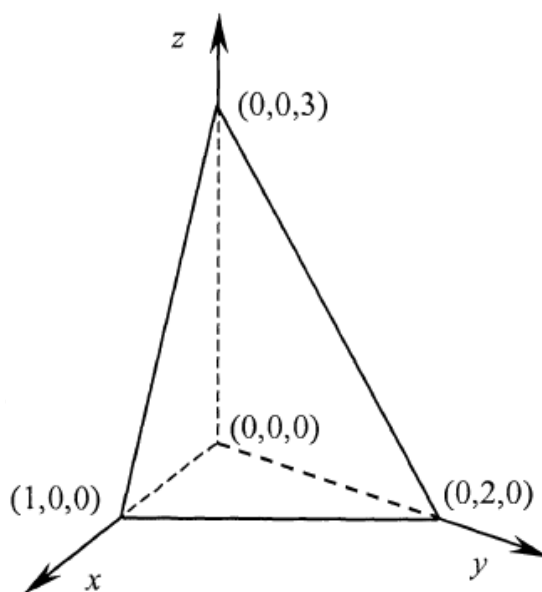


Рисунок 2.4 – Фасеточный объект с четырьмя фасетами и четырьмя вершинами

```

Solid irregular tetrahedron
  facet normal -1.0 0.0 0.0
    outer loop
      vertex 0.0 0.0 0.0
      vertex 0.0 0.0 3.0
      vertex 0.0 2.0 0.0
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.0 -1.0 0.0
    outer loop
      vertex 0.0 0.0 0.0
      vertex 1.0 0.0 0.0
      vertex 0.0 0.0 3.0
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.0 0.0 -1.0
    outer loop
      vertex 0.0 0.0 0.0
      vertex 0.0 2.0 0.0
      vertex 1.0 0.0 0.0
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.85714286 0.42857143 0.28571429
    outer loop
      vertex 1.0 0.0 0.0
      vertex 0.0 2.0 0.0
      vertex 0.0 0.0 3.0
    endloop
  endfacet
endsolid irregular tetrahedron

```

Рисунок 2.5 – STL описание объекта приведенного на рисунке 2.4

В STL файле с кодировкой ASCII координаты нормали фасеты или координаты отдельной вершины могут быть числами с плавающей точкой. Порядок вершин должен подчиняться правилу правой руки с большим пальцем, указывающим наружу поверхности модели. Вектор нормали должен быть единичным вектором. Если STL файл предназначен для производства прототипов, то он должен задавать корректную сетку треугольников, в которой каждая кромка принадлежит двум фасетам с правильной топологией, а сетка в целом образует закрытый замкнутый объем.

В то время как формат ASCII файла STL может быть легко прочитан и проверен, его бинарный формат дает намного меньший размер файла с сокращением размера до 85 %. Благодаря малому размеру файлов и высокой скорости их передачи в промышленности используется почти исключительно бинарный формат. Структура

бинарного STL файла похожа на структуру формата ASCII. Файл содержит список записей фасет и каждая запись фасеты содержит информацию о нормали фасеты, координатах ее вершин и некоторых других атрибутах (опционально). Структура бинарного файла для объекта, приведенного на рисунке 2.4, показана на рисунке 2.6.

```
(Top of file)
84 bytes - header record
    80 bytes - unformatted general information
                such as file name, part name and comments.
    4 bytes - number of facet records
                each facet record defines one triangle.
50 bytes - first facet record
    12 bytes - facet normal vector
        4 bytes - i coordinate
        4 bytes - j
        4 bytes - k
    12 bytes - first vertex
        4 bytes - x coordinate
        4 bytes - y
        4 bytes - z
    12 bytes - second vertex
        4 bytes - x coordinate
        4 bytes - y
        4 bytes - z
    12 bytes - third vertex
        4 bytes - x coordinate
        4 bytes - y
        4 bytes - z
    2 bytes - optional facet attributes
50 bytes - second facet record
50 bytes - third facet record
:
:
:
50 bytes - the last facet record
(End of File)
```

Рисунок 2.6 – Бинарная спецификация STL файла

2.3 Генерация STL данных

Практически все существующие CAD-системы обеспечивают возможность экспорта твердотельных моделей в формат STL [1]. При этом преобразование точной твердотельной модели в приближенную фасеточную модель контролируется посредством заданного допуска. Некоторые CAD-системы допускают непосредственный контроль абсолютной величины допуска хорды. Рисунки 2.7 и 2.8 показы-

вают, каким образом используется допуск хорды для формирования мозаичной фасеточной поверхности.



Рисунок 2.7 – Иллюстрация управления максимальным допуском хорды для двумерной кривой

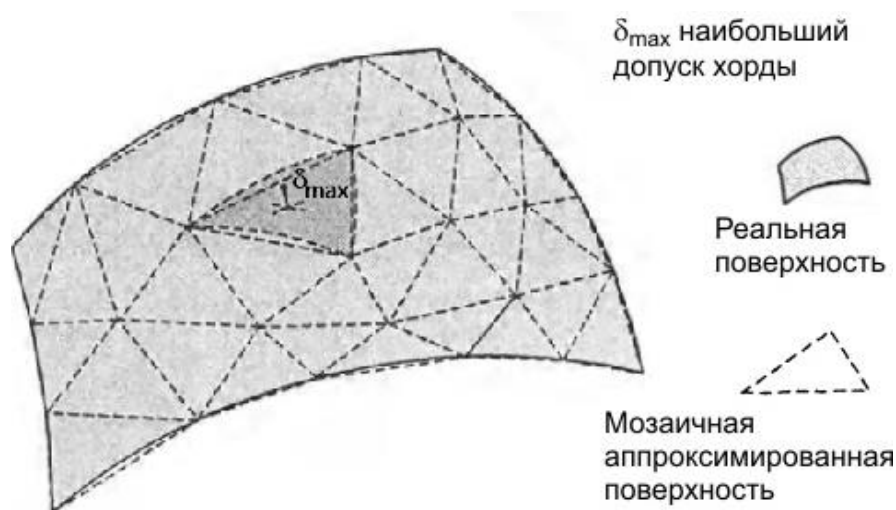


Рисунок 2.8 – Иллюстрация управления максимальным допуском хорды для трехмерной поверхности

Некоторые системы позволяют пользователю изменять параметр качества, управляющий разрешением готовой модели. Например, система «PTC Creo» предоставляет пользователю возможность указывать степень дискретизации криволинейных поверхностей путем ввода значения параметра качества через пользовательский интерфейс. Это значение варьирует от 1 до 10 и обеспечивает максимальную степень дискретизации (точность) при значении равным десяти. Как можно догадаться

высокая степень дискретизации может приводить к получению чрезмерно большого размера STL файла. Некоторые другие системы позволяют пользователю задавать относительный допуск хорды, т.е. выраженный в процентах параметр, который равен отношению допускаемого максимального отклонения к максимальному размеру фасеты.

Мозаичное представление модели является известная проблемой, связанная с визуализацией поверхности и конечно-элементным анализом. При контурном представлении модели процесс мозаичного разбиения полностью предопределен, поскольку мозаика граничных поверхностей уже явно выражена в структуре САД данных. В ходе его выполнения могут сначала строиться сетки для отдельных граничных поверхностей, а затем собираться в единую сетку. При построении поверхностных сеток требуется согласование отдельных поверхностей, чтобы избежать неправильных и вырожденных фасет. Для каждой отдельной поверхности разбиение на треугольники может осуществляться через триангуляцию в 2D параметрической области. Полученная плоская сетка затем может быть преобразована в трехмерную через параметрическое определение соответствующей краевой грани. В трехмерном пространстве может потребоваться коррекция сетки для обеспечения ее необходимой гладкости.

Для твердотельной модели на основе конструктивной геометрии сначала может потребоваться ее преобразование в контурное представление. После чего для дальнейшего мозаичного представления могут быть применены обычные методы построения поверхностных сеток.

2.4 Обработка STL данных

Давно известно, что STL интерфейс связан с рядом потенциальных проблем, возникающих при его практическом применении. К ним можно отнести избыточность данных, топологические проблемы и геометрические проблемы [1].

2.4.1 Избыточность данных

Наиболее явной проблемой является большой размер файла. Как можно увидеть из спецификации файла, запись в ней нормали поверхности совершенно не нужна при условии, что вершины фасет упорядочены надлежащим образом. Кроме того, в файле повторяются координаты каждой отдельной вершины столько раз, сколько существует треугольных фасет, которым она принадлежит. Для регулярной треугольной сетки каждая из ее вершин одновременно принадлежит шести треугольникам, расположенным по соседству (рисунок 2.9). Отсюда следует, что, если каждую вершину записать только один раз, то может быть достигнуто сокращение размера данных в шесть раз.

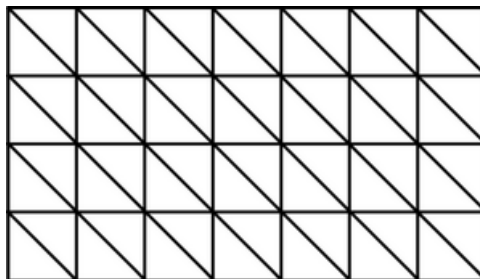


Рисунок 2.9 – Регулярная треугольная сетка

2.4.2 Топологические проблемы

В STL файле все вершины, кромки и треугольники должны удовлетворять обоснованным топологическим правилам, как показано на рисунке 2.10. Все треугольники вокруг вершины должны удовлетворять условию двух многообразий с вершиной расположенной в топологическом центре. Все нормали грани должны быть направлены в одну сторону. Каждая из кромок должна принадлежать двум треугольникам (за исключением открытых сеток или кромок, расположенных на границе). Рисунок 2.11 иллюстрирует некоторые проблемные случаи, которые могут иметь место при плохом STL файле. Все эти проблемы должны быть исправлены посредством обращения граней, локальной повторной триангуляции, пересоединения кромок, треугольников и вершин, их вставки и удаления при необходимости.

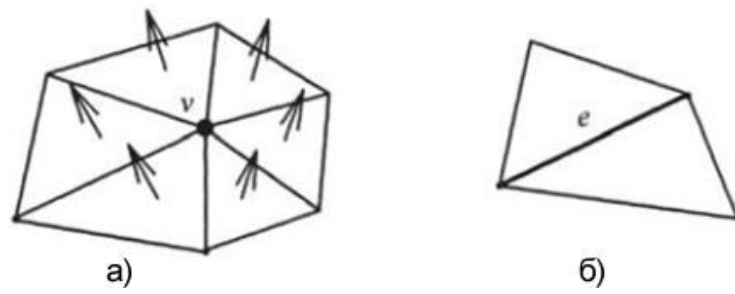


Рисунок 2.10 – Топологические правила для STL модели:

а) условие вершина-грань; б) условие кромка-грань

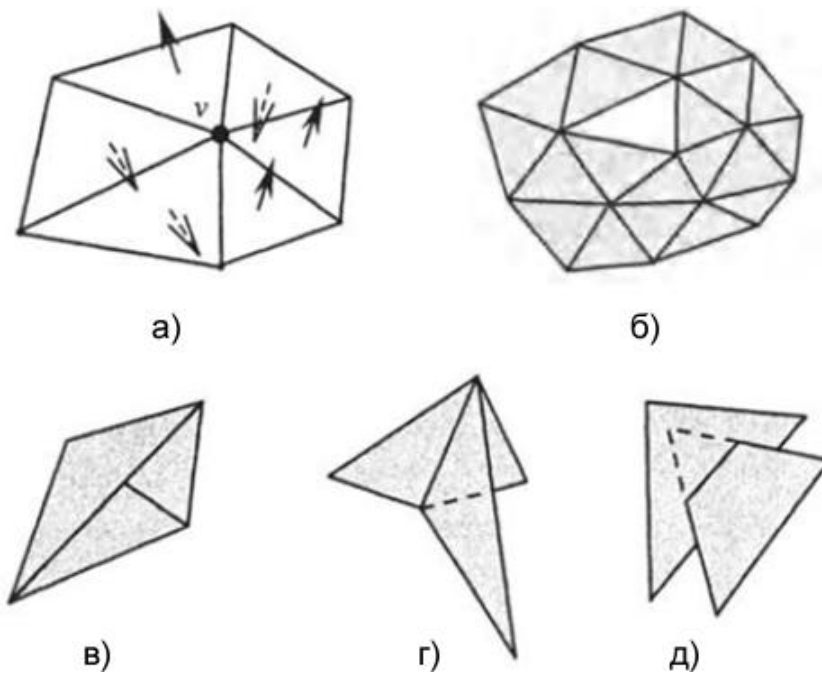


Рисунок 2.11 – Рисунок – Общие топологические проблемы
 а) перевернутые нормали граней; б) отсутствующие треугольники;
 в), г) неправильная связь кромок; д) смещенные треугольники

2.4.3 Геометрические проблемы

Даже, если CAD-система формирует топологически правильную поверхностную сетку, неприемлемое обращение с допусками и точностью операций с плавающей точкой может также привести к различным геометрическим проблемам. Рисунок 2.12 иллюстрирует несколько случаев геометрических неточностей. Подобные геометрические проблемы часто могут быть исправлены путем удаления вырожден-

ных треугольников на основе использования эффективных алгоритмов стягивания кромок или изменения положения вершин.

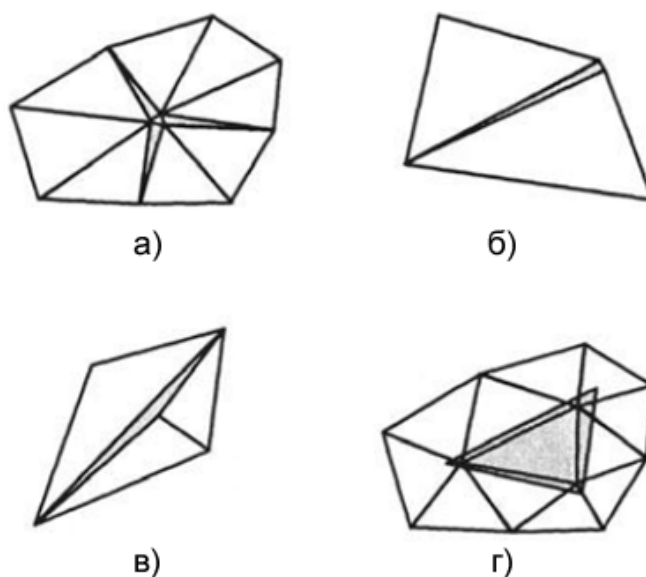


Рисунок 2.12 – Геометрические проблемы
а-в) вырожденные треугольники, г) перекрытие граней

2.5 Ориентация детали и генерация поддерживающих структур

Ориентация детали и генерация поддержки являются двумя тесно связанными между собой операциями в процессе послойного изготовления изделий. Выбором оптимальной ориентации детали для прототипирующей модели, можно сократить время построения и минимизировать суммарные затраты на прототипирование [1].

2.5.1 Факторы, влияющие на ориентацию детали

Многие авторы обращались к проблеме ориентации детали. Одни из них исследовали методы определения ориентации детали при стереолитографическом прототипировании. Другие предлагали аналогичные методы для SLS прототипирования и подходы для оценки волюметрических погрешностей FDM прототипирования. Некоторые авторы исследовали универсальные методы, применимые к нескольким аддитивным процессам.

Базовая методология послойного построения деталей является общей для большинства аддитивных процессов. Путем идентификации факторов, общих для всех таких процессов может быть разработан некий обобщенный подход, не привязанный к какому-либо конкретному процессу. Ориентация детали оказывает значительное влияние на качество готовой детали и затраты на прототипирование. Основными характеристиками ориентации детали являются следующие:

- главный обвод детали в трехмерном пространстве является одним из наиболее важных факторов. Например, при рассмотрении процесса стереолитографии переключение между отдельными слоями занимает значительную часть суммарного времени построения и, следовательно, должно быть соответствующим образом оптимизировано. Для процесса моделирования методом наплавления это не влияет на время построения, но все же лучше, по возможности, ориентировать деталь таким образом, чтобы она занимала более устойчивое положение на платформе во время построения;

- для процессов, которые требуют использования поддерживающих структур, ориентация детали должна быть оптимизирована так, чтобы требовалась минимальная поддержка. В данном отношении должны оптимизироваться два параметра. Во-первых, для обеспечения надежной поддержки детали в течение всего процесса прототипирования должна быть минимизирована общая площадь контакта детали с материалом поддержки. Это позволяет минимизировать влияние поддержки на качество поверхности прототипа, а также снижает дополнительные затраты на постобработку. Кроме того, следует правильно использовать угол нависания элементов детали, так чтобы не требовалось их поддержки. Во-вторых, необходимо стремиться к минимизации суммарного объема поддержки для экономии времени и материала поддержки;

- воспроизводимые внешние поверхности должны быть как можно более гладкими. Так как модели строятся послойным способом, то неизбежным является эффект ступенек на поверхности, который должен быть минимизирован. Это может быть достигнуто путем сокращения числа наклоненных граней, т.е. попытками позиционирования детали таким образом, чтобы большинство ее граней или, по край-

ней мере, наиболее ответственные грани, располагались либо вертикально, либо горизонтально без использования поддержки настолько, насколько это возможно;

- в случае прототипирования изделий методом стереолитографии следует избегать и других факторов, таких как замкнутые полости. Также следует учитывать толщины стенок детали и их возможное искривление.

2.5.2 Функции поддержки детали

В зависимости от природы конкретного аддитивного процесса при его реализации может потребоваться дополнительная поддержка детали. Одним из таких примеров является процесс стереолитографии, где без надлежащей поддержки нависающая структура упадет в баке со смолой. Для некоторых других процессов, таких как селективное лазерное спекание, специальной поддержки не требуется, так как спекаемый порошок сам по себе фактически поддерживает деталь во время процесса построения. Наиболее важные функции поддержки детали могут быть обобщены следующим образом (приведенные функции основаны на процессе стереолитографии, но функции поддержки детали для других процессов являются аналогичными):

- отделение деталей от платформы. Использование поддержки упрощает безопасное удаление детали с платформы после завершения изготовления. Также это упрощает контроль толщины слоя и качество поверхности нижних слоев, т.к. рельеф платформы не будет отпечатываться на завершенной детали;

- обеспечение опоры для нависающих структур. Эта функция имеет двойное назначение. В первую очередь, она обеспечивает опору для нависающих структур, предотвращая их сваливание. Кроме того, она также усиливает нависающие области детали, предотвращая деформацию и искривление в процессе стереолитографии, а также в других процессах. В случае стереолитографии, искривление происходит, когда усадка $n+1$ -го слоя натягивает n -й слой, наподобие эффекта биметаллической полосы;

- обеспечение буфера, предупреждающего столкновения. Поддержка также обеспечивает предупреждающий столкновения буфер между платформой и другими

компонентами машины, поскольку различные стратегии построения, применяемые для формирования поддерживающих структур, аналогичны стратегиям построения основной модели;

- улучшение процесса. Данная функция для процесса стереолитографии выражается в улучшении течения жидкости вокруг детали, особенно на начальных стадиях построения и при переходе с одного слоя на другой.

На рисунке 2.13 показаны несколько случаев, в которых требуется использование поддержки. Рисунок 2.14 иллюстрирует, как поддержка может предотвратить деформации изделия во время процесса прототипирования.

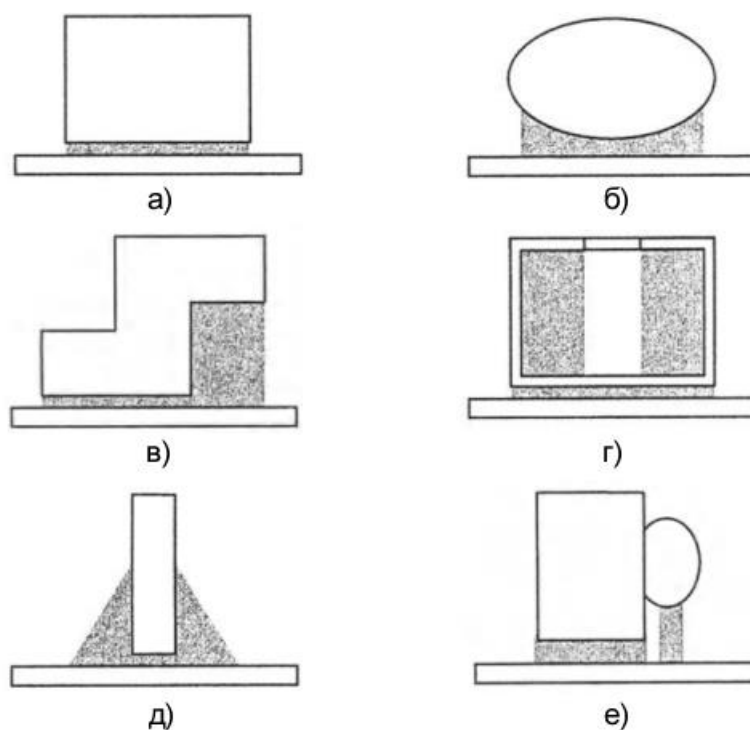


Рисунок 2.13 – Ситуации, в которых требуется использование поддержки:

- а) разделение детали и платформы; б) обращенные вниз области, расположенные ниже экватора поверхности нормальной кривизны; в) поддержка для нависающих структур; г) внутренняя поддержка; д) поддержка для придания устойчивости; е) поддержка островков

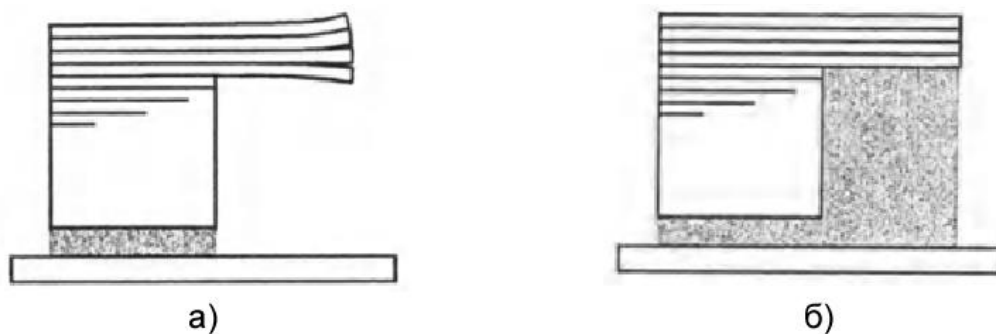


Рисунок 2.14 – Предотвращение деформации и загибания посредством поддержки деталей: а) не опертые консольные элементы детали могут деформироваться без поддержки; б) правильно прикрепленные слои с поддержкой

2.5.3 Конструкции поддерживающих структур

В зависимости от конструкции и назначения, структура поддержки детали может быть разделена на три функциональных зоны, для образования каждой из которых используются различные стратегии построения. Поддержка в зоне соединения с поверхностями детали должна быть легко удаляемой, но в то же время обеспечивать достаточную опору. Ее структура в этой зоне часто представляет собой зубчики или иглы с минимальной площадью контакта с поверхностью детали. В основной зоне поддержка должна быть достаточно прочной, чтобы выдерживать как вес детали по вертикали, так и различные возмущения по горизонтали. Поддержка в зоне между платформой и основной поддержкой призвана обеспечивать легкое удаление детали и ее устойчивую опору, и может быть получена при помощи различных стратегий построения. При этом она должна иметь минимальный вес.

Таким образом, эти три функциональные зоны можно обобщить как:

- зубчики или иглы, т.е. соединения между основной поддержкой и деталью;
- опоры, т.е. структуры основной поддержки;
- разделители, т.е. соединения между платформой и основной поддержкой.

Расположение названных функциональных зон в структуре поддержки показано на рисунке 2.15.



Рисунок 2.15 – Иллюстрация структур поддержки

Существуют разнообразные конструкции структур основной поддержки. Наиболее распространенными из них являются следующие структуры:

- укосы. Как показано на рисунке 2.16а, укосы (единичные или их набор) используются в процессе построения для поддержки легковесных нависающих областей и прикрепляются к вертикальной стенке около нависающей области. Укосы обеспечивают оптимальную поддержку для нависающих областей и в то же время требуют минимальных затрат при построении. Кроме того, поддержка данной конструкции легко удаляется при очистке детали;

- спроецированные кромки элементов. Кромки не опертых легковесных областей, где не могут использоваться укосы, проецируются вниз для обеспечения поддержки. Спроецированные кромки элемента поддерживают элемент и обеспечивают превосходный контроль над загибанием и короблением;

- одиночные перемычки. Тонкие стенки могут поддерживаться одиночными перемычками, получаемыми путем проецирования средней линии узкой стороны тонкостенного элемента. Для придания устойчивости такой поддерживающей структуре добавляются перекрестные элементы;

- сетки перемычек. Обширные не опертые области могут поддерживаться различными сеточными структурами такими, как показаны на рисунках 2.16г и 2.16д. При использовании таких поддерживающих структур следует избегать их контакта с вертикальными стенками детали, чтобы защитить поверхности готовой

детали. Для минимизации расхода материала поддержки в сеточной структуре могут использоваться перфорированные перемычки, как показано на рисунке 2.16е;

- леса. Для поддержки деталей могут использоваться структуры в виде перфорированных стенок, которые по своей сути представляют собой конструкции наподобие строительных лесов, изображенные на рисунке 2.16е;

- соты. Для полых моделей могут использоваться поддерживающие структуры в виде сот;

- столбики. Для небольших изолированных участков могут использоваться поддерживающие структуры столбчатого типа, как показано на рисунке 2.16ж. Для больших участков поддерживающие столбцы могут задаваться с использованием сеточных структур;

- зигзагообразные и периметрические опоры. Изящные прерывистые поддерживающие структуры наиболее подходят для таких процессов, как стереолитография, поскольку здесь существует возможность блокировки лазерного луча при отверждении смолы. Для таких процессов, как FDM, в которых используются сопла для наращивания материала, более предпочтительным является непрерывный способ построения, как для генерации поддержки, так и для генерации основного материала. Поэтому в данном случае наиболее удобны зигзагообразные и периметрические поддерживающие структуры, которые строятся при непрерывном движении сопла в процессе формирования каждого слоя.

Для всех упомянутых поддерживающих структур толщина перемычки может быть равна толщине единичной отвержденной дорожки (обычно от 0,18 до 0,3 мм) в случае лазерной стереолитографии или ширине единичного валика (часто две толщины слоя) в случае моделирования методом наплавления. Иглы или зубчики для соединения с поверхностями детали должны внедряться в них на небольшую толщину слоя. Такое пересечение будет гарантировать то, что опоры физически соединятся с элементами детали.

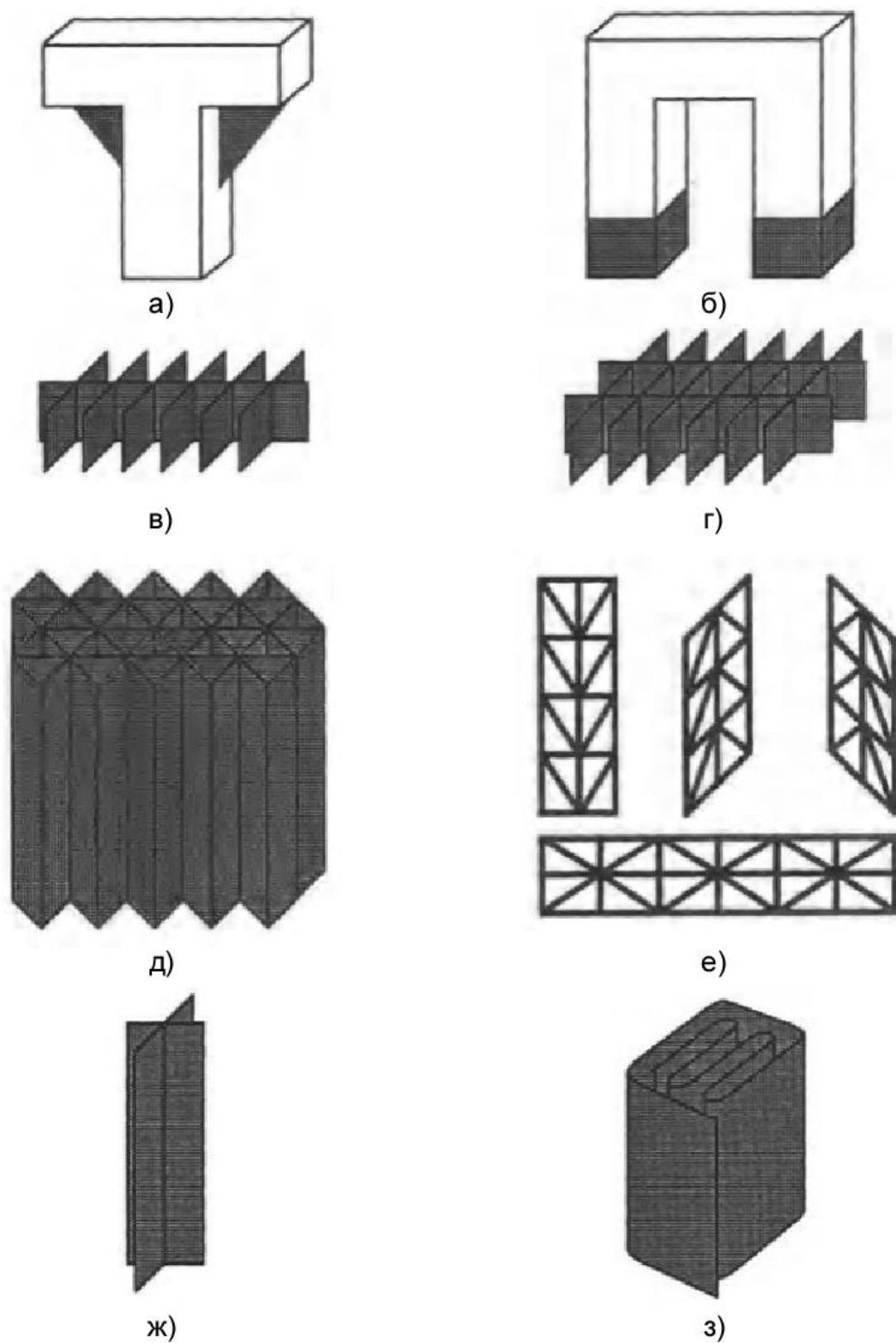


Рисунок 2.16 – Конструкции поддерживающих структур:

- а) укосы; б) спроецированные кромки элементов; в) одиночные перемычки; г) сетки перемычек; д) треугольные перемычки; е) перфорированные стенки; ж) столбики; з) зигзагообразные и периметрические опоры

2.6 Разрезка модели на слои и организация контуров сечений

2.6.1 Разрезка с одинаковой толщиной слоя

Фасеточная STL-модель, используемая для аддитивного производства, содержит набор плоских граней. Эти грани определяют приближенное контурное представление объекта. Для последующей генерации траектории движения формообразующего инструмента необходимо разделить модель на слои либо на основе одинаковой толщины слоя, либо на основе адаптивно-переменной толщины слоя [1].

В первом случае для разделения модели на слои может быть задана последовательность параллельных секущих плоскостей на основе указанной пользователем толщины единичного слоя. При этом предполагается, что модель имеет правильную ориентацию, т.е. такую, при которой ее ось Z совпадает с направлением построения. Общее число слоев модели тогда определится как:

$$n = \frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{d}, \quad (2.1)$$

где Z_{\max} и Z_{\min} – наибольшая и наименьшая z -координаты STL-модели, мм;

d – толщина единичного слоя, мм

Разность Z_{\max} и Z_{\min} задает размер объекта вдоль оси Z . В этом случае секущие плоскости определяются как плоскости, параллельные координатной плоскости XY , следующим образом:

$$z_i = z_{i-1} + d, \text{ при } i = 1, 2, \dots, n \text{ и } z_n = Z_{\min} \quad (2.2)$$

В соответствии с вычисленными координатами для каждой плоскости производится процедура разрезки фасеточной модели, обобщенный алгоритм которой приведен на рисунке 2.17. Для эффективного использования этого алгоритма точки контура сначала должны быть отсортированы в направлении разрезки, т.е. по координате z . Для вычисления точки контура, т.е. для определения пересечения между одной из кромок грани и секущей плоскостью может быть использован простой алгоритм. Принимая, что две конечные точки кромки определяются векторами $\mathbf{p}_1 = \mathbf{x}_1 \mathbf{i}$

$+ y_1\mathbf{j} + z_1\mathbf{k}$ и $\mathbf{p}_2 = x_2\mathbf{i} + y_2\mathbf{j} + z_2\mathbf{k}$, точка пересечения \mathbf{P} кромки с плоскостью z_i будет выражаться как:

$$\mathbf{p} = \left[x_1 + \frac{(z_i - z_1)(x_2 - x_1)}{(z_2 - z_1)}, y_1 + \frac{(z_i - z_1)(y_2 - y_1)}{(z_2 - z_1)}, z_i \right]^T \quad (2.3)$$

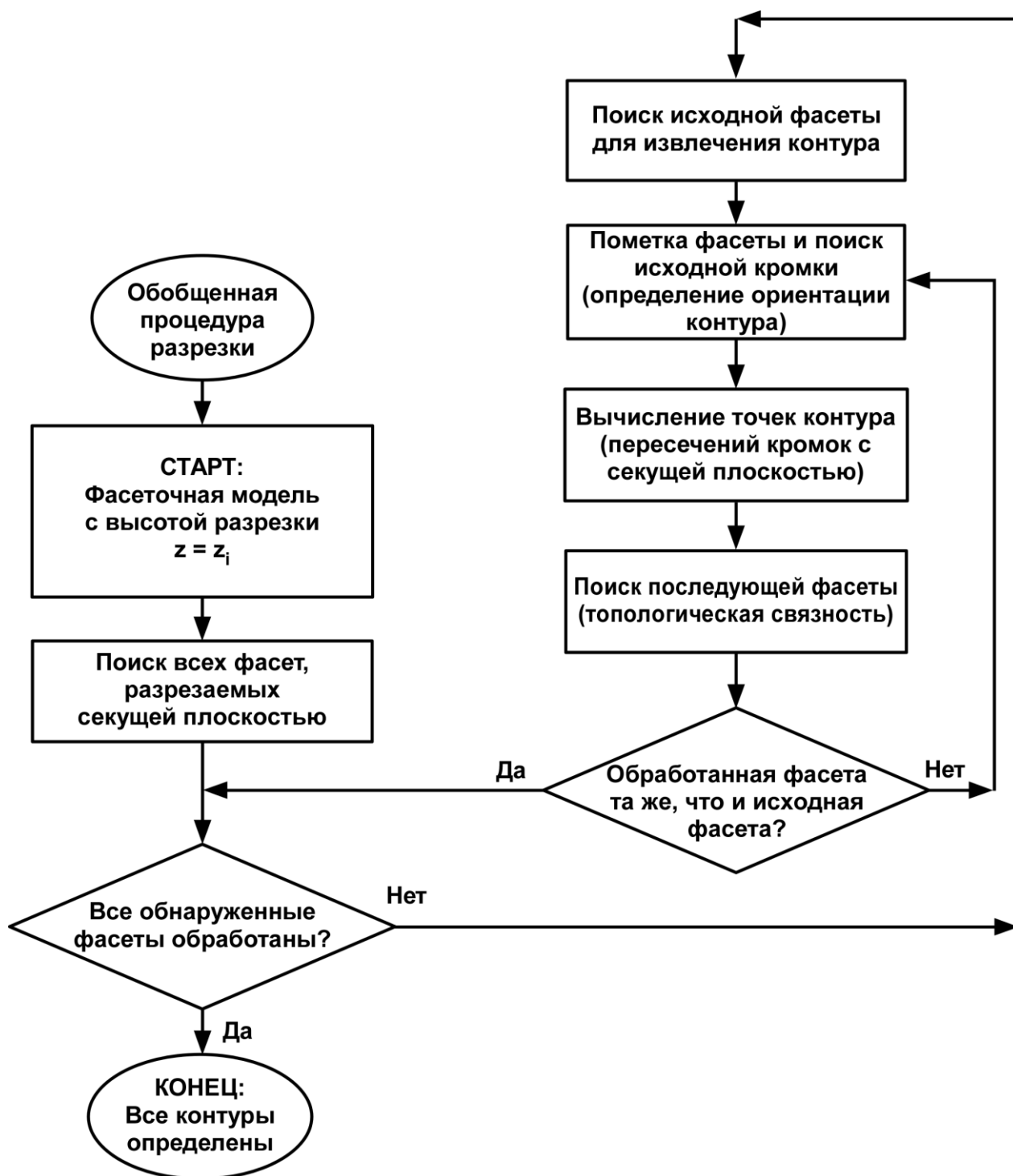


Рисунок 2.17 – Обобщенная процедура разрезки для STL-моделей

В случае стереолитографии толщина первого слоя должна определяться на основе глубины отверждения установки. Иначе говоря, если глубина отверждения конкретной установки равняется h , то z-высота первого слоя должна быть равна:

$$z_1 = Z_{\min} + h \quad (2.4)$$

Контурные точки, вычисленные как простые пересечения между граничными кромками и секущей плоскостью, являются точками профиля поверхности. Для построения прототипов далее необходимо конвертировать точки профиля поверхности в точки профиля оболочки для последующей генерации траектории движения инструмента. Определение контуров оболочки, главным образом, базируется на требованиях допуска. Рисунок 2.18 иллюстрирует несколько возможных случаев с различными требованиями допуска.

- на рисунке 2.18а изображена модель, полученная с использованием метода «сверху-вниз», когда все вычисленные контуры поверхности непосредственно используются как контуры оболочки для текущего слоя при прототипировании модели;

- на рисунке 2.18б изображена модель, полученная с использованием метода «снизу-вверх», когда каждый вычисленный контур поверхности непосредственно используется в качестве контура оболочки для следующего слоя;

- на рисунке 2.18в показана модель, полученная с использованием отрицательного допуска, который приводит к тому, что изготовленная физическая модель будет всегда меньше в размерах, чем фактическая компьютерная модель;

- на рисунке 2.18г показана модель, полученная с положительным допуском, при использовании которого модель всегда имеет большие размеры, чем компьютерная модель.

Нужно заметить, что как в случае отрицательного допуска, так и положительного допуска, точка контура поверхности должна быть использована как точка контура оболочки для текущего или следующего слоя на основе наклона грани, т.е. подрезки грани вверх или вниз.

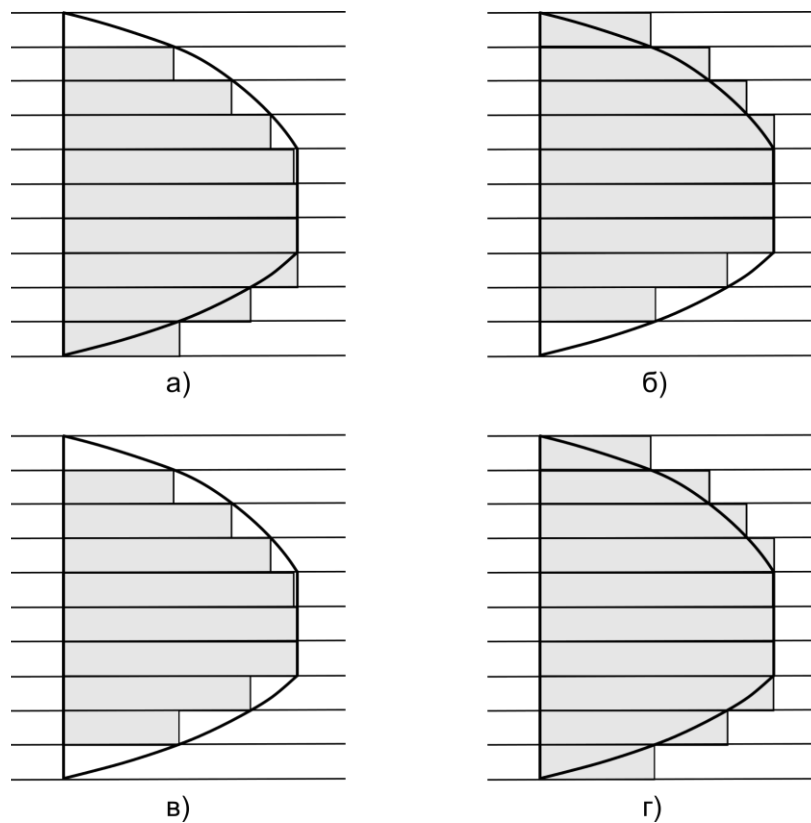


Рисунок 2.18 – Вычисление контура оболочки на основе требований допуска

После завершения разрезки модели и определения контуров оболочек должен быть получен список этих контуров. Каждый из этих контуров будет определяться списком последовательности точек контура. Начальная точка и направление обхода контура (по часовой или против часовой стрелки) могут быть выбраны произвольно. Рисунок 2.19а изображает объект, разрезанный плоскостью, а рисунок 2.19б отдельные треугольники этого объекта с линиями пересечения. На рисунках 2.19в и 2.19г показаны полученные после разрезки модели контуры поверхности, имеющие альтернативные направления обхода.

В зависимости от геометрии модели полученные контуры могут быть внешними и внутренними. Для их идентификации используется некая форма алгоритма трассировки лучей. При реализации этого алгоритма для каждого среза модели проводятся линии параллельные оси X или Y, и вычисляются точки пересечения этих линий с контурами сечения модели, на основе чего определяется расположение контуров внутри или снаружи модели.

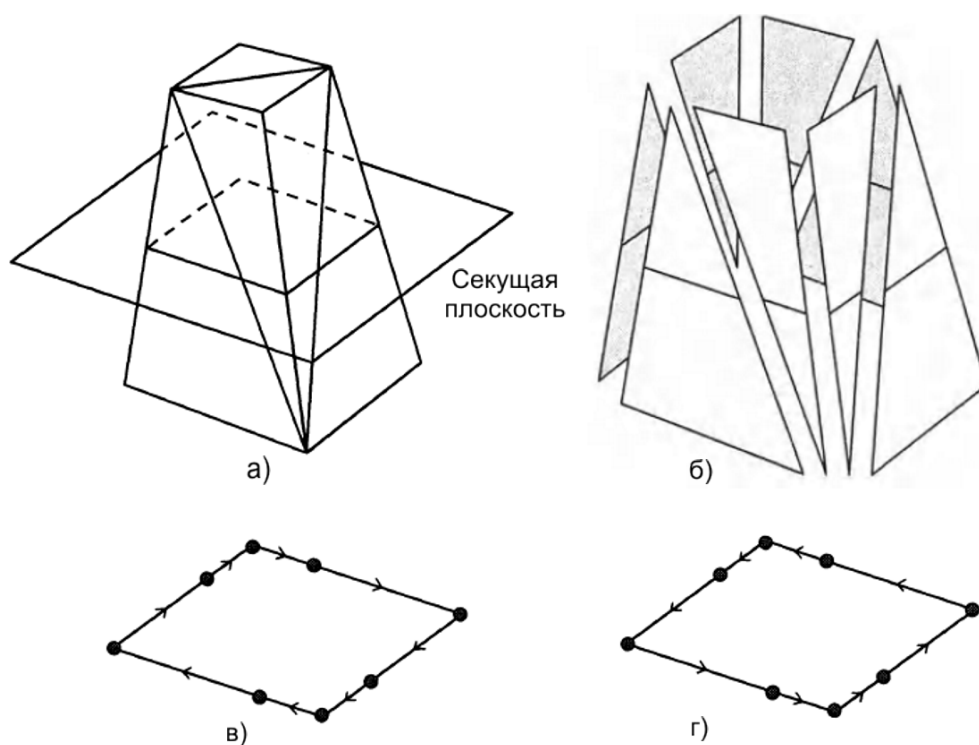


Рисунок 2.19 – Разрезка фасет модели и исходная сортировка данных контура

2.6.2 Адаптивная разрезка модели

Адаптивная разрезка способна обеспечить гладкость поверхностей прототипа при высокой скорости его построения. Процедура адаптивной разрезки может быть подразделена на два этапа, которыми являются идентификация экстремальных точек геометрических элементов и собственно адаптивная разрезка с произвольным допуском.

Идентификация экстремальных точек элементов. При построении прототипов с одинаковой толщиной слоя нет гарантии того, что важные геометрические элементы объекта будут правильно воспроизведены. При адаптивной разрезке слой может быть размещен где угодно и, следовательно, все пиковые элементы могут быть воспроизведены на прототипирующей модели. Для осуществления этого все пиковые элементы САД-модели сначала идентифицируются на поверхностях модели как набор точек элемента. Эти элементные точки подразделяют САД-модель на блоки вдоль направления разрезки, т.е. по координате Z . После сортировки точек их

определяющая координата используется в качестве входных данных для алгоритмов адаптивной разрезки.

Адаптивная разрезка с произвольным допуском. Алгоритм адаптивной разрезки, основанный на кривизне поверхности вдоль вертикального направления в контрольных точках, применяется к каждому из блоков точек с предварительно заданным допуском высоты неровностей и минимальной и максимальной толщиной слоя. Ограничивающие контуры каждого слоя образуются за счет допускаемой толщины слоя, локальной геометрии и заданного допуска.

Использование адаптивной разрезки с переменной толщиной слоя позволяет произвести минимальное число слоев вдоль заданного направления, которые удовлетворяют требованиям высоты неровностей или другому критерию. За счет этого обеспечивается сокращение времени построения.

При определении толщины слоя важными входными данными являются требования допуска быстрого прототипа. Распределение допуска может быть либо отрицательным, либо положительным, либо комбинированным, как показано на рисунке 2.20. Отрицательный допуск, показанный на рисунке 2.20а, может быть использован в случаях, когда изготовленная деталь служит, например, в качестве литейной модели. Положительный допуск, показанный на рисунке 2.20б, часто используется в ситуациях, где после изготовления детали, предполагается постобработка, такая как, например, полирование. В других общих ситуациях для точного представления модели или удовлетворения других условий соответствия может быть предпочтителен комбинированный допуск, показанный на рисунке 2.20в.

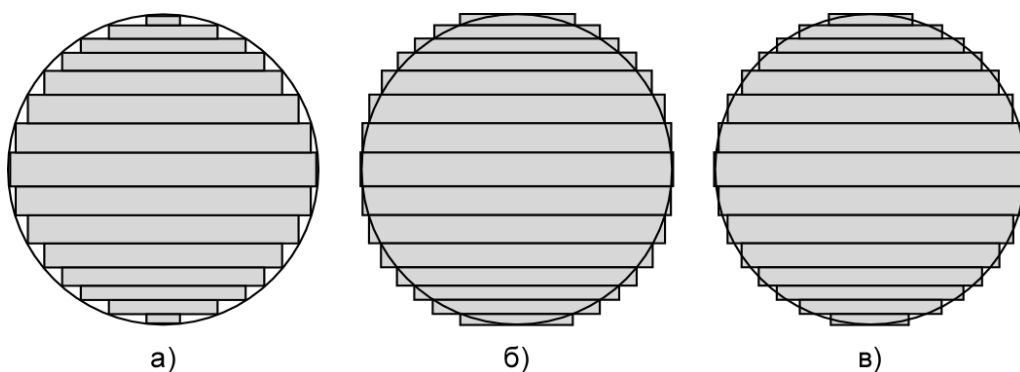


Рисунок 2.20 – Распределение допуска при переменной толщине слоя

2.7 Генерация траектории движения инструмента

Как только данные контура сечения будут готовы, для них возникает проблема генерации траектории движения инструмента, зависящая от типа аддитивного процесса [1]. В частности, большинство аддитивных процессов являются процессами послойного построения, где генерация траектории может осуществляться от слоя к слою, начиная с нижнего слоя модели. На рисунке 2.21 показан образец детали с одним слоем, содержащим контур сечения поверхности, для иллюстрации различных траекторий инструмента, используемых при быстром прототипировании.

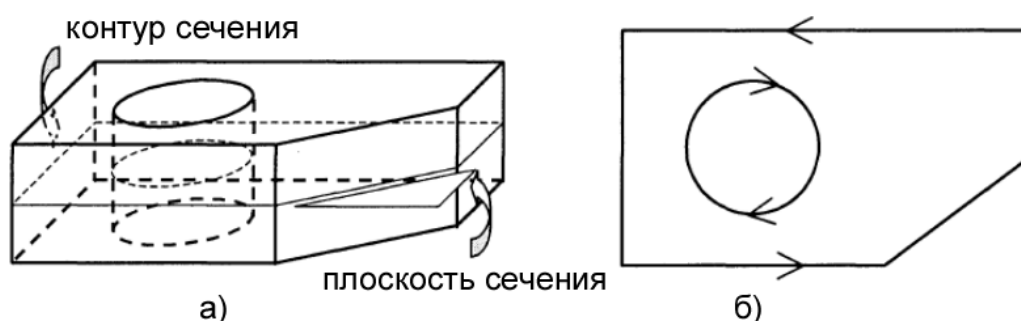


Рисунок 2.21 – Пример, иллюстрирующий различные траектории инструмента для прототипирования модели: а) исходная деталь с секущей плоскостью и контуром сечения, б) контуры сечения на плоскости XY

В общем случае подходы к генерации траекторий инструмента для всех аддитивных процессов можно классифицировать на следующие категории:

- растровое сканирование. Растровое сканирование связано со сканированием вдоль координатной оси для отверждения модели. Эта самая простая стратегия для генерации траектории при послойном производстве изделий. Она может применяться в случае процесса стереолитографии, селективного лазерного спекания и некоторых других процессов 3D печати. На рисунке 2.22а показан типовой растр, полученный путем выполнения двух ортогональных сканирующих операций вдоль осей X и Y для отверждения внутренней области;

- периметрическое сканирование. Метод периметрического сканирования, иллюстрируемый рисунком 2.22б (показан только один периметр) часто использует

ся для построения наружных поверхностей. Данный метод также может быть преобразован в метод оконтуривания с множеством периметров, имеющих эквидистантные контуры. Метод применим практически ко всем аддитивным процессам, включающим отверждение граничной области модели. Следует заметить, что это главная стратегия обрезки листового материала в технологии изготовления слоистых объектов (LOM). Рисунок 2.22в изображает сканированный образец, полученный однократным периметрическим сканированием, с наложенным на него внутренним ортогональным X-Y растром. Данный пример иллюстрирует основной шаблон, используемый стилями «WEAVE» и «STAR-WEAVE» в стереолитографических установках компании «3D Systems»;

- направленное сканирование. Иногда растровое сканирование может давать большое число сканирующих векторов, и может быть более выгодным выполнять сканирование вдоль произвольных траекторий, таких как наклонные прямые либо другие профилирующие линии. В некоторых других случаях может возникнуть потребность в использовании направленного сканирования для улучшения механических свойств изготовленной модели. Рисунок 2.22г изображает сканированный образец с единственным периметром и тремя группами линий, сканированных под углом 0° , 60° и 120° относительно оси X. На данном образце основывается сканирующий стиль «Tri-Hatch», который когда-то использовался стереолитографическими установками «3D Systems»;

- зигзагообразная траектория инструмента. Зигзагообразная траектория инструмента часто используется при моделировании методом наплавления (FDM), трехмерной сварке (3D Welding) и в других аддитивных системах экструзионного типа. Она также используется для некоторых дозированных и поточечных процессов, таких как 3D печать (3DP) и баллистическое осаждение частиц (BPM). На рисунке 2.22д показана зигзагообразная траектория инструмента, необходимая для отверждения поверхности в пределах единственного периметра. Рисунок 2.22е изображает наклонную зигзагообразную траекторию для отверждения внутреннего пространства области с тремя периметрами;

- оконтуривающие и спиральные траектории. Оконтуривающие и спиральные

траектории движения инструмента также могут использоваться для прототипирующих моделей. Для деталей с определенной геометрией такие подходы могут давать детали с улучшенными механическими свойствами. Рисунок 2.22ж иллюстрирует оконтуривающую траекторию инструмента для образца детали;

- построчное сканирование. Построчное сканирование часто используется для некоторых процессов печати на основе впрыска, таких как процесс, используемый 3D принтером «ThermoJet» производства компании «3D Systems». В данном случае каждый слой производится путем распространения единственного линейного компонента вдоль главного направления сканирования (рисунок 2.22з);

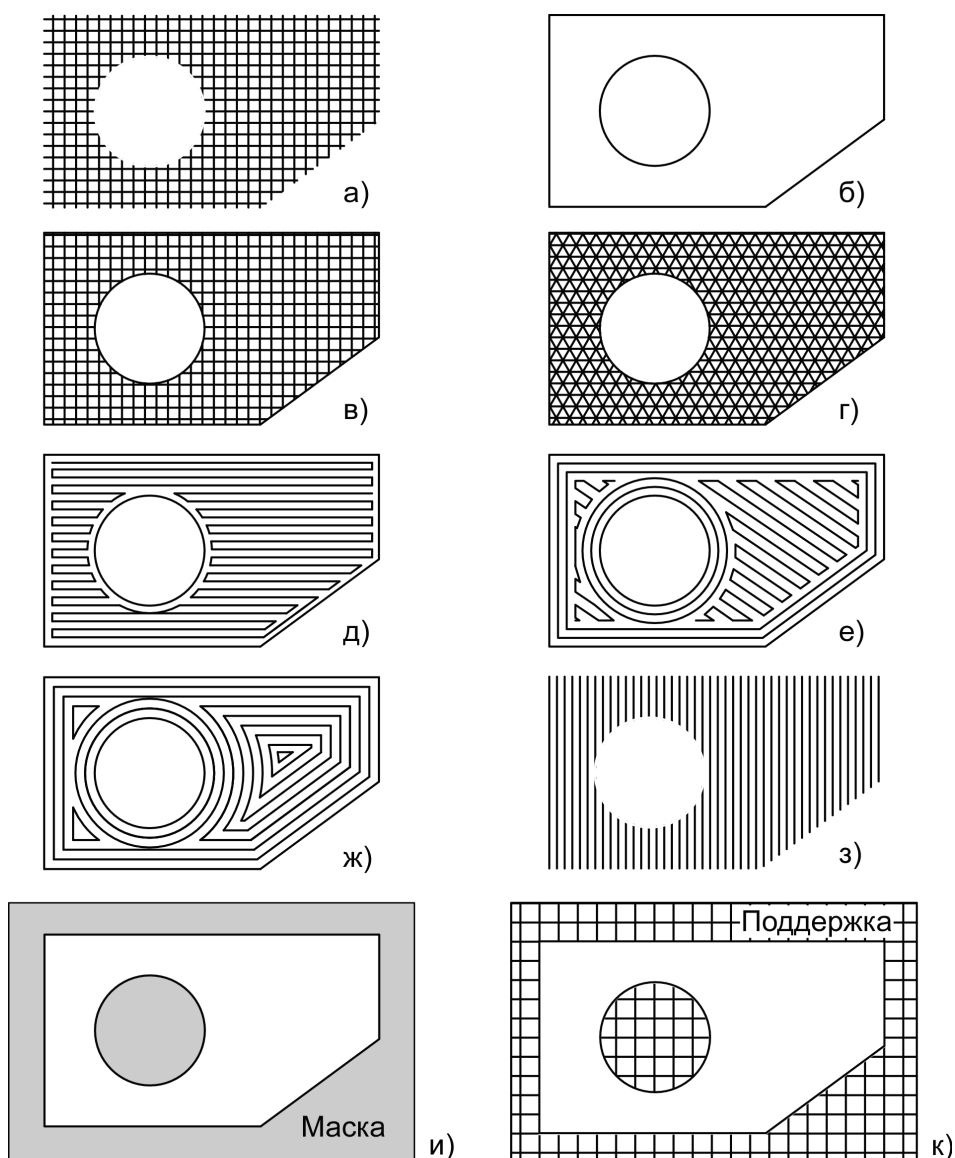


Рисунок 2.22 – Типовые траектории движения инструмента при построении моделей

- отверждение по участкам. Некоторые аддитивные процессы производят прямое отверждение объекта участок за участком. Типичным примером являются основанные на фотополимеризации процессы, такие как процесс отверждения на твердой основе компании «Cubital». Как показано на рисунке 2.22и в процессе используется предварительно подготовленная маска на основе контура сечения и тонкий слой фотополимерной смолы, которая затем избирательно отверждается путем облучения вспышкой ультрафиолетового света;

- обрезка по контуру (вариант периметрического сканирования). При изготовлении объектов с использованием ламинирования (LOM) применяется стратегия обрезки по контуру. В этом процессе поддерживающий материал вокруг объекта разрезается ортогональной X-Y сеткой с учетом контуров объекта, что облегчает его последующее удаление. Данный подход проиллюстрирован на рисунке 2.22к.

Хотя большинство существующих аддитивных систем при создании различных сканирующих траекторий используют векторы, также для этого может использоваться прямое оконтуривание на основе точной параметризации (например, круговые движения). По аналогии с процессами резания со съемом материала, при генерации траекторий для сканирования поверхности должна учитываться величина поправки инструмента. Иногда это представляет собой сложную проблему особенно для лазерных процессов, когда в случае отклонения лазерного луча от вертикальности для отдельных слоев его спроецированное лазерное пятно будет эллиптическим, т.е. уже не будет больше круглым. Еще одной проблемой, на которую следует обращать внимание при реализации практически всех аддитивных процессов, является постпроцессинг. В ходе его выполнения вычисленные траектории инструмента преобразуются в управляющие коды для отдельных осей конкретного аддитивного процесса.

Для генерации траекторий движения инструмента необходимо определять точки пересечения между сканирующими векторами и контурами поверхностей. Это опять может быть выполнено с помощью алгоритмов трассировки лучей. Вдобавок к этому, при использовании периметрического сканирования, оконтуривающих и спиральных подходов необходимо генерация смещенных плоских кривых, эквиди-

стантных к исходным контурам сечений. Алгоритмы построения смещенных кривых приводятся в литературе по CAD/CAM системам, при рассмотрении операций контурного фрезерования и фрезерования карманов.

2.8 Контрольные вопросы

1 Какие основные требования предъявляются к CAD-моделям, используемым для аддитивного производства?

2 Что собой представляет схема реализации CAD-моделей, основанная на твердотельной конструктивной геометрии?

3 Что собой представляет схема реализации CAD-моделей, основанная на контурном представлении?

4 В чем заключаются особенности представления геометрии моделей в формате STL?

5 В чем заключаются достоинства и недостатки формата ASCII и бинарного формата STL файлов?

6 Каким образом осуществляется экспорт геометрических моделей в формат STL в современных CAD-системах?

7 В чем заключается проблема избыточности данных при использовании STL интерфейса?

8 Какие топологические проблемы могут наблюдаться при использовании геометрических моделей в формате STL?

9 Какие геометрические проблемы могут иметь место при использовании геометрических моделей в формате STL?

10 Какие основные характеристики определяют ориентацию детали при ее построении аддитивными методами?

11 Какие функции выполняет поддержка детали при ее построении аддитивными методами?

12 Из каких функциональных зон состоит поддержка детали?

13 Какие виды поддерживающих структур используются при построении деталей аддитивными методами?

- 14 Каким образом осуществляется разрезка модели на слои одинаковой толщины при подготовке к построению аддитивными методами?
- 15 Каким образом осуществляется учет требований допуска при вычислении контуров сечений модели?
- 16 На чем основан алгоритм идентификации внешних и внутренних контуров модели?
- 17 Какие этапы включает в себя процедура адаптивной разрезки модели на слои переменной толщины?
- 18 Каким образом производится генерация траекторий движения инструмента при использовании растрового сканирования?
- 19 Каким образом производится генерация траекторий движения инструмента при использовании периметрического сканирования?
- 20 Каким образом производится генерация траекторий движения инструмента при использовании направленного сканирования?
- 21 В каких случаях используются зигзагообразные траектории инструмента при построении моделей?
- 22 В каких случаях используется построчное сканирование при построении моделей?

3 Процессы и технологии аддитивного производства

3.1 Процессы аддитивного производства на основе жидких материалов

Отличительной особенностью таких процессов является использование исходных материалов в жидком состоянии. В большинстве случаев их достоинством является высокое качество поверхностей получаемых деталей, что объясняется гладкостью жидкой поверхности в устойчивом состоянии. Однако для получения готовых изделий эти материалы должны каким-либо способом преобразовываться в твердое состояние, что ограничивает их использование.

Чаще всего в качестве отверждаемого исходного материала применяется свето- или теплочувствительная эпоксидная смола, отверждение которой осуществляется направленным воздействием светового или теплового источника внутри специального бака. Примером такого источника может служить ультрафиолетовый лазер, сканирующий поверхность смолы и постепенно отверждающий ее мельчайшими участками в пределах заданного контура. За счет этого достигается хорошая точность детали.

Кроме теплового или светового воздействия отверждение соответствующих жидкостей возможно и другими способами, например, использованием источника холода, а также химическим или электрическим воздействием. Однако аддитивные процессы, основанные на таких способах отверждения, пока еще находятся в разработке и коммерческой реализации не получили [3].

В настоящее время получили распространение несколько аддитивных процессов, основанных на использовании жидких материалов, наиболее известными из которых выступают стереолитография (SLA), отверждение на твердой основе (SGC) и быстрая заморозка (RFP).

3.1.1 Процесс стереолитографии

Стереолитография является первым коммерческим процессом быстрого прототипирования. Запатентованная в 1986 году, стереолитография ознаменовала начало революции в аддитивном производстве. Ее принцип действия основан на послой-

ном отверждении ультрафиолетовым лазером светочувствительной смолы в целях создания трехмерных объектов. Стереолитография использует смолу, которая может быть эпоксидной, винилэфирной и полиакрилатной [3].

В процессе стереолитографии данные трехмерной CAD-модели преобразуются в набор очень тонких сечений так, как, если бы объект был разрезан на сотни или тысячи слоев. Затем эти слои для построения трехмерного объекта воспроизводятся в смоле, для чего жидкая смола помещается в бак с платформой, имеющей возможность вертикального перемещения. Объект в процессе построения поддерживается этой платформой, которая постепенно опускается по мере создания слоев на величину равную толщине слоя (обычно порядка 0,1 мм). Формирование каждого слоя осуществляется путем перемещения лазерного луча по поверхности жидкой смолы, ограниченной контуром текущего сечения объекта. Ультрафиолетовое излучение лазера вызывает отверждение смолы точно в той точке, где оно достигает поверхности. Для управления перемещениями лазера в плоскости X-Y используется сканер с гальванометрическим зеркалом (рисунок 3.1).

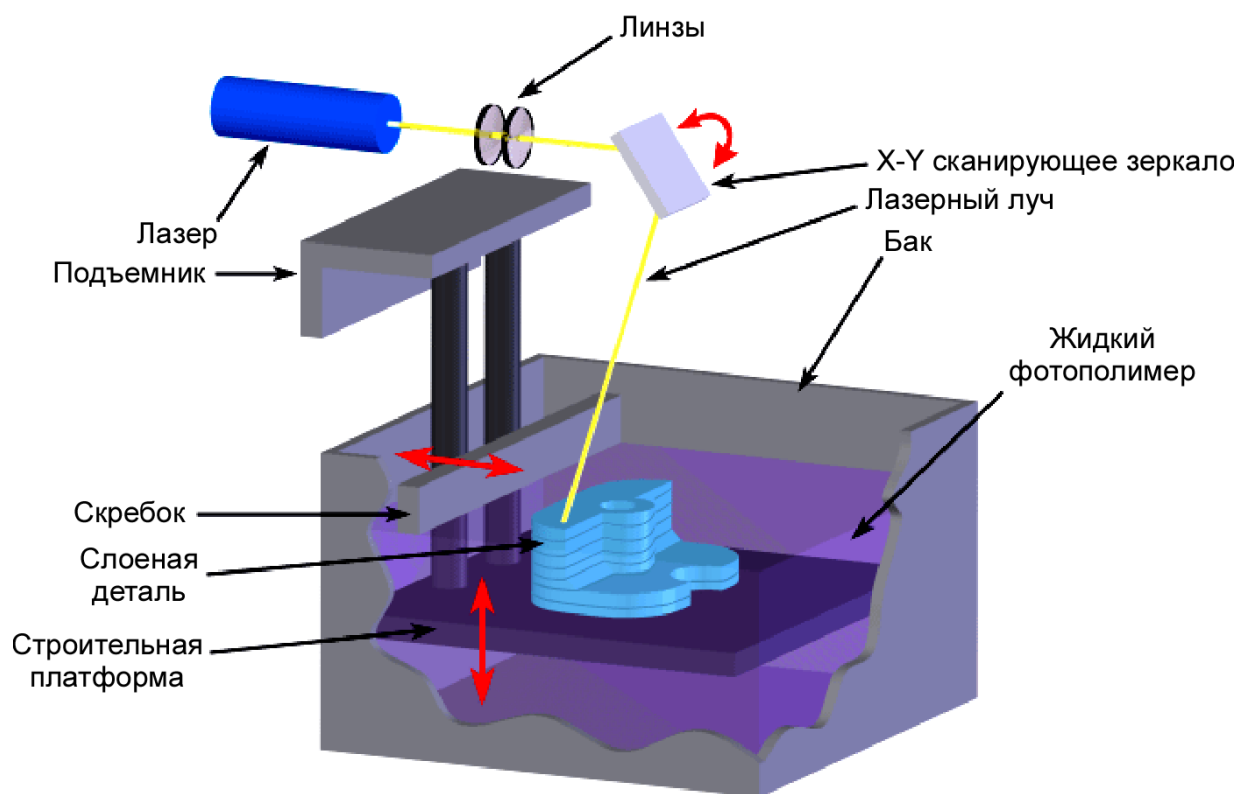


Рисунок 3.1 – Схема стереолитографического процесса

Этапы построения детали в данном случае могут быть проиллюстрированы рисунком 3.2. На первом этапе на поверхности платформы формируется слой смолы заданной толщины (рисунок 3.2а), который начинает сканироваться маломощным сфокусированным лазером, что приводит к отверждению участка, соответствующего по форме поперечному сечению модели (рисунок 3.2б). При этом участок находится в окружении жидкой смолы. Далее подъемник опускает платформу в жидкую смолу на величину равную толщине следующего слоя. Скребок покрывает отвержденный слой жидким материалом, и лазер начинает сканировать второй слой поверх первого (рисунок 3.2в). Данный процесс повторяется до завершения детали (рисунок 3.2 г и 3.2д).

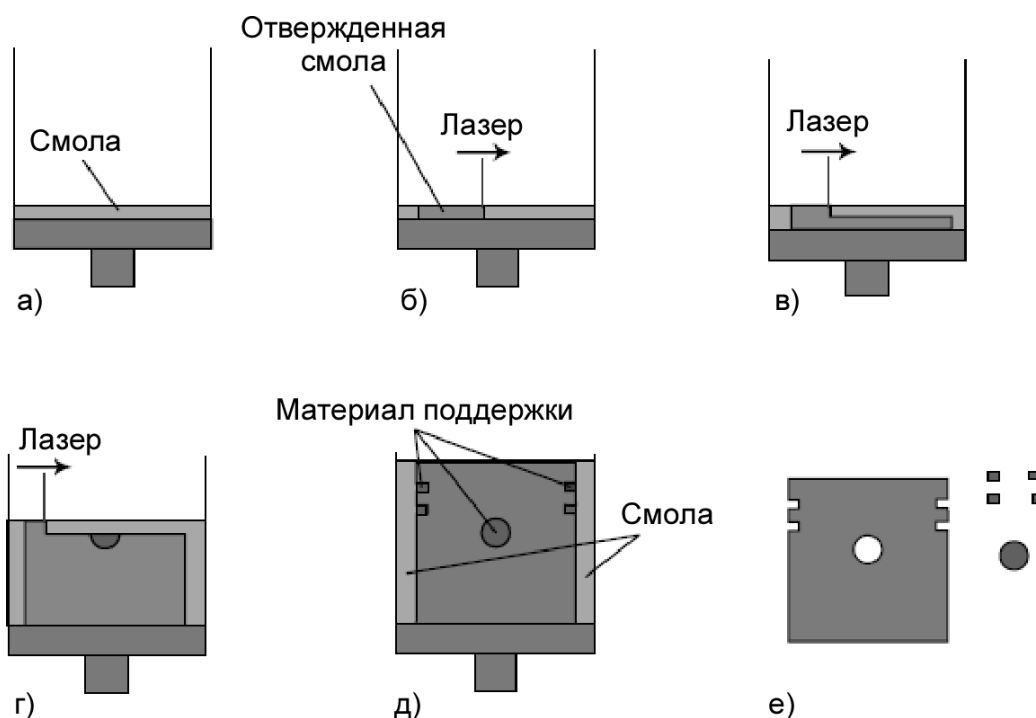


Рисунок 3.2 – Этапы реализации процесса стереолитографии

Следует заметить, что во всех случаях при построении детали к ее основанию прикрепляется поддерживающая структура. Ее назначение заключается в том, чтобы приподнять деталь над платформой с обеспечением минимальной площади контакта. После завершения построения эта структура удаляется, и деталь помещается в ультрафиолетовый свет для окончательного отверждения смолы (рисунок 3.2е).

В существующих коммерческих системах, основанных на процессе стереолитографии, описанная технология существенно усовершенствована. Например, в системе модели «Viper Pro SLA» производства компании «3D Systems» (США), изображенной на рисунке 3.3, используется настраиваемый диаметр лазера, что дает возможность управлять скоростью построения детали. Объем ее рабочего пространства составляет 1500×705×500 мм, и позволяет создавать достаточно крупные детали, такие как приборные панели автомобилей.



Рисунок 3.3 – Стереолитографическая система модели «Viper Pro SLA»

Уникальность процесса стереолитографии заключается в его хорошем разрешении и высокой точности. Конечный продукт, получаемый с его помощью, представляет собой физическую модель очень близкую к оригиналу, которая позволяет проектировщикам, инженерам, производителям и т.д. оценить новое изделие. Проектные разработки, выполняемые таким путем, могут осуществляться быстро и дешево, с гарантией достижения наивысшего возможного качества в кратчайшие сроки. В связи с этим стереолитография становится востребованной технологией во

многих отраслях. Примерами может служить аэрокосмическая, военная и автомобильная промышленность, производство бытовой электроники и потребительских товаров, игрушек, промышленного и медицинского оборудования, хирургия и стоматология (рисунок 3.4).

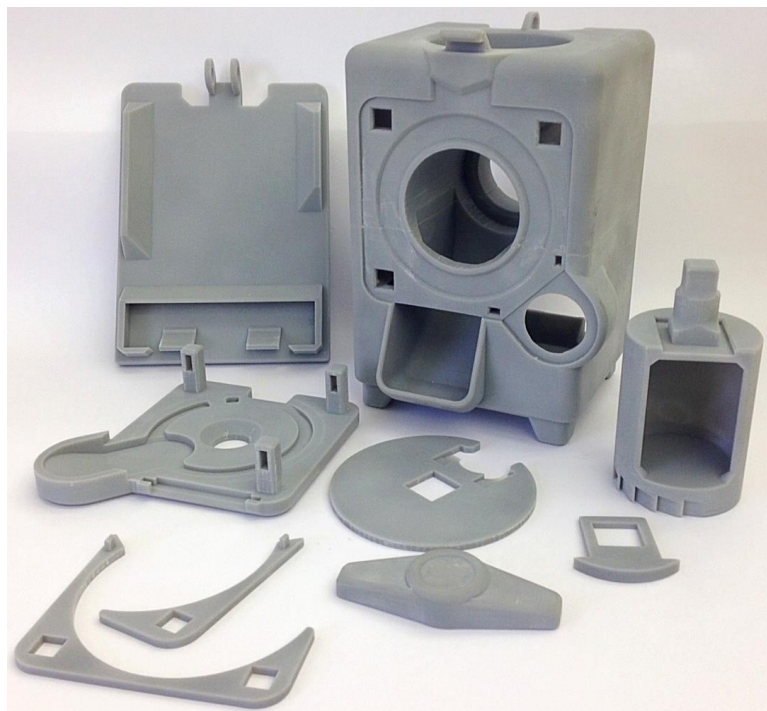


Рисунок 3.4 – Примеры деталей, полученных методом стереолитографии (с использованием материала Accura Xtreme)

По причине того, что стереолитография является первой аддитивной технологией, она рассматривается как эталон, с которым сравниваются другие технологии. И хотя ранние стереолитографические прототипы были довольно хрупкими и подверженными короблению и деформациям, в последних модификациях эти проблемы в значительной степени решены.

Для любого аддитивного процесса большую важность имеет его стабильность, и это качество в полной мере присуще процессу стереолитографии. Будучи запущенным, процесс стереолитографического построения происходит полностью в автоматическом режиме до своего завершения. При этом он обеспечивает хорошую размерную точность деталей, которая варьирует в пределах $\pm 0,1$ мм. Благодаря

свойствам жидкой смолы детали, изготовленные из нее, имеют хорошее качество поверхности – для верхних поверхностей может быть достигнуто качество близкое к гладкости стекла. Несмотря на это, на боковых стенках деталей могут присутствовать ступеньки, а между слоями наблюдаться деформации.

Недостатком изделий, полученных методом стереолитографии, является абсорбция смолой влаги, которая со временем приводит к искривлению и короблению тонких стенок деталей. Сама система имеет довольно высокую стоимость и позволяет использовать в качестве строительного материала только дорогостоящую светочувствительную смолу. Во многих случаях детали, полученные с помощью стереолитографии, не могут использоваться для испытаний на выносливость и тепловых испытаний. Кроме того, детали, как правило, не полностью отверждаются лазером внутри бака. Это объясняется тем, что когда лазер отверждает точку поверхности, его энергия рассеивается в конической области, как показано на рисунке 3.5. В результате по всему объему детали остаются недостаточно отвержденные участки. По этой причине после завершения построения обычно требуется дополнительное отверждение в ультрафиолетовом свете. Также следует заметить, что используемый в системе оптический сенсор требует периодической точной настройки для поддержания оптимальных условий эксплуатации, которая может быть довольно трудоемкой, как и работа, связанная с постпроцессингом – особенно очисткой деталей [3].

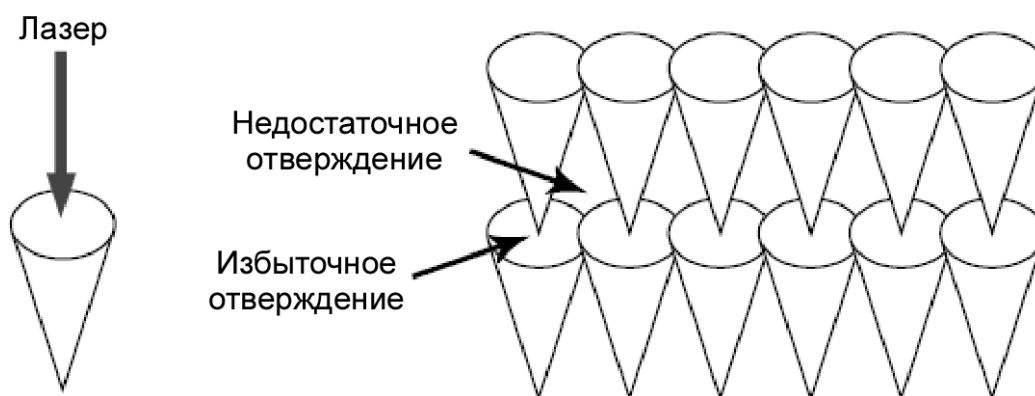


Рисунок 3.5 – Конические элементы, генерируемые лазером и приводящие к образованию неотвержденных участков смолы

Главным достоинством аддитивных технологий является то, что с их помощью может быть получена фактически любая геометрическая форма. Однако все эти процессы имеют свои ограничения. Если говорить конкретно о процессе стереолитографии, то здесь проблемой является построение деталей с закрытыми полостями. Эти полости по завершению построения остаются заполненными жидкой смолой, заключенной внутри отвержденного материала, что недопустимо. И до тех пор, пока не будет разработан метод отведения жидкого материала из полости детали или его удаления после завершения построения, это обстоятельство будет ограничивать использование процесса стереолитографии.

3.1.2 Аддитивные процессы, основанные на использовании маски

Представителем подобных процессов является отверждение на твердой основе (Solid Ground Curing) – процесс, разработанный израильской компанией «Cubitai, Inc.». Схема аддитивного процесса, основанного на использовании маски, приведена на рисунке 3.6. В качестве основного материала в этом процессе используется светочувствительная смола, а в качестве вспомогательного материала – воск. Процесс реализуется по принципу, схожему с ранее рассмотренным процессом стереолитографии, но в отличие от него здесь каждый слой образуется за раз целиком [3].

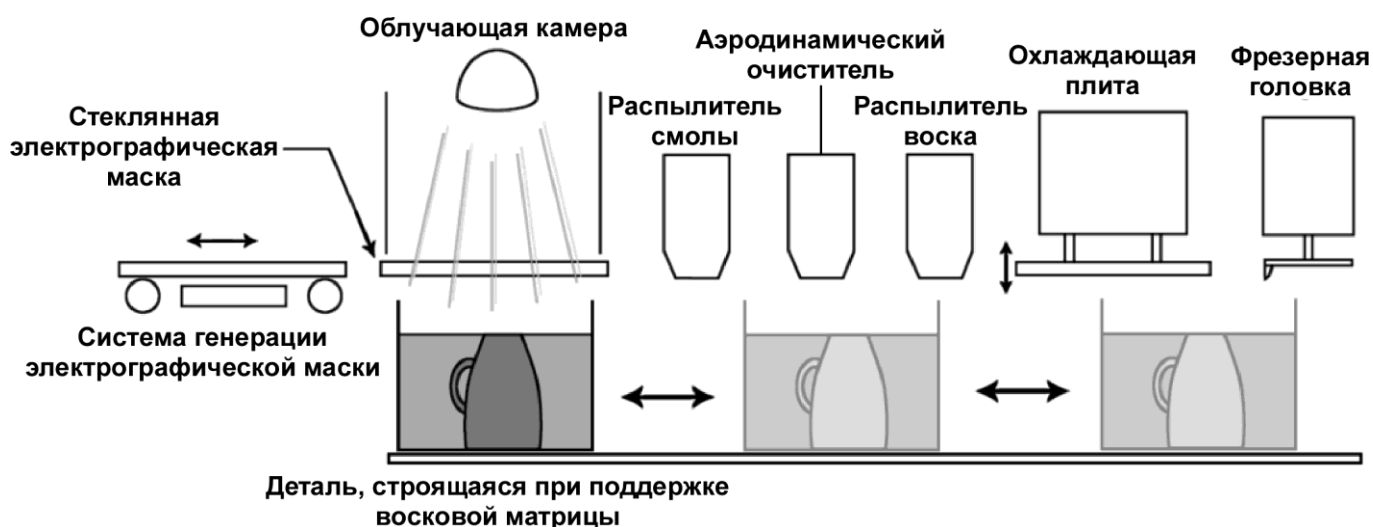


Рисунок 3.6 – Схема аддитивного процесса, основанного на использовании маски

Его основными этапами являются следующие операции:

- нанесение светочувствительной смолы на платформу. На платформу, служащую для поддержки детали, при помощи подающего устройства наносится слой смолы (рисунок 3.7а);

- подготовка фотомаски. Необходимая маска генерируется электростатическим переносом тонера на стеклянную пластину для создания на ней изображения поперечного сечения строящегося объекта. Данный процесс осуществляется электронной пушкой, наносящей потенциальное (невидимое) изображение на пластину, которая затем обрабатывается тонером. В системе используется черный электростатический тонер, который прилипает к заряженным ионам на поверхности обработанной пластины. В результате на ней формируется узор, который является негативным изображением поперечного сечения объекта, и его прозрачные области точно соответствуют контуру этого сечения. Далее стеклянная пластина перемещается в обучающую камеру, где позиционируется над строящимся объектом (рисунок 3.7б);

- отверждение смолы (рисунок 3.7в). После позиционирования маски затвор камеры открывается, позволяя облучающему свету проходить сквозь маску и быстро отверждать слой смолы требуемой конфигурации. Иначе говоря, облучение смолы ультрафиолетовым светом здесь производится через фотомаску, что обеспечивает отверждение слоя смолы только под прозрачными участками этой маски (рисунок 3.7г). По причине высокой интенсивности света слой отверждается полностью, и не требует дополнительного отверждения, как в случае процесса стереолитографии. По завершению отверждения текущего слоя стеклянная пластина очищается от тонера и разряжается, после чего на ней генерируется новая маска для повторения цикла;

- вакуумное удаление жидкой смолы (рисунок 3.7д). Объект помещается в аэродинамический очиститель, где неотвержденные порции смолы удаляются при помощи насоса (рисунок 3.7е);

- заполнение воском (рисунок 3.7ж). Тонкий слой жидкого воска распыляется по всей поверхности основного материала, заполняя области, ранее содержавшие жидкий полимер. Воск после своего охлаждения застывает и выполняет функцию поддержки детали;

- фрезерование поверхности (рисунок 3.7з). Как только воск застынет, его излишки удаляются с верхней поверхности смолы механическим путем при помощи фрезы. Слой фрезеруется на заданную толщину, за счет чего обеспечивается плоская поверхность, готовая для создания следующего слоя. Образующаяся при этом стружка одновременно удаляется при помощи насоса.

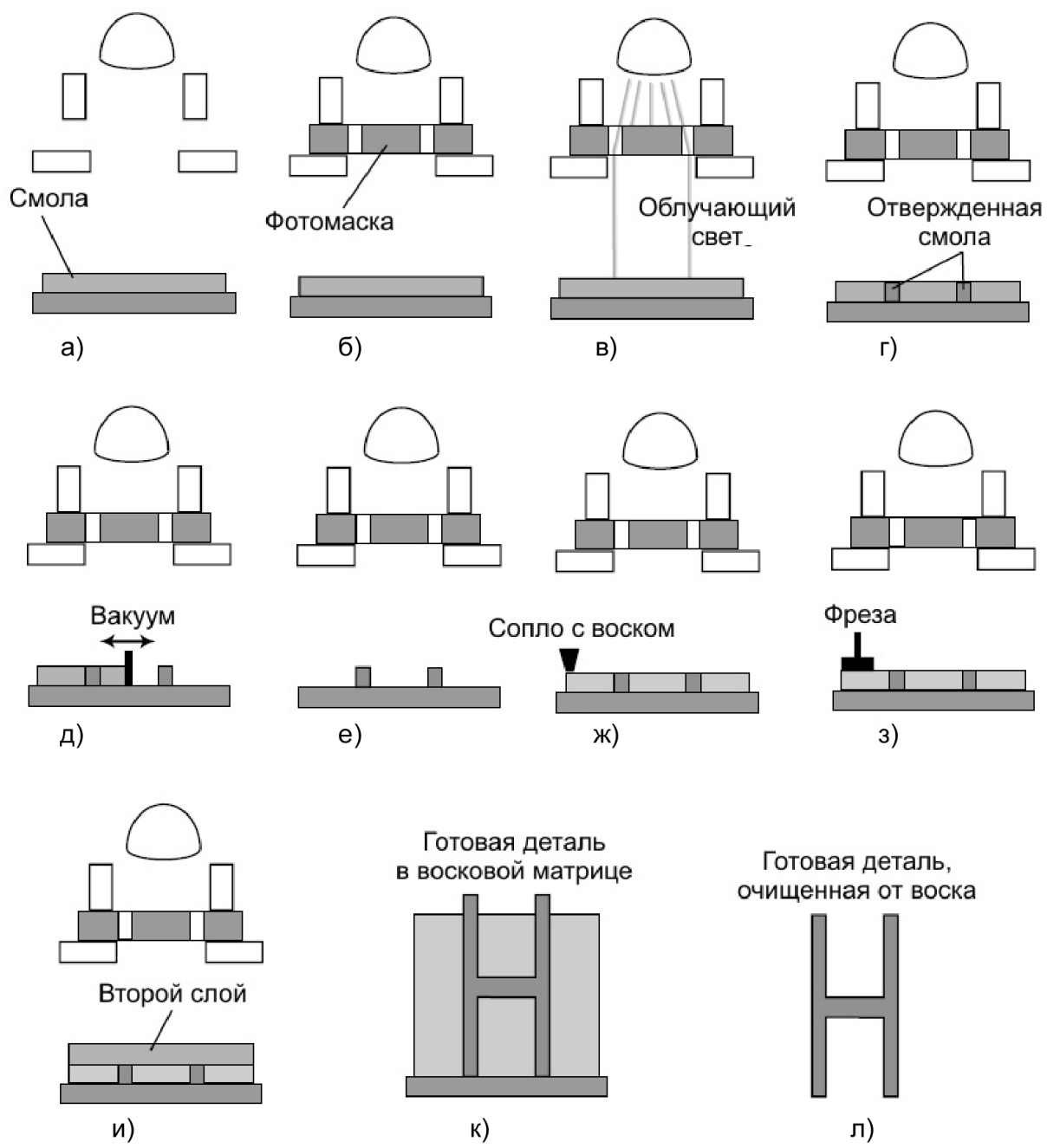


Рисунок 3.7 – Этапы процесса, основанного на использовании маски

Далее цикл повторяется, при этом на создание одного слоя уходят около 2 минут. По завершению построения детали, она подвергается дополнительной обработке для удаления воска. Он может быть либо вытоплен, либо смыт с использованием специальной моечной машины. Объект затем шлифуется или подвергается другой финишной обработке. Восковая матрица исключает необходимость генерации дополнительных поддерживающих структур для нависающих участков и вырезов, что в сочетании с большой вместимостью системы, позволяющей размещать внутри рабочего пространства большое число объектов, обеспечивает высокую производительность процесса.

В отличие от многих традиционных аддитивных процессов процесс, основанный на использовании маски, рассматривается как высокопроизводительный процесс. Высокая производительность достигается путем отверждения слоя светочувствительной смолы целиком, а не по точкам, как в случае стереолитографии. Кроме того, здесь возможна параллельная обработка нескольких деталей за счет большого объема рабочего пространства и вертикального расположения фрезерной головки. Использование восковой матрицы обеспечивает надежную поддержку детали во всех измерениях и исключает необходимость генерации специальных поддерживающих структур. Благодаря полному отверждению слоев не возникает коробления деталей, а использование фрезерной обработки помогает исправить ошибочно нанесенные слои.

К недостаткам процесса следует отнести большой объем физического пространства, занимаемый системой его реализации (в сравнении с другими системами, имеющими сопоставимый объем рабочего пространства). Процесс сложен, имеет высокую стоимость и требует наблюдения за ним квалифицированного оператора. Использование восковой матрицы приводит к тому, что в мелких внутренних элементах детали после ее очистки может остаться воск, который затруднительно отсюда удалить. Кроме того, система производит высокий уровень шума в сравнении с другими системами аналогичного назначения. Компания, разработавшая процесс, в настоящее время больше не существует, а права на ее интеллектуальную собственность приобретены другой компанией «Objet Geometries, Ltd.»

3.1.3 Процессы, основанные на впрыске жидкого материала

Представителем такого процесса является аддитивный процесс «PolyJet», сочетающий струйную печать и стереолитографию. Данный процесс, разработанный компанией «Objet Geometries», использует технологию струйной печати для нанесения поддержки и основного материала в комбинации с отверждением жидкого материала ультрафиолетовым светом. В отличие от некоторых 3D принтеров он способен давать результаты близкие к результатам стереолитографического процесса [3]. В настоящее время доступно несколько моделей оборудования, основанного на данном процессе. На рисунке 3.8 показана система модели «PolyJet Eden260V» с размерами рабочей зоны 250×252×200 мм.



Рисунок 3.8 – Система модели Eden260V

Как показано на рисунке 3.9, при реализации этого процесса головки с соплами перемещаются вперед и назад вдоль оси X и наносят тонкий слой фотополимера на лоток для построения детали. Сразу же после нанесения слоя ультрафиолетовые лампы, расположенные вдоль моста с распыляющими головками начинают испускать свет, что приводит к немедленному отверждению слоя. Такой подход устраняет

потребность в дополнительном послемодельном отверждении, которое требуется при использовании стереолитографии. После завершения первого слоя лоток с высокой точностью опускается по оси Z и распыляющие головки с соплами начинают построение следующего слоя. Процесс повторяется до завершения модели.

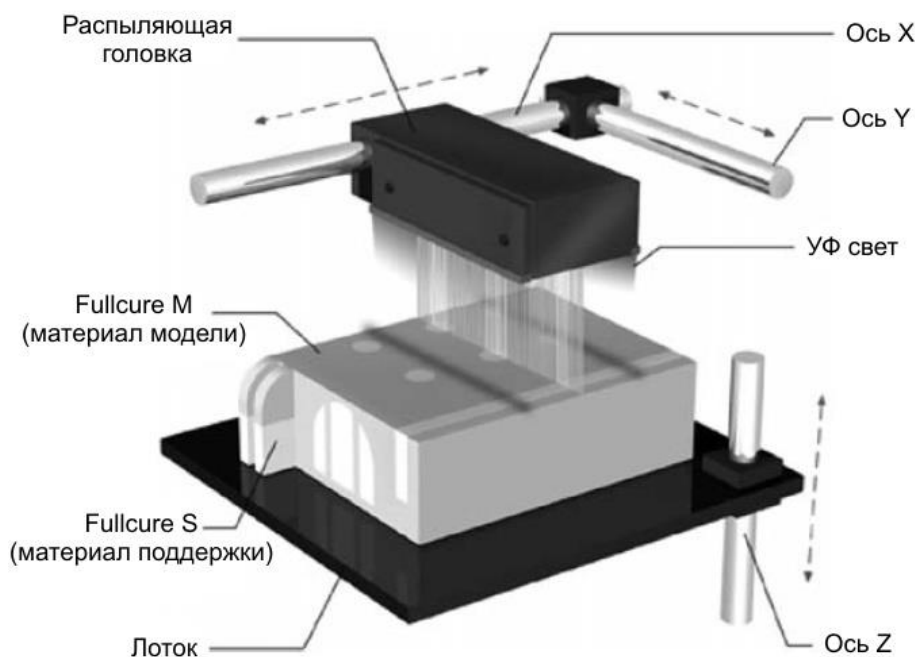


Рисунок 3.9 – Схема реализации процесса «PolyJet»

Программное обеспечение процесса управляет перемещениями восьми распыляющих головок, каждая из которых может перемещаться отдельно. Программные инструменты реализуют параллельную работу головок, синхронно распыляющих одинаковое количество смолы на лоток. Это приводит к образованию плоской и гладкой поверхности слоя. Для построения используются два различных материала: один используется для собственно модели, а другой гелеобразный фотополимерный материал используется для поддержки. Так же, как и при реализации других аддитивных процессов, геометрия поддерживающей структуры заранее программируется в соответствии с геометрией строящейся детали, имеющей нависающие участки, выточки или тонкостенные секции. По завершению построения гелеобразный материал поддержки вымывается струей воды под давлением.

Для реализации процесса могут использоваться несколько материалов. Например, при помощи материала «FullCure 720» можно получать прозрачные объекты (рисунок 3.10). Он обладает хорошей ударной вязкостью и позволяет визуализировать внутренние детали объекта, например, при течении в них жидкости. Материал сертифицирован для применения в медицине и идеально подходит для изготовления хирургических шаблонов.

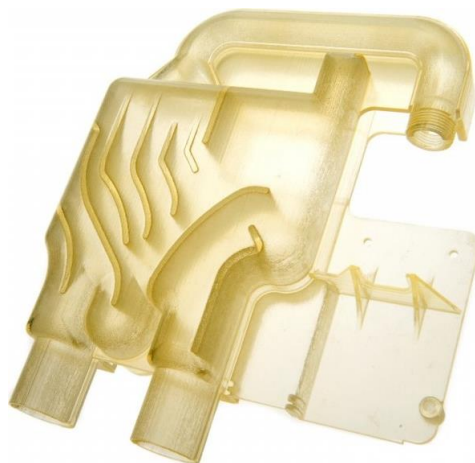


Рисунок 3.10 – Деталь, изготовленная из материала «FullCure 720»

Семейство материалов «Tango» представляет собой резиноподобные гибкие материалы, которые могут быть использованы для создания упругих изделий, таких как различные обкладки, уплотнения, демпферы, амортизаторы и т.п. Пример изделия, изготовленного из материала «Tango» приведен на рисунке 3.11.



Рисунок 3.11 – Деталь, изготовленная из материала «Tango»

Также нужно добавить, что системы, реализующие технологию «PolyJet», могут использовать несколько материалов одновременно, включая возможность смешивания материалов для получения изделий с функционально градиентными свойствами (например, деталей с постепенно возрастающей упругостью, где твердый полимер постепенно переходит в резиноподобный полимер). Процесс также позволяет симулировать многокомпонентное формование для элементов наподобие нескользящих поверхностей и обрешиненных рукояток (рисунок 3.12).



Рисунок 3.12 – Деталь, полученная процессом «PolyJet» с использованием двух материалов

Соответственно область применения процесса «PolyJet» охватывает производство бытовой электроники, обуви, игрушек, промышленных товаров общего назначения и технологической оснастки, а также медицинские приложения.

3.1.4 Процесс на основе быстрой заморозки

Еще одним интересным жидкостным процессом является прототипирование на основе быстрой заморозки (Rapid Freeze Prototyping – RFP), в котором твердотельная деталь генерируется путем постепенной заморозки исходного жидкого материала. Генерация осуществляется по САD-модели послойной заморозкой воды. Данный процесс является экономичным и экологически чистым, поскольку он осно-

ван на использовании обычной воды и недорогого оборудования для построения детали. Схема этого процесса показана на рисунке 3.13 [3].

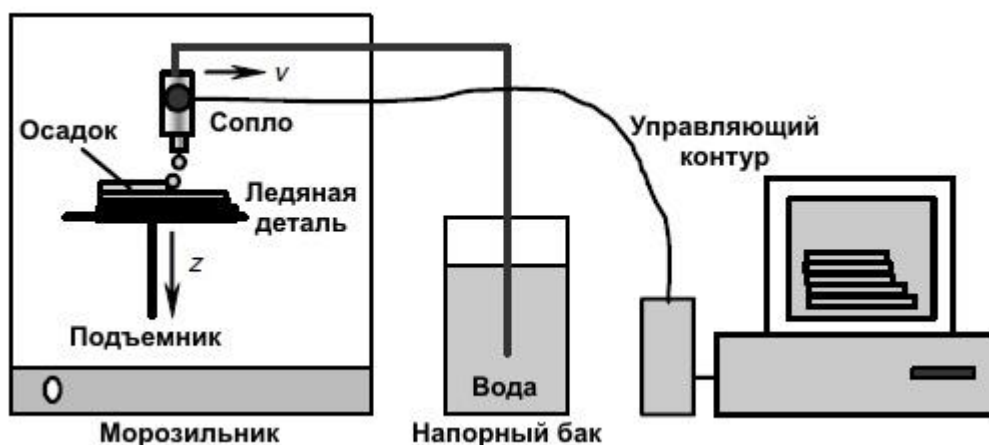


Рисунок 3.13 – Схема процесса быстрой заморозки

Как видно на приведенном рисунке, вода, дозированно выделяемая из сопла на осаждающей головке, наносится на подложку или ранее отвержденную ледяную поверхность. Температура в зоне построения поддерживается ниже точки замерзания воды, что обеспечивает ее охлаждение. В результате осаждаемая вода быстро замерзает и крепко схватывается с предыдущим слоем за счет формирования водородных связей. После нанесения слоя сопло поднимается на высоту равную толщине единичного слоя, производится выдержка в течение заданного времени, необходимого для полного отверждения воды, а затем начинается нанесение следующего слоя. Данная процедура продолжается до тех пор, пока ледяная деталь не будет изготовлена.

Экспериментальная RFP система приведена на рисунке 3.14. На рисунке 3.15 показан пример ледяной детали, полученной при помощи данной системы. Нужно заметить, что в процессе построения трехмерных ледяных деталей требуется материал поддержки, в качестве которого используются эвтектика на основе сахаров ($C_6H_{12}O_6 - H_2O$), имеющая температуру плавления минус 5,6 °С. Построение детали в этом случае осуществляется в морозильнике с температурой ниже, чем точка

плавления материала поддержки. Построенная деталь затем помещается в среду с температурой выше температуры плавления материала поддержки, но ниже нуля градусов. Это приводит к расплавлению материала поддержки и очистки от него ледяной детали.

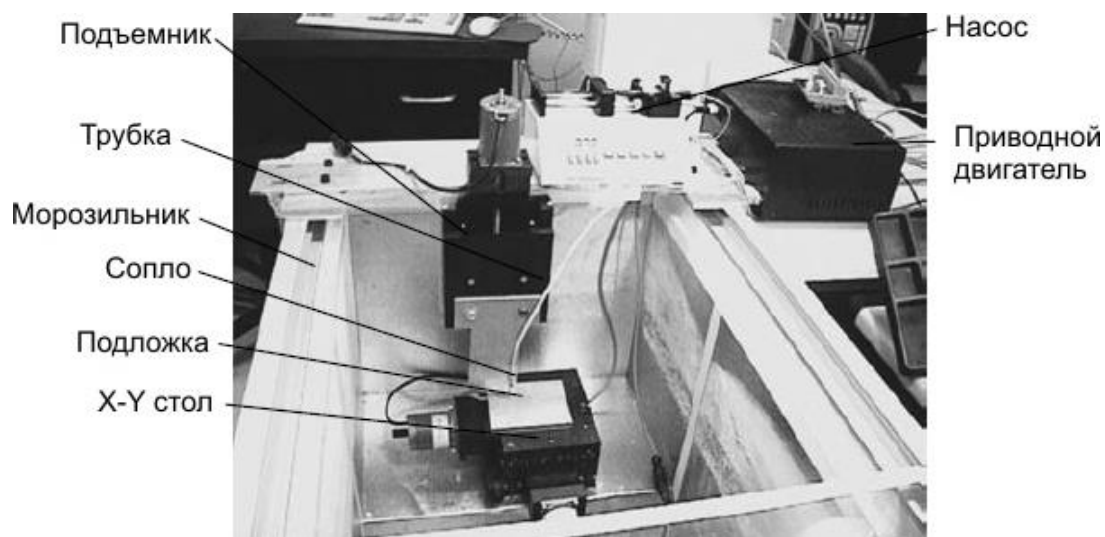


Рисунок 3.14 – Экспериментальная система прототипирования на основе быстрой заморозки

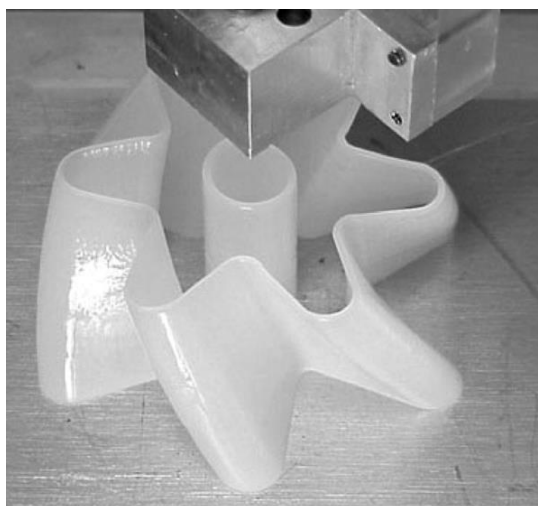


Рисунок 3.15 – Ледяная деталь, полученная методом быстрой заморозки

Практическое применение данной технологии возможно в следующих областях [4]:

- визуализация изделий, т.е. изготовление ледяных образцов изделий для визуальной оценки их дизайна;

- изготовление ледяных скульптур, используемых в развлекательных целях;

- производство силиконовых форм. Эксперименты над светоотверждаемыми силиконовыми эластомерами показали, что ледяные модели можно использовать для изготовления силиконовых форм. Главным преимуществом использования ледяных моделей вместо пластиковых или восковых моделей является то, что ледяные модели более просто удаляются из формы (без непосредственного извлечения) перед заполнением формы. Эта особенность дает возможность избежать потери точности силиконовой формы при извлечении модели и позволяет создавать более сложные формы без разработки технологий извлечения моделей из формы, требующих опыта и затрат времени;

- литье по выплавляемым моделям. Многообещающей областью промышленного применения технологии быстрой заморозки является литье по выплавляемым моделям. Технология получения керамических литейных форм по ледяным моделям имеет ряд преимуществ над традиционными восковыми моделями, к которым относятся меньшая стоимость отливок (снижение стоимости составляет от 35 % до 65 %), повышенные точность и качество поверхности, отсутствие растрескивания полости формы, простота реализации и ускоренный производственный цикл. Кроме того, использование ледяных моделей не связано с образованием дыма и запахов, которое имеет место при традиционном подходе к изготовлению форм.

3.1.5 Процесс на основе тепловой полимеризации жидкости

Данный процесс напоминает процесс стереолитографии, за исключением того, что смола здесь является терморезактивной и для ее отверждения используется инфракрасный лазер [5]. Это отличие означает, что размер генерируемых лазером вокселей может варьировать из-за рассеяния теплоты, что может вызывать деформации

и усадку детали. Однако эти проблемы, очевидно, не сложнее тех, что возникают в процессе стереолитографии и вполне решаемы. Система прототипирования, основанная на этом процессе, пока еще находится в разработке.

Система предполагает использование двух впрыскивающих головок для смолы и воскоподобного материала поддержки. Жидкие материалы подводятся к отдельным соплам на головках, и в ограниченных количествах выпускаются из них при движении головок в плоскости X-Y, для формирования слоя объекта, как показано на рисунке 3.16. Как только материал застынет и затвердеет, он обрабатывается фрезерной головкой для придания слою одинаковой толщины по всей его площади. Стружка удаляется, и процесс повторяется до завершения детали. По завершению детали материал поддержки либо выплавляется, либо растворяется. Процесс обеспечивает чрезвычайно высокую точность и качество поверхности деталей, но является очень медленным и имеет ограничения по используемым материалам.

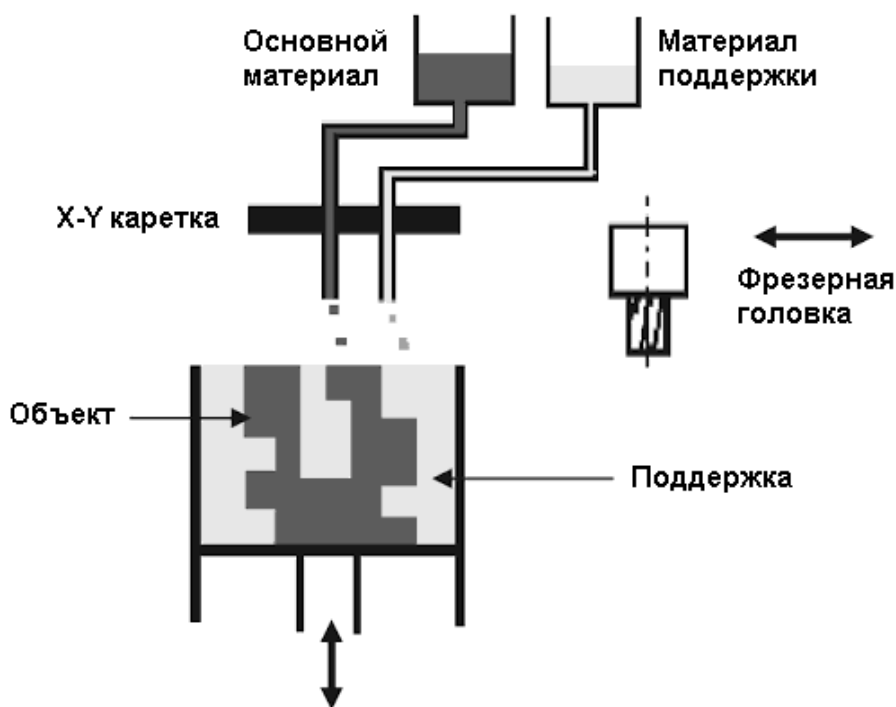


Рисунок 3.16 – Схема аддитивного процесса на основе тепловой полимеризации жидкости

3.1.6 Процесс на основе интерференции лазерных лучей

Данный процесс использует два лазерных излучателя, установленных под заданными углами, которые испускают свет с различной длиной волны для полимеризации смолы в прозрачном баке (рисунок 3.17). Первый лазер вызывает переход жидкой смолы в обратимое метастабильное состояние, а последующее воздействие второго лазера приводит к полимеризации этой смолы [5].

В настоящее время, коммерческой реализации этой технологии не существует, поскольку ее использование связано с рядом нерешенных проблем, к которым можно отнести:

- тени, отбрасываемые ранее отвержденными участками;
- поглощение света по причине падения интенсивности лазера с увеличением глубины;
- сложность обеспечения пересечения лучей из-за их преломления в смоле, вызванного температурными градиентами или твердыми участками.

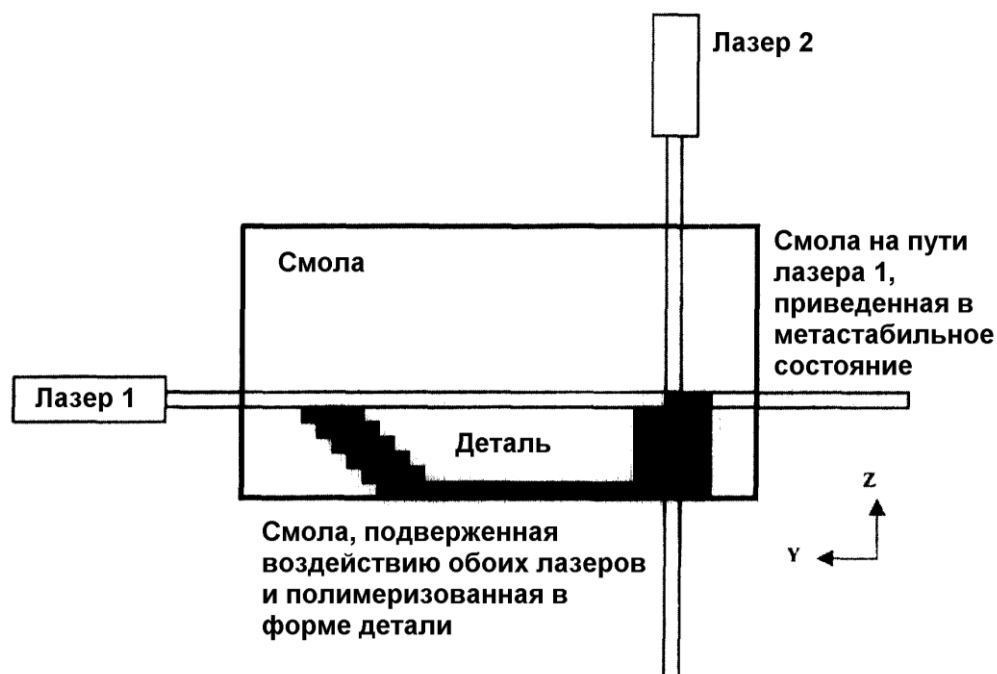


Рисунок 3.17 – Схема аддитивного процесса на основе отверждения жидкости путем интерференции лазерных лучей

3.1.7 Процесс на основе голографической интерференции

В основе этого процесса лежит проецирование голографического образа объекта на жидкую смолу, что приводит к ее отверждению по всей поверхности. Исходные данные обеспечиваются цельной CAD-моделью без ее предварительного деления на слои. Рабочее пространство представляет собой куб с размерами 300×300×300 мм. Коммерческих систем, использующих этот процесс, пока не существует [5].

3.1.8 Процесс на основе использования электрочувствительной жидкости (электроосаждение)

Технология быстрого прототипирования путем электроосаждения использует для формирования трехмерных объектов электрические поля. Типовая система электроосаждения состоит из персонального компьютера (с графической системой), принтера электродов и источника электропитания высокого напряжения [6].

Процесс построения прототипа предполагает выполнение нескольких этапов. На первом этапе компьютер генерирует поперечное сечение объекта. Полученное изображение передается на специальный принтер, который печатает электроды в форме этого изображения и прикрепляет их к подложке из листа электропроводящего материала, такого как алюминиевая фольга. После того, как все подложки будут готовы, они стопкой помещаются в форму, подключенную к источнику питания. Форма погружается в ванну с электрочувствительной жидкостью и на нее подается напряжение. При пропускании через нее электрического тока жидкость между электродами отверждается. Форма извлекается из ванны, и излишняя жидкость сливается с полученного композитного объекта. После обрезки остатков фольги процесс построения детали завершается.

Уникальной особенностью этой технологии является способность предопределять электрическим воздействием физические свойства отвержденного материала объекта. Программируемые свойства материала могут включать плотность, сжимаемость, твердость и адгезионную способность. Данные свойства могут программи-

роваться во время электроосаждения путем управления максимальным пропускаемым током независимо от максимального подводимого напряжения. Обычно для электроосаждения используются такие материалы, как силиконовый каучук, полиэстер, полиуретан и эпоксидная смола.

Недостатком процесса является высокая стоимость оборудования, которая даже в случае использования ручного управления может достигать \$5000. В случае использования средств автоматизации стоимость существенно увеличивается. Программное обеспечение этой системы пока еще находится в разработке.

3.2 Аддитивные процессы на использования расплавов

Существует четыре технологии, которые включают в себя расплавление и последующее отверждение материала детали. Первые три из них, связаны с осаждением материала в дискретных точках, а четвертая обеспечивает образование целого слоя за раз.

3.2.1 Баллистическое осаждение частиц

В данной технологии для формирования трехмерных объектов используется струя расплавленного материала, выталкиваемая из специального сопла. В результате материал разделяется на частицы (капли), которые попадают на подложку и немедленно застывают, формируя геометрию детали. Распыление струи может быть дозированным или непрерывным. При использовании непрерывного распыления, струя выбрасывается через вибрирующее сопло, возбуждаемое пьезоэлектрическим датчиком на частоте около 60 Гц. Для предотвращения расплавления датчика он располагается на некотором удалении от сопла. Хотя капиллярная струя естественным образом распадается на частицы, принудительное возмущение сопла обеспечивает образование потока мелких, одинаковых капель, равномерно распределенных в пространстве. Использование низкочастотной несущей волны модулируемой высокочастотным возмущением позволяет настраивать параметры струи, задавая больший разброс капель, чем в случае использования только одной частоты. Схема реа-

лизации рассматриваемого аддитивного процесса приведена на рисунке 3.18 [5].

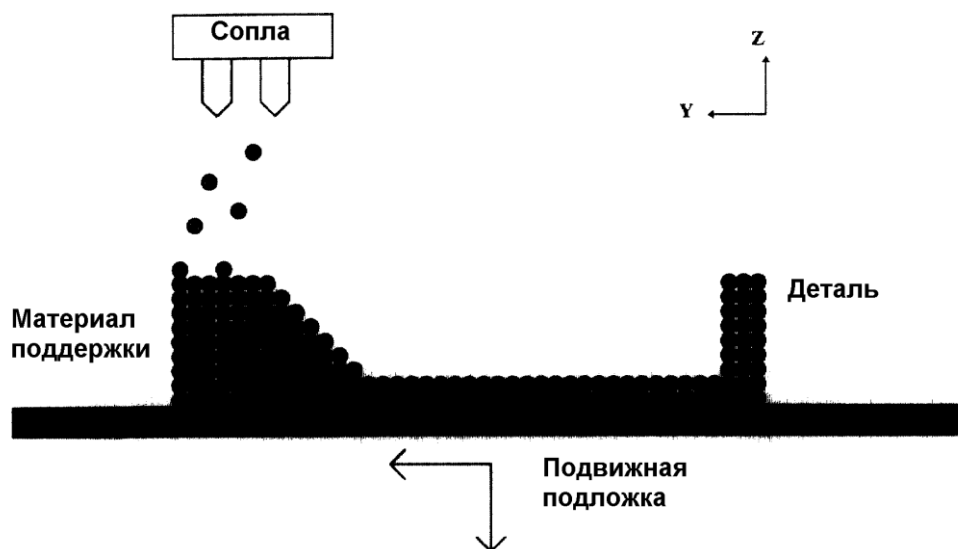


Рисунок 3.18 – Схема построения объектов методом баллистического осаждения

Параметрами, влияющими на конечные характеристики детали, в данном случае будут являться температура и скорость частиц, а также электрический заряд, который они несут. Электрический заряд приобретает, когда струя выталкивается из сопла, и может служить для точного осаждения материала. Поскольку максимальный заряд, который может нести капля, ограничен, максимальное отклонение такой капли тоже ограничено и поэтому подложка или распыляемая струя должны иметь возможность перемещаться для создания достаточно большой зоны построения. Температура будет управлять скоростью, с которой застывает расплавленный материал. Если частицы будут слишком холодными, они будут застывать в полете, и, следовательно, не сварятся с деталью. Если они будут слишком горячими, это будет приводить к нарушению формы детали. Деформация и точность осаждения частиц зависит от их скорости. Если они будут двигаться слишком медленно, то точность осаждения будет плохой, и если они будут двигаться слишком быстро, то будут сильно деформироваться при соударении с твердой поверхностью.

Разрешение прототипов, получаемых таким способом, связано с диаметром частиц, который обычно составляет от 50 до 100 мкм. Частицы могут испускаться в

среде азота или в вакууме, чтобы избежать окисления и дисперсии. Скорость осаждения достигает до 15000 капель в секунду с использованием одиночного сопла и непрерывной струи. В качестве поддержки в этом процессе обычно используются материалы, позволяющие легко удалить себя из готовой детали.

Достоинствами данной технологии является ее невысокая стоимость и экологическая безопасность, а также то, что металлические детали, получаемые с ее помощью, имеют лучшую структуру зерна, чем эквивалентные литые детали. Это обусловлено охлаждением капель при разбрызгивании, означаящим, что они сохраняют аморфную структуру вместо кристаллической, обеспечивая прототипу хорошие механические свойства. Материалами, которые могут использоваться в настоящее время для изготовления деталей таким способом, являются олово, цинк, свинец и другие металлические сплавы с низкой температурой плавления ($< 420\text{ }^{\circ}\text{C}$), а также различные термопласты. Разработаны подобные системы для осаждения меди с температурой плавления $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Недостатком технологии является небольшой диапазон коммерческих материалов, доступных для создания прототипов. Кроме того, существующие системы, реализующие технологию, обеспечивают либо скорость, либо точность, исключая эти атрибуты.

Существует несколько коммерческих систем, использующих два материала для осаждения, которыми могут быть либо термопластик, либо воск. Одна из наиболее точных, ВРМ1 использует дозированное распыление расплавленного материала. Частицы представляют собой сферы диаметром 76 мкм, которые при соударении с твердой поверхностью расплющиваются в диски диаметром 101 мкм и толщиной 63 мкм. После наложения каждого слоя, деталь фрезеруется для получения точных размеров по координате Z. Для того чтобы обеспечить допуски в горизонтальной плоскости, контуры слоя очерчиваются с использованием линейной интерполяции перед заполнением внутреннего пространства детали. Система для обеспечения скорости способна варьировать толщиной слоя в областях, где геометрия остается неизменной от слоя к слою без потери точности в ответственных областях.

Система позиционируется, как имеющая исключительно высокую точность

± 25 мкм и разрешение 101 мкм в плоскости X-Y. Она работает в диапазоне температур 18-24 °С с линейной скоростью построения 310 мм/с. Размеры рабочего пространства составляют 300×150×220 мм. Ее назначение заключается в производстве деталей с последующей доработкой при обеспечении высокой точности и малой толщины слоя.

Похожая система ВРМ2 использует для осаждения материала головку с 5 степенями свободы. Это гарантирует распыление материала по нормали к поверхности и призвано устранять ступеньки в направлении построения. Система использует специальный термополимерный материал для построения моделей с максимальными размерами 250×203×150 мм. Она имеет разрешение 558 мкм и точность ± 17 мкм.

Еще одна практическая реализация этой технологии, известная как «Multi Jet Modelling» (многоструйное моделирование), использует 96 сопел, которые сканируют каждый слой растровым способом. Детали строятся из полимерного материала и имеют габаритные размеры 250×200×200 мм. Толщина слоя составляет 33 мкм, разрешение в плоскости 85 мкм и точность осаждения частиц ± 100 мкм. Технология обеспечивает высокую скорость построения деталей и предназначена, главным образом, для подготовки визуализирующих моделей [5].

3.2.2 Моделирование методом наплавления

Процесс моделирования методом наплавления (Fused Deposition Modeling – FDM) был первоначально разработан компанией «Advanced Ceramics Research» (США), а затем существенно доработан компанией «Stratasys, Inc.» (США). Данный процесс представляет собой процесс выдавливания через фильеры инженерных термопластов, которые нагреваются в форме волокна и выдавливаются в виде пластичной нити для формирования очень тонких слоев при построении детали снизу вверх. Модели могут изготавливаться из акрилонитрил-бутадиен-стирола (ABS пластика), поликарбоната, полифениленсульфона (PPSF) и различных модификаций этих материалов. Детали, получаемые из этих материалов, обладают высокой прочностью и способны проходить функциональные испытания [3].

Оборудование FDM-процесса, показанное на рисунках 3.19 и 3.20, использует для создания физических прототипов CAD-модели в формате STL файла, преобразуемого в SML файл. SML файл создается через обработку STL файла программным обеспечением для генерации траектории движения фильеры при создании каждого слоя. Полученная траектория затем используется оборудованием для определения мест нанесения материала в рабочей зоне.



Рисунок 3.19 – FDM установка «Prodigy» (Stratasys, Inc.)

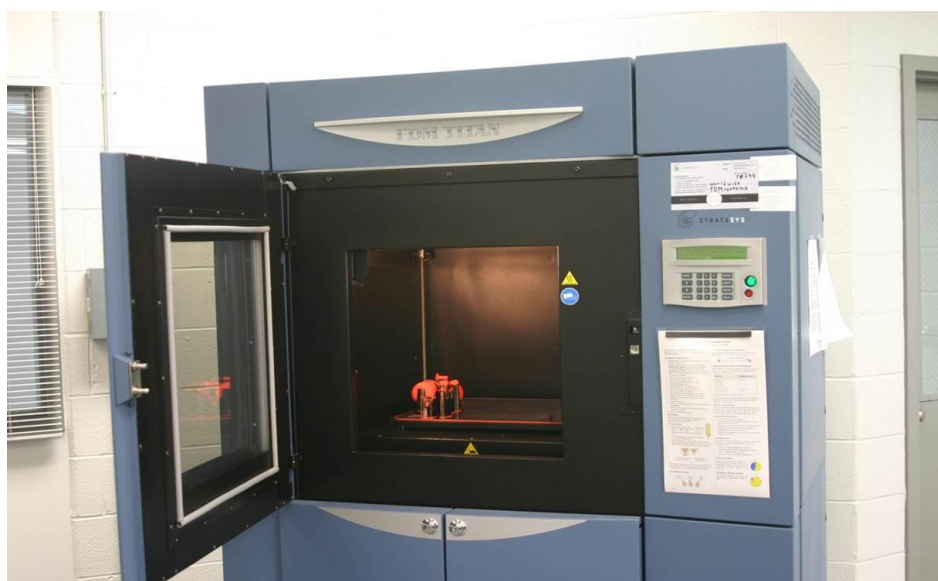


Рисунок 3.20 – FDM установка «Titan» (Stratasys, Inc.)

При реализации процесса волокна расплавленного термопластика выдавливаются из нагретого наконечника (фильеры) и формируют слои, составляющие физическую модель. Рисунок 3.21 изображает схему процесса, в котором материал вытягивается из катушки, нагревается чуть выше температуры расплавления и осаждается в необходимых точках. Его основными этапами являются:

- подача волокна в приводные ролики;
- проталкивание приводными роликами волокна в разжижитель;
- расплавление волокна нагревательным блоком;
- выталкивание расплавленного волокна через наконечник под воздействием твердого волокна, выполняющего функцию плунжера.

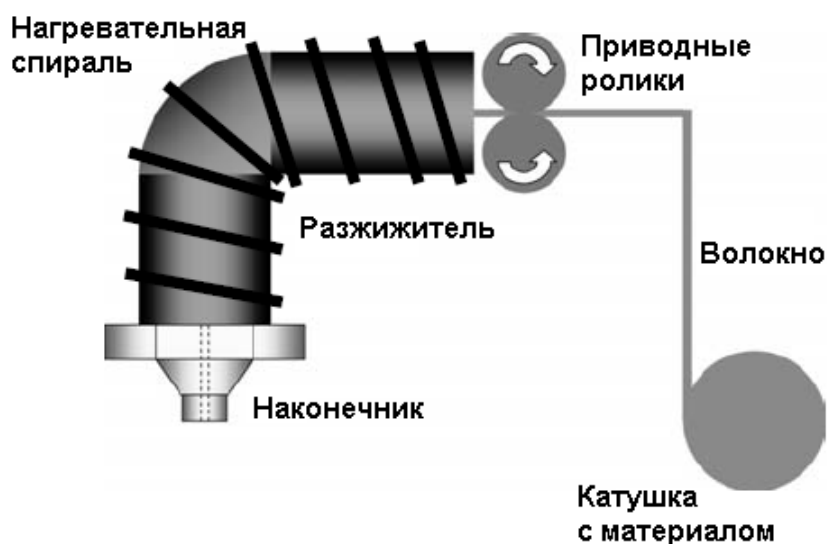


Рисунок 3.21 – Схема привода FDM системы

Экструзионная головка имеет возможность перемещаться в плоскости X-Y и управляется компьютером для нанесения тонких валиков расплавленного материала на строительную платформу, чтобы сформировать первый слой. На платформе поддерживается пониженная температура, чтобы гарантировать быстрое отверждение осажденного термопластика в течение 0,1 с. После этого платформа опускается, и экструзионная головка накладывает второй слой поверх первого. Процесс продолжается до завершения детали. Затем материал остывает и окончательно отверждается.

ся непосредственно внутри машины. Ширина дорожки выдавливания может определяться скоростью приводных роликов, которая контролируется с использованием программного обеспечения.

На рисунках 3.22 и 3.23 показаны две FDM головки. При их использовании в процессе построения материал модели и материал поддержки накладывается для каждого слоя попеременно. Для переключения между материалом модели и материалом поддержки одно сопло поднимается так, чтобы не мешать осаждению другого материала. Подходящая величина этого перемещения по координате Z определяется настройками программного обеспечения. Для улучшения разрешающей способности, головки перемещаются в плоскости X-Y комплектом линейных двигателей, которые крепятся к верхней стенке машины.

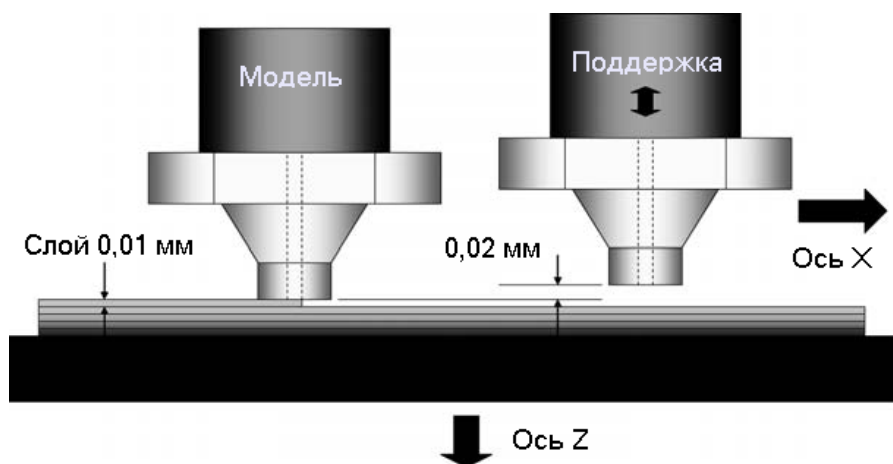


Рисунок 3.22 – Сопла с материалом модели и поддержки

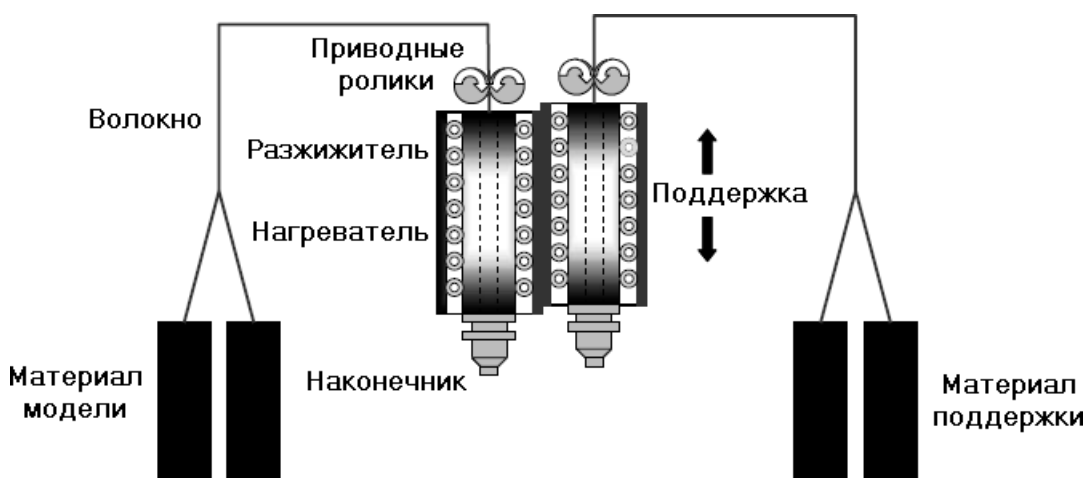


Рисунок 3.23 – Сдвоенные сопла FDM установки «Titan»

На рисунке 3.24 показан типовой экструзионный процесс, где в качестве осаждаемого строительного материала используется пластиковое волокно, подаваемое из катушки. Пластиковое волокно проходит через фильеру, для которой поддерживается температура, достаточно высокая для расплавления пластика (рисунок 3.24а). Эта фильера связана с системой позиционирования, которая перемещает ее в плоскости X-Y, осуществляя нанесение материала слоя. По завершению слоя сопло поднимается на толщину следующего слоя, и процесс продолжается, как показано на рисунке 3.24б.

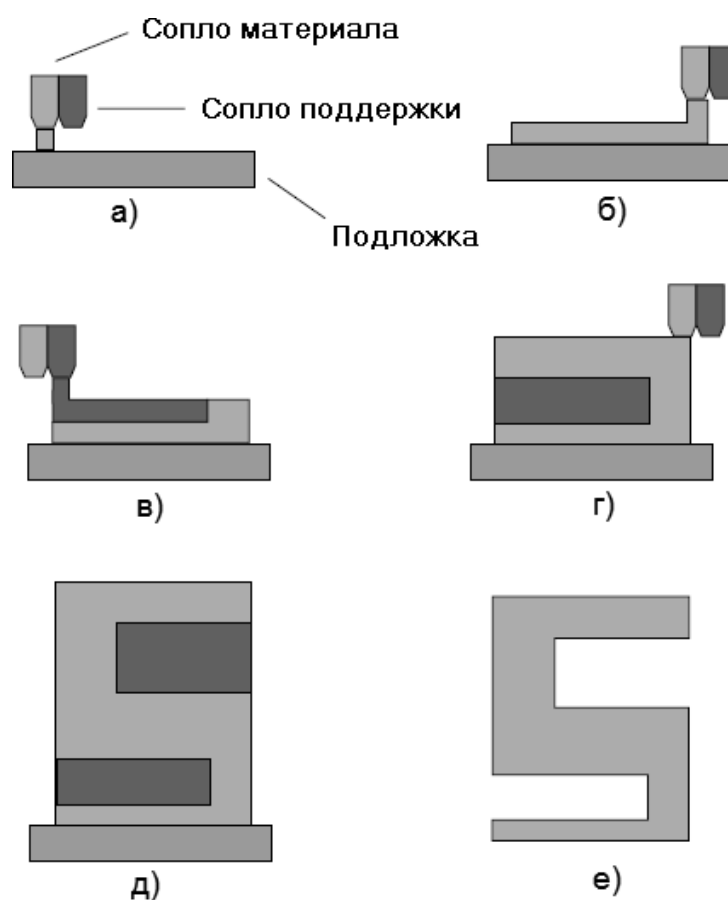


Рисунок 3.24 – Этапы процесса моделирования методом наплавления

Материал поддержки также представляет собой термопластик, расплавляемый и экструдированный через специальную головку на платформу для создания поддерживающей структуры, как показано на рисунке 3.24в. Данный процесс продолжается со сменой основного материала и материала поддержки (рисунок 3.24г) до завершения детали, как показано на рисунке 3.24д. Затем материал поддержки удаля-

ется и производится очистка детали, как показано на рисунке 3.24е.

При построении изделий таким способом имеет значение выбор материала поддержки. С точки зрения возможности удаления поддерживающих структур очень удобно использование водорастворимых материалов. Процесс удаления в данном случае не требует специальных помещений, не создает шума, имеет сравнительно высокую скорость и позволяет изготавливать очень мелкие изделия. В последние годы достигнуты различные улучшения в технологии очистки деталей, одним из которых является ультразвуковая очистка водорастворимых материалов. Однако такая очистка является очень шумной, и поэтому требует проведения в звукоизолированных помещениях.

Процесс моделирования методом наплавления широко распространен во многих отраслях промышленности, таких как автомобильная, аэрокосмическая, медицинская, производство потребительских товаров, архитектура и т.д. К достоинствам этого процесса относится использование функциональных материалов, включающих ABS пластики, модельный воск и эластомеры разнообразных цветов, которые не выделяют токсичных веществ, и поэтому работа с ними может быть производиться в обстановке обычного офиса. Современные модели оборудования могут производить изделия из поликарбоната – высококачественного пластика, более прочного, чем ABS и полифениленсульфон, и обычно применяемого в медицинских приложениях.

Еще одним достоинством процесса является малый расход материала во время и после производства детали. Он безопасен и прост в применении, использует недорогие материалы, не требует много места, обеспечивает хорошую прочность изделий и использует водорастворимые материалы поддержки. Однако нужно заметить, что использование воды требует источника ее нагрева, системы циркуляции, а также гидроксида натрия для быстрого растворения поддерживающих структур.

Вследствие фиксированного диаметра сопла точность FDM процесса ограничена по сравнению с процессами, использующими жидкие материалы, кроме того с его помощью затруднительно получать детали сложной геометрии.

3.2.3 Производство наращиванием формы (Shape Deposition Manufacturing)

Данная технология пока еще является экспериментальным аддитивным процессом, предполагающим осаждение расплавленного металла в заданной форме на субстрат и последующее удаление излишков материала путем механической обработки с ЧПУ. Основные этапы построения деталей методом наращивания формы изображены на рисунке 3.25 [7].

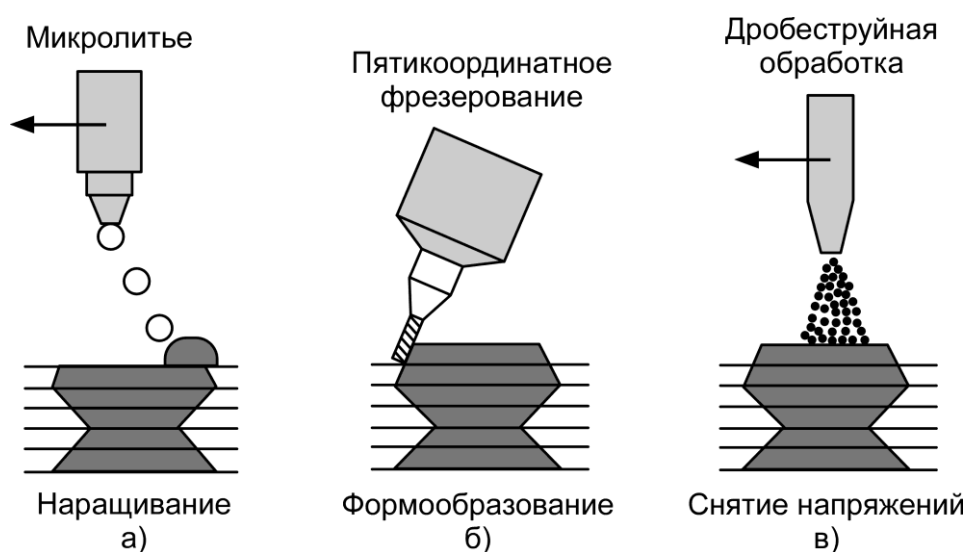


Рисунок 3.25 – Создание слоя с использованием технологии наращивания формы

Для формирования каждого слоя наращиваемая форма проходит через несколько рабочих станций. На начальном этапе материал для каждого слоя осаждается в форме близкой к контуру детали с использованием инновационного процесса осаждения, называемого микролитьем. Затем деталь передается на формообразующую станцию, такую как пятикоординатный фрезерный станок с ЧПУ, где производится механическое удаление материала для придания детали окончательной формы. На следующем этапе деталь поступает на станцию снятия напряжений, такую как установка для дробеструйной обработки, для перераспределения остаточных напряжений. После этого деталь возвращается на станцию осаждения, где производится наращивание следующего слоя и добавление расходного материала поддерж-

ки. Материал поддержки добавляется таким же путем либо до, либо после основного материала в зависимости от геометрии текущего слоя. В случае сложной геометрии слоя может потребоваться добавление материала поддержки и до, и после осаждения основного материала. Перемещение детали между станциями осуществляется при помощи системы роботизированных паллет, способных позиционировать деталь с точностью ± 5 мкм.

В отличие от других процессов свободного формообразования процесс наращивания формы использует послойную декомпозицию САД-модели детали, которая полностью поддерживает трехмерную геометрию наружных поверхностей. Полная толщина слоя и последовательность осаждения материала детали и поддержки зависят от местных признаков этой геометрии. Как показано на рисунке 3.26 слой может содержать три основных признака: неподрезанную геометрию (относительно направления построения), подрезанную геометрию и их комбинацию.

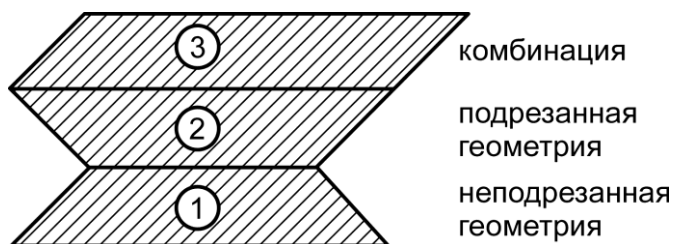


Рисунок 3.26 – Пример поперечных сечений формы

Форма, приведенная на данном рисунке, может быть получена следующим образом. При создании первого слоя, который содержит только неподрезанные элементы, сначала осаждается (рисунок 3.27а) и формообразуется (рисунок 3.27б) основной материал. Слой завершается путем нанесения на него материала поддержки (рисунок 3.27в) и выравнивания его поверхности (рисунок 3.27г).

Второй слой, который содержит только подрезанные элементы, создается путем первоначального осаждения (рисунок 3.28а) и формообразования (рисунок 3.28б) материала поддержки. Благодаря этому образуется литейная полость, куда

затем осаждается основной материал (рисунок 3.28в), и слой завершается выравниванием его верхней поверхности (рисунок 3.28г).

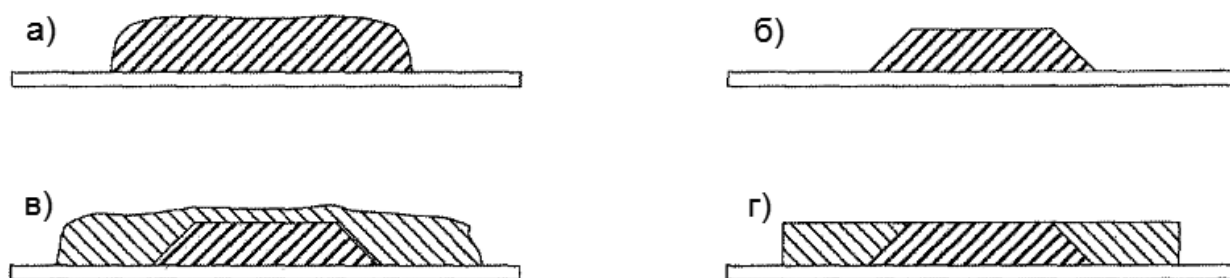


Рисунок 3.27 – Образование неподрезанных элементов

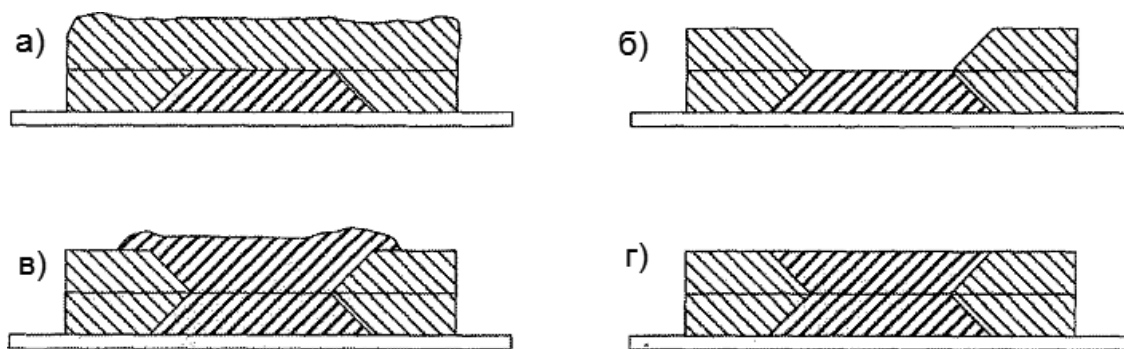


Рисунок 3.28 – Образование подрезанных элементов

Для третьего слоя материал поддержки должен быть подразделен на две части. То есть, сначала осаждается и формообразуется часть материала поддержки без подрезанных элементов (рисунок 3.29а). Далее осаждается основной материал, и формируются неподрезанные поверхности (рисунок 3.29б). И наконец, осаждается оставшаяся часть материала поддержки и производится выравнивание слоя (рисунок 3.29в). В большинстве случаев, для слоев, содержащих комбинацию подрезанных и неподрезанных поверхностей, отдельные материалы разделяются на более мелкие сегменты. Каждый сегмент содержит подрезанные поверхности только в тех областях, которые выровнены относительно предыдущих сегментов слоя.

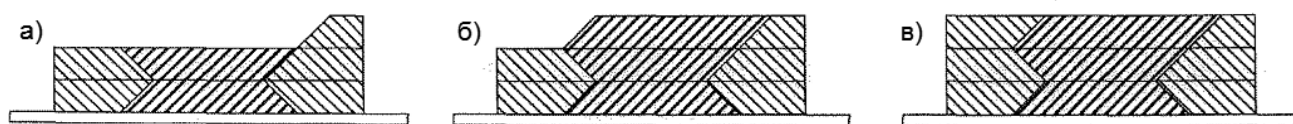


Рисунок 3.29 – Образование комбинированного слоя

На рисунке 3.30 для сравнения показаны поперечные сечения детали, изготовленной по технологии свободного формообразования и техникой наращивания формы. В то время как, в первом случае требуется относительно большое число слоев, во втором случае можно получать более толстые слои и устранять ступенчатую структуру поверхности.

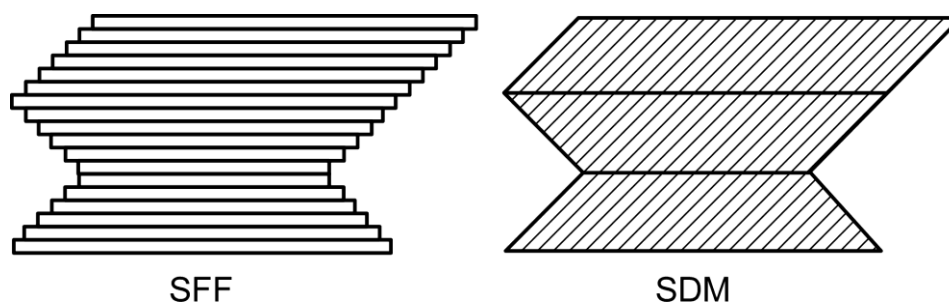


Рисунок 3.30 – Сравнение результатов свободного формообразования и наращивания формы

Традиционные подходы к осаждению расплавленных материалов, включающие термическое напыление и сварку, имеют несколько ограничений. Расплавленные частицы, создаваемые термическим напылением относительно небольшие (порядка 50 мкм) и, следовательно, не содержат достаточной теплоты для своего сплавления с нижележащей поверхностью. Вместо этого, преимущественно формируются механические связи при относительно низкой адгезионной и когезионной прочности. Это приводит к нежелательным свойствам материала, но с сохранением нижележащих слоев материала. Напротив, методы наплавления материала, такие как дуговая сварка в среде инертного газа и плазменная сварка, приводят к местному сплавлению подложки и основного материала с формированием металлических связей. Однако относительно большая

теплопроводность будет приводить к изменению формы нижележащего материала.

Компромисс между термическим напылением и сваркой требует образования металлических связей без разрушения нижележащей геометрии. Таким компромиссом может служить микролитье – процесс, основанный на осаждении капель (частиц) расплавленного металла. В отличие от частиц, образуемых при термическом напылении, микролитейные частицы относительно большие (от 1 до 3 мм в диаметре). Они содержат достаточное количество теплоты, чтобы оставаться значительно перегретыми до их попадания на подложку и быстро там застывать из-за намного более низкой температуры подложки. Оборудование для микролитья может применяться в сочетании с традиционным сварочным оборудованием, сконфигурированным соответствующим образом. Микролитьем создается поток отдельных частиц, выбрасываемых со скоростью от 1 до 5 частиц в секунду. Путем управления перегревом частиц и температурой подложки, могут обеспечиваться необходимые условия, так чтобы падающие частицы неглубоко расплавляли нижележащий материал (на глубину около 10 мкм) с образованием металлических связей между слоями.

Микролитье используется для нанесения не только основного материала, но и материала поддержки. Одной из удобных комбинаций материалов является использование нержавеющей стали в качестве основного материала и меди в качестве материала поддержки. После завершения построения детали медная поддержка растворяется в азотной кислоте. Нержавеющая сталь при своем осаждении внедряется в медь неглубоко из-за высокой теплопроводности меди. С другой стороны медь не может глубоко проникнуть в нержавеющую сталь по причине своей более низкой температуры плавления.

3.2.4 Трехмерная сварка

Экспериментальная система трехмерной сварки (3DW) использует сварочный робот для наплавления материала дуговой сваркой на платформу для образования простых геометрических форм, из которых затем могут строиться более сложные

структуры. Отсюда следует, что в отличие от большинства существующих аддитивных методов прототипы в данном случае строятся без использования разделенных на слои САD-моделей. Трехмерной сваркой могут быть получены детали с разрешением, составляющим несколько миллиметров, для использования в качестве моделей при литье в песчаные формы или непосредственно в качестве оснастки [8].

Использование этой технологии все еще связано с рядом нерешенных проблем. Поскольку здесь отсутствует обратная связь, накопление теплоты в процессе производства может вызывать расплавление прототипа и, так как слои не образуют гладкую поверхность, может потребоваться дополнительная обработка газовой горелкой. Так же не известно могут ли быть построены таким способом сложные детали. Генерация управляющих программ непосредственно на основе САD-модели требует разработки специального метода. Этот метод должен учитывать ориентацию каждой секции формируемой модели, а также порядок, в котором должны соединяться эти секции. Пример детали, полученной методом трехмерной сварки, приведен на рисунке 3.31.



Рисунок 3.31 – Корпус термостата, полученный технологией 3D сварки

3.3 Процессы на основе использования порошковых материалов

В данной группе процессов построение деталей осуществляется объединением между собой крупинок измельченного материала либо с помощью лазера, либо с помощью отдельного связующего материала.

Основным процессом в данной категории является селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering – SLS), в котором для фиксации частиц относительно детали используется лазер. Другим подобным процессом выступает осаждение из газовой фазы, где связанные крупинки материала являются результатом взаимодействия реактивного газа и лазера.

3.3.1 Селективное лазерное спекание

Данная технология использует мелкодисперсный порошок, который нагревается углекислотным лазером мощностью от 25 до 50 Вт, что приводит к тому, что частицы становятся вязкими и текучими и быстро сплавляются друг с другом (рисунок 3.32). Спекаемый порошок может быть термопластиком либо высокотемпературным материалом с термопластичным связующим [3].

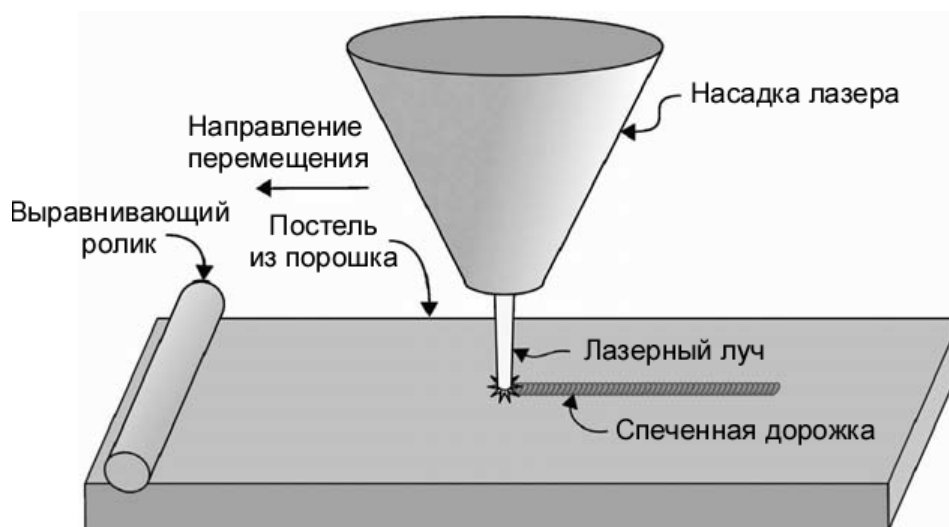


Рисунок 3.32 – Схема процесса лазерного спекания

Первоначально процесс лазерного спекания был разработан в 1989 году американской компанией «DTM Corporation» на основе использования порошкообразных материалов, таких как нейлон, поликарбонат и модельный воск, которые послойно трансформировались в твердотельные объекты с применением модулируемого лазерного луча. Использование процесса предполагалось для генерации моделей и прототипов, шаблонов, литейных форм и инструментальной оснастки в мелкосо-

рийном производстве. В 2001 г. компания была приобретена другой американской компанией «3D Systems Corp.», которая в настоящее время имеет права на использование данной технологии и осуществляет продажи соответствующего оборудования.

Процесс лазерного спекания имеет в своей основе использование трех порошковых постелей и лазера. Две постели содержат исходный порошок, а третья содержит деталь. Постель детали располагается между двумя другими постелями, и лазер действует строго перпендикулярно этой постели. Для уплотнения слоев порошка поверх постели детали используется выравнивающий ролик. Для предварительного подогрева порошка все три постели имеют свой собственный источник нагрева. Процесс построения сам по себе является очень простым и легко воспроизводимым. На рисунке 3.33 показана постель с исходным порошком и постель с деталью. Процесс по своему принципу реализации чем-то похож на процесс стереолитографии. Но в данном случае лазерный луч перемещается по поверхности мелкодисперсного порошка из термопластичного материала (А). Порошок равномерно распределяется роликом (В) по поверхности цилиндра построения (С) и спекается лазером в пределах контура текущего слоя. После этого производящий поршень (D) опускается на толщину единичного слоя объекта для размещения следующего слоя порошка.

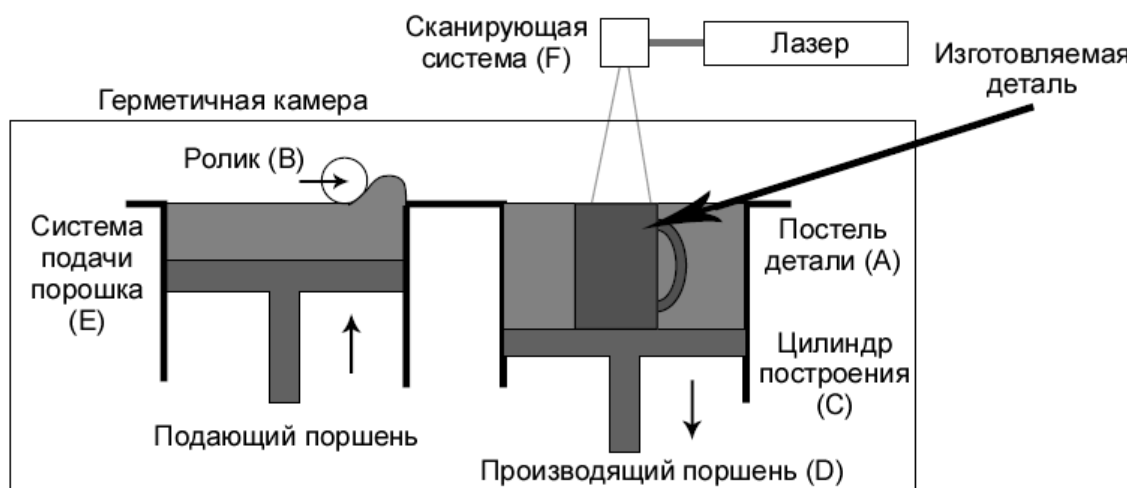


Рисунок 3.33 – Компоненты процесса лазерного спекания

Система подачи порошка (E) выполняет функцию, сходную с функцией цилиндра построения. Она также включает в себя цилиндр и поршень. Но в данном

случае поршень постепенно перемещается вверх для подачи порошка в процесс. В процессе лазерного спекания тепловая энергия лазера расплавляет порошок в точке вхождения луча, который управляется сканирующей системой (F). Применяемый углекислотный лазер обеспечивает узконаправленный инфракрасный тепловой луч. Рабочая камера, где производится построение, полностью изолирована, и в ней поддерживается температура чуть ниже температуры плавления пластикового порошка. Поэтому тепловая энергия лазера нужна только для небольшого поднятия температуры, чтобы вызвать спекание частиц, что значительно ускоряет процесс. Рабочая камера в процессе построения заполняется азотом, чтобы исключить возможность воспламенения порошка.

После того, как объект будет полностью сформирован, поршень перемещается вверх для поднятия объекта. Избыточный порошок просто сметается, и объект вручную доводится до своей окончательной формы. Следует заметить, что процесс охлаждения детали перед ее извлечением может занимать довольно продолжительное время. В случае больших деталей время остывания может занимать до двух дней. На рисунке 3.34 показана SLS система модели «Sinterstation Pro» («3D Systems»).



Рисунок 3.34 – SLS система модели «Sinterstation Pro»

Построение деталей методом селективного лазерного спекания осуществляется на основе трехмерных CAD-моделей и представляет собой повторяемый процесс, включающий два этапа. На первом этапе ролик позиционируется рядом с одной из подающих постелей. Эта постель затем поднимается на заданную величину (обычно менее 0,1 мм) и над ней проходит ролик. В результате приподнятый порошок из подающего контейнера распределяется по верхней поверхности производящего контейнера, как показано на рисунке 3.35а.

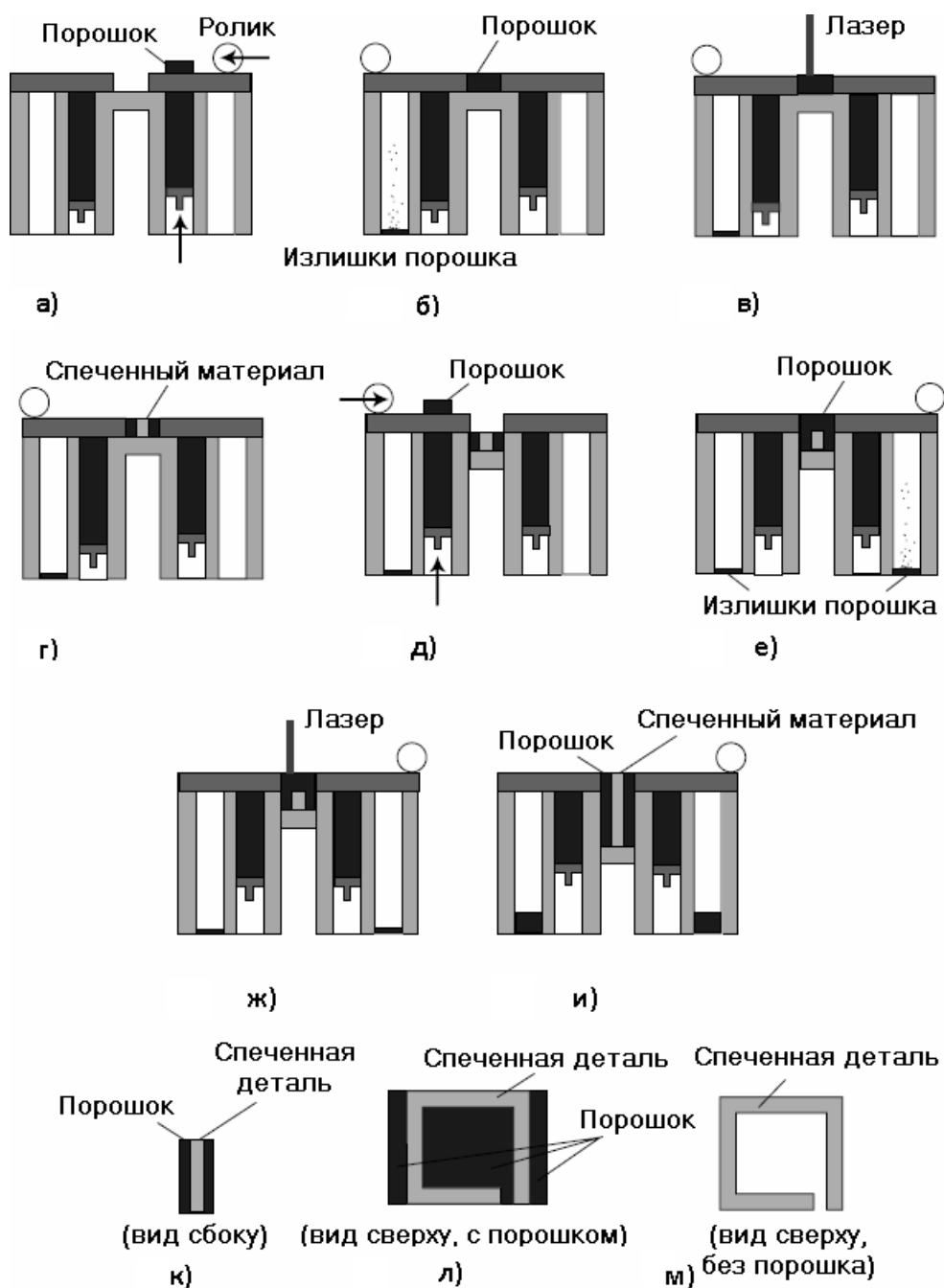


Рисунок 3.35 – Этапы построения детали методом селективного лазерного спекания

Излишки порошка при этом сыпаются в контейнер на другой стороне (рисунок 3.35б). На следующем этапе лазерный луч начинает сканировать на подготовленном слое необходимую форму сечения детали, вызывая сплавление порошка, как показано на рисунках 3.35в и 3.35г. При этом лазерный луч перемещается по поверхности прототипа и сплавляет порошок в слой, одновременно сплавляя его со слоем, лежащим под ним. В контейнере поддерживается температура чуть ниже точки плавления порошка так, чтобы лазер всего лишь немного увеличивал его температуру для начала спекания или сплавления. Как только спекание слоя завершается, постель детали опускается на заданную величину, и процесс продолжается с противоположной стороны с поднятием другой подающей постели (рисунки 3.35д и 3.35е).

Далее ролик накатывает еще один слой порошка поверх постели детали и лазер очерчивает форму следующего слоя детали, как показано на рисунке 3.35ж. Таким образом, твердотельная деталь наращивается снизу вверх слоями сплавляемого лазером порошка. Данный процесс повторяется до завершения детали, как показано на рисунках 3.35и и 3.35к. По завершению прототипа он поднимается из контейнера, избыточный порошок сдувается с него и деталь подвергается финишной обработке. На рисунке 3.35л показан вид сверху завершенной детали, а на рисунке 3.35м та же деталь, очищенная от излишков порошка. Благодаря тому факту, что деталь строится из слоев, таким способом можно производить очень сложные формы, которые часто не могут быть получены традиционными методами обработки.

Ключевым достоинством процесса лазерного спекания является изготовление функциональных деталей, по существу, из конечных материалов. Детали создаются в управляемых условиях и, следовательно, процесс обеспечивает хорошую прочность детали. Однако система механически является более сложной, чем стереолитография и большинство других технологий. Для реализации процесса доступны разнообразные термопластичные материалы, такие как нейлон, стеклонеполненный полиамид, полистирол. Качество поверхности и точность готовых деталей не так хороши, как в случае стереолитографии, но свойства материала могут быть близки к свойствам естественных материалов. На рисунке 3.36 изображена деталь приборной

доски автомобиля, изготовленная системой «Sinterstation Pro». Система «Sinterstation Pro 230» может изготавливать детали объемом около 230 л (550×550×750).



Рисунок 3.36 – Деталь приборной доски автомобиля, изготовленная в системе Sinterstation Pro 230

Данный метод не требует поддерживающих структур, так как нависающие элементы и вырезы поддерживаются порошковой постелью. Это экономит время финишной обработки по сравнению со стереолитографией. Однако качество поверхности здесь хуже, и это может увеличивать время доводки детали. Окончательного отверждения детали, как в случае со стереолитографией, не требуется, но так как объекты формируются спеканием, они получаются пористыми. Поэтому в зависимости от области применения объекта может потребоваться его пропитка другим материалом для улучшения механических свойств.

Поверхность детали, получаемой таким процессом, является шероховатой и выглядит, как базовый материал, частицы которого спаяны друг с другом без их полного расплавления. Если температура неотвержденного порошка становится слишком высокой, это может приводить к образованию на поверхности детали локальных скоплений чрезмерно расплавленного материала. Этим трудно управлять, поскольку процесс включает в себя слишком много переменных. Температурная за-

висимость процесса иногда может проявляться в неравномерности толщины слоев, что отрицательно сказывается на точности по оси Z. Другие проблемы связаны с пористостью производимых деталей, необходимостью фиксации первых слоев для снижения температурных эффектов (коробления) и возможной переменной плотностью деталей.

Необходимо добавить, что технология селективного лазерного спекания обеспечивает возможность изготовления и металлических прототипов с использованием специального материала «LaserForm ST-200», представляющий собой спекаемый металлический порошок. Однако проблемой здесь является недостаточная плотность готовых изделий, составляющая 80-99 %, в то время как по условиям практического применения требуется плотность 100 %. Поэтому в настоящее время вкладывается много усилий в технологию создания металлических непроницаемых объектов максимальной плотности.

При изготовлении металлических деталей используется селективное лазерное сплавление (Selective Laser Melting – SLM), очень похожее на селективное лазерное спекание в части применяемого оборудования. Отличие здесь заключается в использовании намного более высокой энергетической плотности, необходимой для расплавления металлического порошка. Поэтому изготовленные детали имеют плотность очень близкую к теоретической. Процесс реализуется с использованием разнообразных материалов, таких как цинк, бронза, нержавеющая и инструментальная сталь и т.д. Однако для некоторых металлов, таких как титановые и никелевые суперсплавы бывает сложно получить таким способом прочную микроструктуру, и поэтому исследования в этой области все еще продолжаются.

3.3.2 Осаждение из газовой фазы (Gas Phase Deposition)

В этом процессе молекулы химического активного газа для образования твердого вещества разлагаются под воздействием света или тепла. Полученное в результате разложения твердое вещество затем приклеивается к подложке для формирова-

ния детали. В настоящее время разрабатываются три немного отличающихся друг от друга метода построения деталей, основанных на данном процессе [9-11].

Первый из них, называемый селективным лазерным осаждением (Selective Area Laser Deposition – SALD), представляет собой локализованный процесс химического осаждения из газовой фазы. Осаждаемый на субстрат твердый материал здесь получается путем температурного разложения смеси химически активных газов под воздействием теплового источника в виде сфокусированного лазера в реакционной камере, где поддерживается давление и контролируется химический состав. Продуктами химической реакции выступают твердая керамика и остаточный отработанный газ. Принципиальная схема процесса селективного лазерного осаждения приведена на рисунке 3.37.

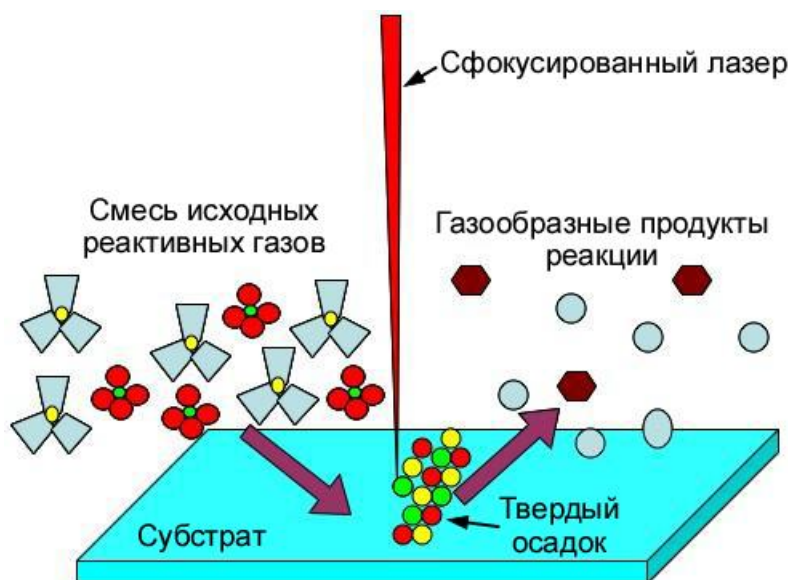


Рисунок 3.37 – Схема процесса селективного лазерного осаждения

Процесс начинается с закачки газов в вакуумную реакционную камеру. Газы закачиваются в пропорциях, которые обеспечивают наращивание керамического осадка во время разложения газов. Для наращивания керамики используется субстрат, помещаемый в вакуумную камеру. Лазерный луч, перемещаемый при помощи оптической системы позиционирования с компьютерным управлением, локально нагревает субстрат для создания пространственно ограниченной области, где усло-

вия способствуют началу химической реакции осаждения. Газы, находящиеся в этой области термически разлагаются, в результате чего на субстрате остается керамический осадок, а газообразные продукты реакции отводятся от поверхности.

По мере сканирования лазером произвольной траектории на поверхности субстрата осаждается дорожка керамического материала. Ширина осажденной дорожки приблизительно равняется размеру лазерного пятна. Путем сканирования поверхности в пределах заданного контура можно получить слой твердого материала необходимой формы. Путем постепенного наращивания слоев можно получить керамическую деталь сложной геометрической формы.

Таким способом можно изготавливать детали из карбида кремния (SiC), нитрида кремния (Si_3N_4) и оксида алюминия (Al_2O_3). Для образования карбида кремния может быть использован единственный газ, а именно тетраметилсилан ($\text{Si}(\text{CH}_3)_4$), который содержит как кремний, так и углерод, необходимые для получения конечного продукта. На практике для минимизации образования углерода в газ добавляется водород и гелий. Чтобы получить другие названные соединения необходимо использовать многокомпонентные смеси газов. Например, для получения нитрида кремния можно использовать смесь тетраметилсилана и аммиака NH_3 .

Второй метод, известный как селективное лазерное осаждение с газовой инфильтрацией (Selective Area Laser Deposition and Vapor Infiltration – SALDVI) является вариацией метода SALD. Отличие заключается в том, что в методе SALD каждый вновь осаждаемый слой становится субстратом для последующего слоя, в то время как, в методе SALDVI в качестве субстрата используется постель из порошка. Осаждение здесь осуществляется внутри постели из порошка, при этом каждая частица порошка становится трехмерным субстратом для наращивания керамического осадка. Для начала наращивания постель из порошка насыщается смесью исходных газов, после чего производится локальное воздействие на нее лазерным излучением. В результате частицы порошка нагреваются до температуры разложения газов, и на каждой из них в зоне воздействия лазера происходит образование керамического осадка. Постепенное наращивание осадка вокруг сопряженных частиц приводит к

заполнению пространства между частицами и формированию твердого тела. Принципиальная схема процесса приведена на рисунке 3.38.

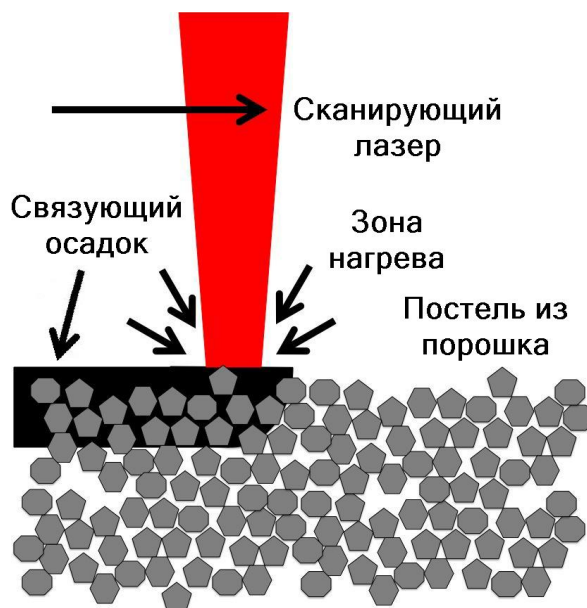


Рисунок 3.38 – Схема процесс селективного лазерного осаждения с газовой инфильтрацией

Химический состав порошка, используемого в данном процессе, может быть тем же, что и состав осаждаемого керамического материала или быть отличным от него. Если осажденный материал и порошковый субстрат будут иметь одинаковый химический состав, то окончательная структура объекта будет химически однородной. Если состав порошка будет отличным от состава осаждаемого материала, то в результате процесса осаждения будет получена композитная структура. При этом порошок выполняет функцию армирующей фазы, в то время как, наращиваемый керамический осадок служит в качестве матрицы. На основе этой технологии можно получать металлокерамические композитные изделия.

В третьем процессе, известном как селективное лазерное реактивное спекание (Selective Laser Reactive Sintering – SLRS) для образования твердого тела из карбидов, нитридов или оксидов используется инициация лазером реакции между газом и слоем порошка. Так же, как и в двух предыдущих случаях, процесс осуществляется в вакуумной камере с контролируемой средой. Исходные реактивные газы подаются

в камеру через независимые входы и проникают в слой порошка на подвижном столе внутри камеры. Для подачи и формирования слоя порошка используется система, похожая на систему, которая используется в процессе селективного лазерного спекания (SLS). Источник нагрева и термодатчики, установленные на столе, позволяют поддерживать нужную температуру порошка. Система позиционирования перемещает стол со слоем порошка под стационарный луч углекислотного лазера мощностью 25 Вт. В зоне воздействия лазера на порошок происходит локальное увеличение температуры, в результате чего начинается химическая реакция между материалом порошка и газами, закачанными в камеру. В результате реакции выпадает твердый осадок, который заполняет пространство между частицами и приводит к отверждению слоя.

Исходными реактивными газами, подаваемыми в камеру, могут быть азот, водород, кислород, аргон, аммиак, метан и ацетилен. В качестве порошкового материала используются металлы или керамика. Например, спекание смеси порошков алюминия и корунда в атмосфере кислорода приводит к образованию корундовой заготовки детали, которая затем может быть насыщена другим материалом для создания керамической или металлокерамической композитной детали. Композитные структуры могут быть получены и непосредственно путем частичного преобразования порошка в ходе химической реакции. Примером может служить построение многослойной детали из меди и нитрида титана путем SLRS обработки порошка из медно-титанового сплава в атмосфере азота. Воздействие лазера на частицы сплава заставляет титан мигрировать на поверхность частиц, где он вступает в реакцию с азотом и преобразуется в нитрид титана. В результате получается медная матрица с субмикронным слоем нитрида титана на каждой из исходных частиц порошка.

3.3.3 Объединение порошка связующим материалом

Наиболее распространенной аддитивной технологией в данной категории является трехмерная печать (3DP). Технология трехмерной печати была разработана в 1993 г. в Массачусетском технологическом университете. Она составляет основу

коммерческого процесса прототипирования, продвигаемого компанией «Z Corporation». Технология позволяет создавать трехмерные физические прототипы путем отверждения слоев осажденного порошка с использованием жидкого связующего материала. Она очень похожа на технологию селективного лазерного спекания, но вместо лазера здесь для связывания частиц порошка используется технология струйной печати. За счет этого обеспечивается высокая производительность и низкая стоимость [3].

Процесс трехмерной печати использует стандартную технологию струйной печати для послойного создания деталей путем нанесения жидкого связующего на тонкие слои порошка. Вместо подачи бумаги под печатающие головки, как в обычном 2D принтере, 3D принтер перемещает печатающие головки над постелью из порошка, на которой они отпечатывают поперечное сечение детали. Система требует точного и равномерного распределения порошка по поверхности строительной платформы. Как показано на рисунке 3.39 3D принтеры выполняют эту задачу при помощи подающего поршня и платформы, которая постепенно поднимается на заданную величину для каждого слоя.

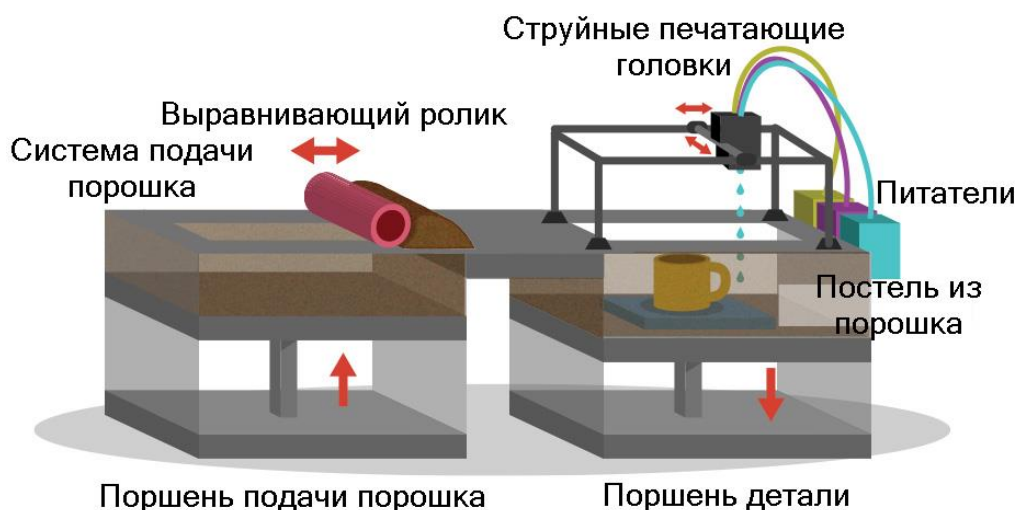


Рисунок 3.39 – Схема процесса трехмерной печати

Подаваемый поршнем порошок распределяется роликовым механизмом по поверхности строительной платформы, который намеренно распределяет на 30% больше порошка, чем нужно для формирования слоя, чтобы гарантировать нераз-

рывный слой уплотненного порошка на строительной платформе. Избыточный порошок сбрасывается через отводящий желоб в контейнер для повторного использования при следующем построении. Сразу после распределения порошка, печатающие головки начинают печать поперечного сечения первого (нижнего) среза детали на ровной поверхности порошка, связывая частицы порошка между собой, как показано на рисунке 3.39.

Затем поршень опускает строительную платформу на 0,1016 мм (0,004 дюйма) и новый слой порошка распределяется по ее верхней поверхности. Печатающие головки наносят следующее сечение детали на новый слой, который связывается с предыдущим слоем. Данный процесс повторяется, пока все слои детали не будут сформированы. Время завершения процесса зависит от высоты формируемой детали или деталей. Обычно 3D принтеры компании «Z Corporation» имеют скорость построения в вертикальном направлении от 25 до 50 мм/ч.

Процесс построения не требует использования поддерживающих структур, поскольку деталь поддерживается несвязанным порошком. По завершению построения несвязанный порошок сдувается с детали и возвращается в питающий контейнер для повторного использования при следующем построении.

Компания «Z Corporation» использует печатающие головки с разрешением 600 dpi, обеспечивающие дозированную подачу связующего материала. Технология позволяет печатать несколько деталей одновременно со временем построения, незначительно превышающим время построения единичной детали.

Уникальной особенностью технологии трехмерной печати является возможность воспроизведения полноцветной палитры. При печати двумерных рисунков из цифровых файлов компьютер конвертирует RGB значения (красный, зеленый, синий) в цвета CMYK (голубой, пурпурный, желтый и черный). Обычно настольные 2D принтеры имеют печатающие головки с тремя цветовыми каналами CMY и еще одним черным каналом K. Благодаря использованию этих четырех цветов принтер накладывает несколько точек на каждый печатаемый пиксель и воспроизводит тысячи цветов, смешанных произвольным образом. Такой же принцип применяется в 3D печати. 3D принтеры компании «Z Corporation» используют четыре цветных свя-

зующих материала (голубой, пурпурный, желтый и черный) для цветной печати детали. Программное обеспечение анализирует информацию о цвете каждого слоя модели и передает ее принтеру, который в соответствии с ней производит цветную печать (рисунок 3.40).

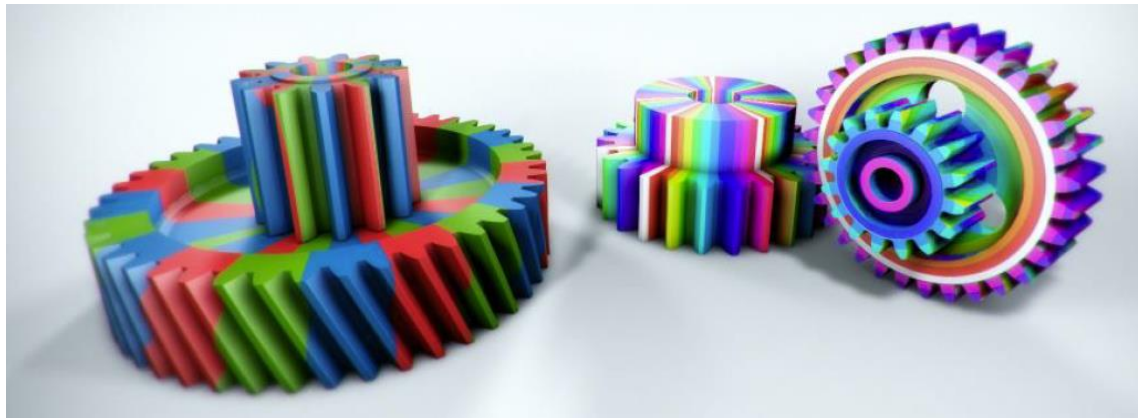


Рисунок 3.40 – Примеры цветной 3D печати

В то время как цвет может быть важнейшим источником информации, многие программы для 3D моделирования не обеспечивают простых путей для создания трехмерных моделей, которые включают цветовые данные. Для решения этой проблемы была разработана программа «ZEdit». Данная программа, работающая на платформе «Microsoft Windows», упрощает добавление цветовых данных в файлы трехмерных моделей. «ZEdit» является инструментом для расцвечивания детали, разметки, маркировки и наложения текстур. Пользователи могут использовать ее для наложения растровых изображений на грани трехмерной геометрии деталей.

Технология трехмерной печати является практически безотходной. Несвязанный порошок, который окружает и поддерживает деталь во время печати, может быть использован повторно. Поэтому все затраты на создание детали определяются ее печатаемым объемом. Использование готовой печатающей головки позволяет быстро и дешево заменять основные расходные компоненты оборудования. Использование модульного принципа построения обеспечивает 3D принтерам эффективность, минимизируя время простоя и, следовательно, сокращая затраты.

Материалами, применяемыми для 3D печати, являются металлические или керамические порошки, а также металлокерамические порошки со связующим в виде коллоидного диоксида кремния или полимера.

Похожий процесс, известный как прямое изготовление оболочковых форм (Direct Shell Production Casting), является процессом литейного производства деталей произвольной формы, в котором литейные формы генерируются непосредственно на основе данных трехмерной CAD-модели. При использовании этой технологии отпадает необходимость в литейных моделях, стержневых ящиках либо в другой литейной оснастке. Единственной необходимой моделью здесь является собственно CAD-модель [3].

Прямое изготовление оболочковых форм немного отличается от таких систем, как SGC или SLA тем, что по размерам CAD-модели здесь воспроизводится полость литейной формы из керамического материала. Для определения геометрии требуемой полости используется файл CAD-модели, который модифицируется системой для адаптации к литейной технологии путем формирования сопряжений и удаления элементов, получаемых механической обработкой, таких как отверстия. Далее в компьютер, управляющий системой, вводится требуемое число отливок и начинается генерация оболочковой формы.

Как показано на рисунке 3.41, данный процесс похож на 3D печать. Тонкий слой порошка из оксида алюминия распределяется на поверхности цилиндрической постели. Печатающая головка дозированно распыляет коллоидной диоксид кремния по слою порошка в требуемой области, ограниченной контуром первого среза детали. Это приводит к отверждению слоя и его схватыванию с предыдущим слоем. Сразу после очерчивания среза оболочковой формы постель с порошком опускается, и процесс повторяется до тех пор, пока не будет получена готовая форма. Как и в случае с процессом трехмерной печати, избыточный порошок во время построения формы выполняет функцию поддержки. По завершению построения оболочковая форма извлекается из бункера, и излишки порошка удаляются из полости формы.

Далее напечатанная оболочка обжигается для создания жесткой керамической формы. Полученная форма пригодна для заливки в нее любого расплавленного ме-

талла, и, следовательно, благодаря такому подходу устраняются несколько этапов, требуемых в традиционной технологии литья по выплавляемым моделям. Кроме того, такие формы являются более точными.



Рисунок 3.41 – Прямое изготовление оболочковых форм

3.3.4 Процесс лазерного формообразования

Процесс лазерного формообразования (Laser Engineered Net Shaping – LENS) был первоначально разработан в Сандийских национальных лабораториях (США). Свое дальнейшее развитие этот процесс получил благодаря усилиям американской компании «Optomec Inc.», которая с 1997 г. взяла его в разработку. Первая коммерческая система, разработанная компанией «Optomec», была поставлена в университет штата Огайо (США) [4].

В процессе лазерного формообразования построение объектов осуществляется аддитивным методом из порошковых металлов с использованием лазера на иттрий-

алюминиевом гранате с неодимом, сплавляющего порошок в твердое тело (рисунок 3.42). Процесс позволяет получать изделия из сплошного металла произвольной формы. Его основные этапы могут быть представлены следующим образом:

- осаждающая головка подает металлический порошок в фокус лазера высокой мощности, где происходит его расплавление. Лазер обычно направляется оптоволоконном или прецизионными зеркалами;

- лазер фокусируется на определенной точке системой линз, а его перемещение по поверхности платформы во время построения обеспечивается позиционирующей системой, перемещающей платформу в плоскости X-Y. Чтобы исключить окисление в зоне расплавления и гарантировать хорошую адгезию частиц порошка, процесс осуществляется в камере низкого давления в атмосфере аргона;

- по завершению слоя осаждающая головка поднимается и начинает осаждать следующий слой. Процесс повторяется слой за слоем до тех пор, пока деталь не будет завершена. Прототипы, полученные таким способом, как правило, нуждаются в дополнительной финишной обработке.

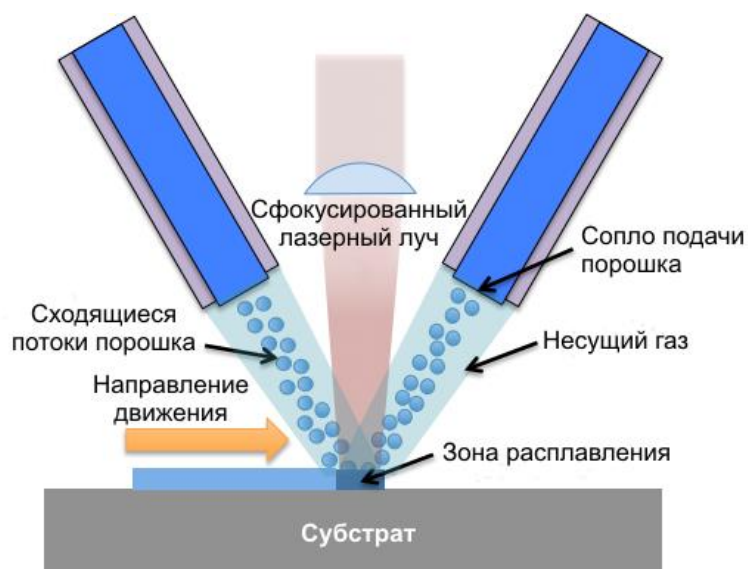


Рисунок 3.42 – Схема процесса лазерного формообразования

К достоинствам процесса следует отнести возможность получения с его помощью изделий сложной геометрической формы из сплошного металла с относительной хорошей микроструктурой. Кроме того, получаемые изделия требуют ми-

нимальной послеоперационной обработки, что сокращает время производственного цикла.

Среди недостатков процесса можно назвать:

- ограничения по используемым материалам. В настоящее время процесс позволяет получать только металлические изделия;
- большой физический объем, занимаемый технологическим оборудованием процесса;
- высокое энергопотребление.

В настоящее время компанией «Optomes» разработаны несколько моделей систем, использующих процесс лазерного формообразования. На рисунке 3.43 показана система модели «LENS 450». Системы позиционируются, как технологическое оборудование для изготовления и ремонта металлических деталей из титана, инструментальных и нержавеющей сталей, меди и алюминия. Они могут применяться для производства пресс-форм и штампов, титановых деталей гоночных автомобилей, биологических имплантатов, используемых в медицине, получения функционально градиентных структур. На рисунке 3.44 показана пресс-форма, полученная лазерным формообразованием.



Рисунок 3.43 – Система модели «LENS 450»

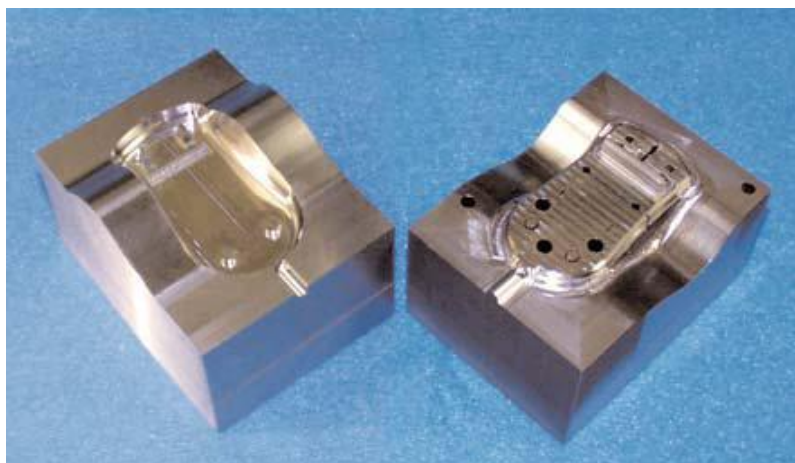


Рисунок 3.44 – Пресс-форма, полученная методом лазерного формообразования

3.3.5 Отверждение многофазной струи

Процесс отверждение многофазной струи (Multiphase Jet Solidification – MJS) был разработан двумя исследовательскими институтами в составе «Общества Фраунгофера» – ведущей германской организации в области прикладных исследований. MJS процесс направлен на получение металлических или керамических деталей. В нем используются сплавы с низкой температурой плавления или смесь порошк-связующее, которые выдавливаются под управлением компьютера через сопло для послойного построения детали [4].

MJS процесс состоит из двух основных этапов: подготовки данных и построения модели.

Подготовка данных. На этом первом этапе производится разработка 3D модели детали в CAD-системе. Разработанная CAD-модель затем импортируется в программное обеспечение MJS системы, где на ее основе в совокупности с такими параметрами процесса, как скорость обработки и расход материала генерируется управляющий файл для контроллера машины. Этот файл далее загружается в контроллер машины для использования в процессе построения.

Построение модели. По существу, процесс построения модели и является MJS процессом. Материал, используемый для построения, обычно представляет собой смесь порошка со связующим, но может также быть и металлическим расплавом. В

начале процесса построения материал нагревается до температуры, превышающей его точку плавления, в нагревательной камере. Затем он выдавливается системой накачки через сопло с компьютерным управлением, и осаждается слой за слоем на платформу. Расплавленный материал при его вступлении в контакт с платформой или предыдущим слоем отверждается, так как и температура и давление понижаются, а теплота отводится в деталь и окружающую среду. Контакт с расплавленным материалом приводит к частичному плавлению предыдущего слоя, и, следовательно, к образованию связи между слоями.

После завершения поперечного сечения фильера, смонтированная на трехкоординатном столе с компьютерным управлением, перемещается в направлении оси Z и начинает строить следующий слой. Построение слоев детали продолжается до тех пор, пока деталь не будет завершена.

Основными аппаратными компонентами MJS процесса являются персональный компьютер, система позиционирования с компьютерным управлением, нагревательная камера с фильерой и система транспортировки. Систем позиционирования обеспечивает точность $\pm 0,01$ мм при перемещениях по осям X, Y и Z, соответственно составляющими 500, 540 и 175 мм (эффективная рабочая зона). Камера, где осуществляется процесс, является термостабильной, и ее температура может варьировать в пределах ± 1 °C. Исходный материал подается в виде порошка, гранул или слитков. Температура экструдированного расплавленного материала может достигать 200 °C. Диаметр экструзионной фильеры изменяется от 0,5 до 2 мм.

Принцип работы MJS процесса показан на рисунке 3.45. Его основная концепция заключается в выдавливании вязких материалов через сопло для послойного формирования трехмерных объектов, что некоторым образом напоминает процесс моделирования методом наплавления. Главными отличиями этих двух процессов являются исходный материал, используемый для построения модели и система его подачи. В MJS процессе материал подается в различных фазах с использованием смеси порошок-связующее или расплавов, в то время как, в FDM процессе он подается в форме волокна. Так как форма материала различна, то и системы подачи и экструдирования также различаются.

В MJS процессе параметрами, которые влияют на его производительность и функциональность являются толщина слоя, тип материала, который может быть металлическим расплавом (обычно металл с низкой температурой плавления) или смесь порошок-связующее (обычно материал с высокой температурой плавления), давление в камере, скорость построения, характеристики экструзионной головки, скорость истечения материала и рабочая температура.

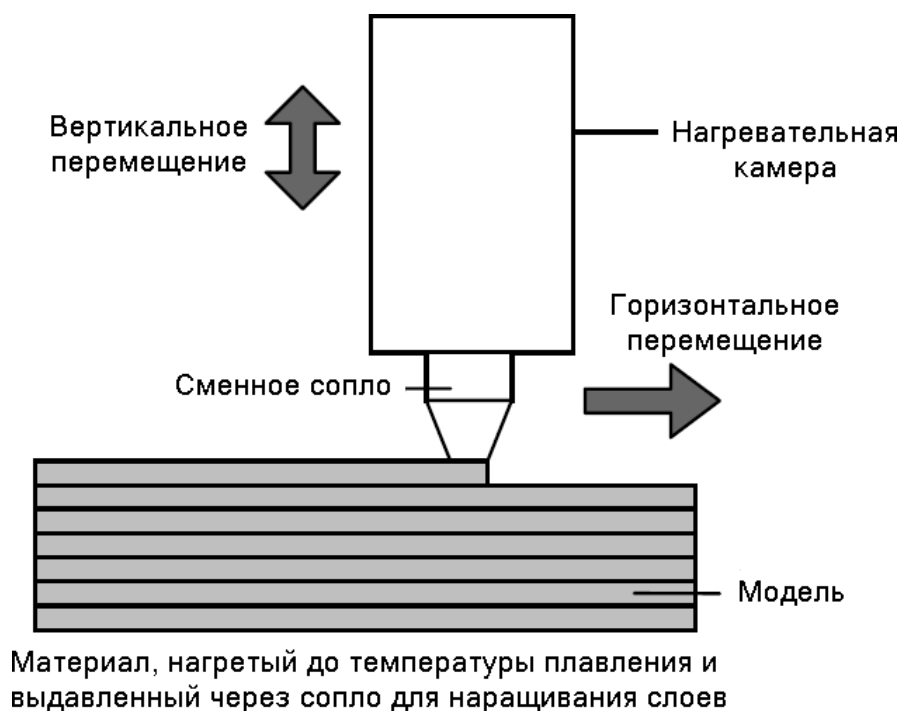


Рисунок 3.45 – Принцип работы MJS процесса

MJS технология может быть использована во многих областях, где требуются функциональные металлические изделия, таких как автомобильная, аэрокосмическая, биомедицинская и станкостроительная промышленность.

Достоинствами MJS процесса выступают его способность использовать разнообразные материалы, в том числе тугоплавкие металлы и керамику, и простота его оборудования. В настоящее время система используется для производства изделий из карбида кремния, нержавеющей стали, титана, оксида алюминия и бронзы.

3.3.6 Электронно-лучевая плавка

Технология электронно-лучевой плавки (Electron Beam Melting – EBM) разработана шведской компанией «Arcam AB», основанной в 1997 г. Технология ориентирована на производство твердотельных металлических изделий из металлических порошков на основе CAD-модели. Процесс электронно-лучевой плавки основан на двух следующих принципах [4]:

- детали формируются путем воздействия электронного луча на металлический порошок в вакуумной камере. Управляемый компьютером электронный луч сплавляет слой в точном соответствии с CAD-моделью за счет кинетической энергии электронов;

- построение детали осуществляется слой за слоем. Каждый новый слой добавляется после сплавления предыдущего слоя. Таким образом, твердотельные детали строятся из тонких металлических срезов сплавленных между собой.

Процесс построения детали методом электронно-лучевой плавки может быть представлен в виде последовательности трех этапов. На первом из них в CAD-системе подготавливается CAD-модель строящейся детали, которая затем разбивается на слои толщиной около 0,1 мм. На следующем этапе из бункера в рабочую зону подается порция порошка и равномерно распределяется тонким слоем по поверхности строительной платформы при помощи специального скребка. Затем управляемый компьютером электронный луч сплавляет первый слой детали на основе данных CAD-модели. После этого платформа опускается и на нее наносится следующий слой порошка поверх предыдущего (сплавленного) слоя. Процедура повторяется так, чтобы осуществлялось формирование объекта по CAD-модели до полного завершения металлической детали. Схема процесса электронно-лучевой плавки приведена на рисунке 3.46.

В настоящее время компания «Arcam AB» выпускает несколько моделей систем электронно-лучевой плавки, предназначенных для получения изделий из стали, титано-алюминиевых, хромо-кобальтовых и хромо-никелевых сплавов. Системы могут использоваться для изготовления литейной и штамповой оснастки, для произ-

водства имплантатов в медицинской технике и выпуска функциональных изделий в единичном и мелкосерийном производстве. На рисунке 3.47 показано внутреннее устройство системы модели «Arcam Q20plus», ориентированной на производство компонентов для аэрокосмической промышленности. На рисунке 3.48 показан образец изделия, полученного методом электронно-лучевой плавки.

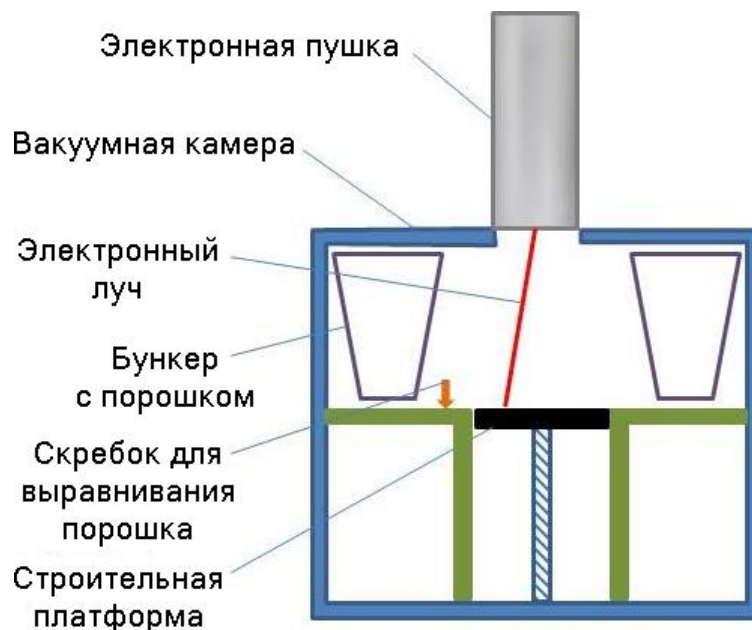


Рисунок 3.46 – Процесс электронно-лучевой плавки

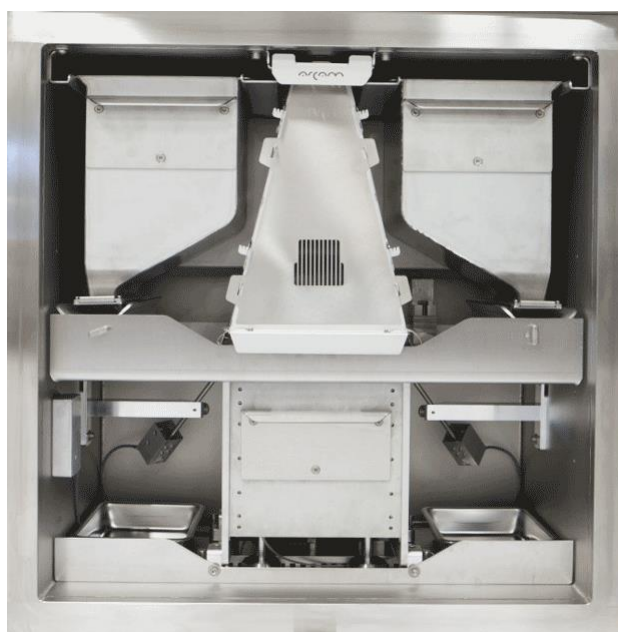


Рисунок 3.47 – Система электронно-лучевой плавки модели «Arcam Q20plus»



Рисунок 3.48 – Металлическая деталь, полученная электронно-лучевой плавкой

3.4 Аддитивные процессы на основе сплошных материалов

Аддитивные процессы, в которых используются сплошные материалы, сильно отличаются от других видов аддитивных процессов, хотя в некоторых из них также используется лазер. Главной общей чертой этих процессов является то, что все они используют сплошные материалы (в той или иной форме) как основное средство для создания прототипов. К числу таких процессов, прежде всего, относится изготовление объектов с использованием ламинирования.

3.4.1 Изготовление объектов с использованием ламинирования

Технология изготовления объектов с использованием ламинирования (Laminated Object Manufacturing – LOM) была разработана в 1985 г. компанией американской «Helisys Inc.» (ныне «Cubic Technologies»). При ее использовании процесс построения начинается с компьютерного разделения трехмерной твердотельной модели детали на двухмерные поперечные сечения. Входные данные представляют собой файл формата STL. Толщина генерируемых компьютером поперечных сечений соответствует толщине листового материала, который используется для построения модели. Листы могут иметь толщину от 0,025 до 0,127 мм и находиться в разматы-

ваемом рулоне в виде скрученной ленты. На рисунке 3.49 показана схема этого процесса. С его помощью можно изготавливать детали, имеющие после механической обработки хорошее качество поверхности, но подверженные воздействию влаги, поскольку строительным материалом является бумага [3].

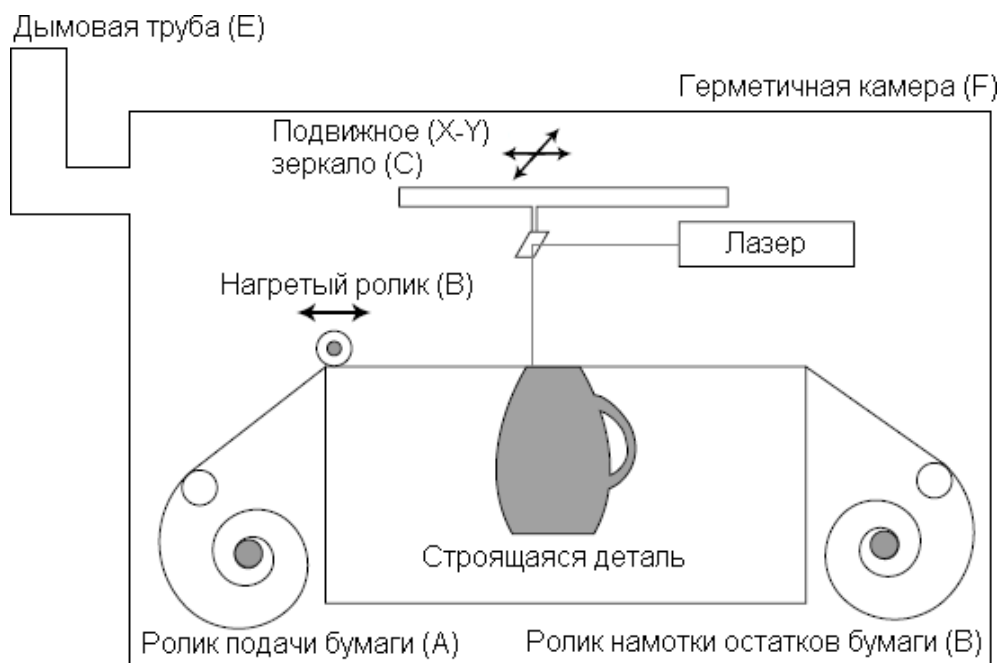


Рисунок 3.49 – Схема процесса изготовления объекта с использованием ламинирования

Профили поперечных сечений объекта, как показано на рисунке, вырезаются при помощи лазера. Бумага разворачивается из рулона на подающем ролике (A) поверх пакета слоев и склеивается с предыдущим слоем с использованием нагретого ролика (B). Ролик расплавляет пластиковое покрытие на нижней стороне бумаги для создания связи между слоями. Профили сечений отслеживаются оптической системой, смонтированной на платформе, которая может перемещаться в горизонтальной плоскости (C). В процессе построения образуется значительное количество дыма. Поэтому строительную камеру необходимо изолировать (F) и использовать либо вытяжную трубу (E), либо угольный фильтр.

После того как вырезание геометрии слоя будет завершено, лишняя бумага отрезается для отделения слоя от рулона. Остатки бумаги наматываются на натяжной ролик (D). Метод сам по себе обеспечивает поддержку для нависающих элементов и вырезов на теле детали. Участки поперечных сечений, подлежащих удалению в готовом объекте, тесно разрезаются лазером крест-накрест, чтобы упростить удаление. Для некоторых вариантов геометрии это может занимать довольно продолжительное время.

В процессе изготовления методом ламинирования материал помещается на строительную платформу, и нагретый ролик проходит по его поверхности, склеивая его в пакет так, как показано на рисунке 3.50а.

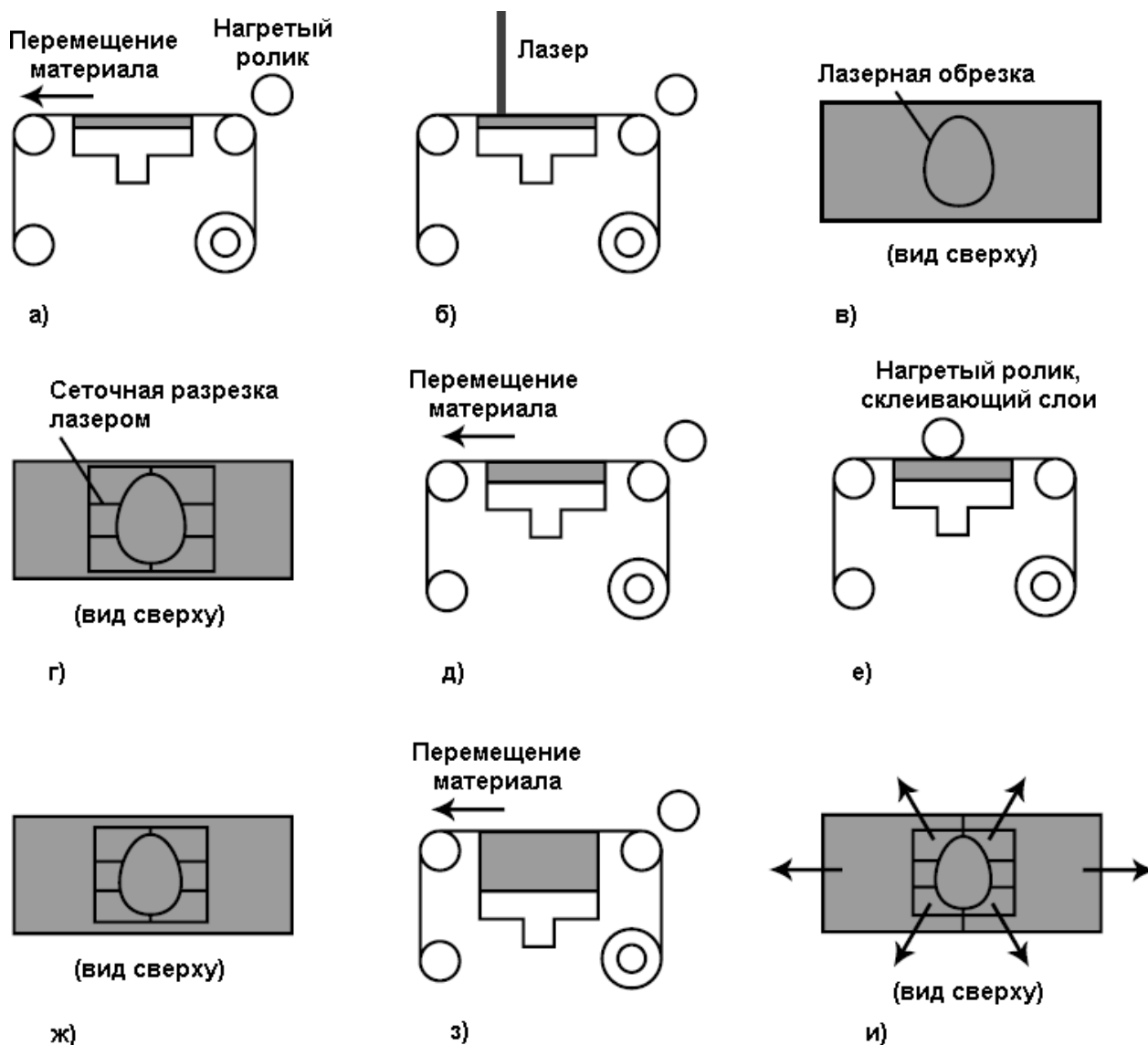


Рисунок 3.50 – Этапы изготовления объекта методом ламинирования

Подвижный стол с зеркалами и оптикой отражает и фокусирует луч углекислотного лазера, который вырезает профиль детали, как показано на рисунках 3.50б и 3.50в. Участки материала, окружающие профиль детали, разрезаются методом перекрестной штриховки для облегчения последующего удаления (рисунок 3.50г). Лишний материал, оставшийся на строительном блоке действует, как поддерживающая структура для следующего слоя. Настройка мощности лазера и скорости резки позволяет прорезать только один слой за раз. После обрезки первого слоя платформа опускается для размещения на ней еще одного слоя листового материала, как показано на рисунке 3.50д. По развернутому материалу проходит нагретый ролик и приклеивает новый слой к верхней поверхности ранее обрезанного слоя (рисунок 3.50е). Лазер вырезает следующее поперечное сечение, как показано на рисунке 3.50ж, и данный процесс продолжается до завершения детали (рисунок 3.50з).

Перед снятием детали с платформы, окружающий ее избыточный материал должен быть удален, как показано на рисунке 3.50и. Поскольку остаточный материал не удаляется до тех пор, пока не будет завершен процесс построения, детали с внутренними полостями не могут быть изготовлены, как единое тело. Однако в процессе используются материалы в листовой форме, и система не подвергает их каким-либо физическим или химическим фазовым преобразованиям, вследствие чего получаемые детали не имеют усадки, коробления и других деформаций.

Некоторые образцы деталей, изготовленных методом ламинирования, представлены на рисунке 3.51. При построении таких деталей не требуется специальных поддерживающих структур, потому что в данном случае поддержкой выступает часть листового материала, не входящая в тело детали. Еще одним достоинством процесса является возможность построения крупных деталей. Так как в процессе осуществляется только вырезание контура поперечного сечения слоя вместо обработки всей его площади, процесс является быстрым. Качество поверхности и точность получаемых деталей не так хороши, как в некоторых других аддитивных процессах, но, тем не менее, эти детали выглядят как изделия из древесины и в то же время их прочность в три раза выше.

Изготовленные детали могут подвергаться механической обработке, грунтовке и окраске. С другой стороны постобработка и качество поверхности являются недостатками процесса. Изготовленные детали требуют нанесения водоотталкивающего покрытия для предохранения их от влаги. Также нужно заметить, что поскольку в процессе используется бумага, то не возникает экологических проблем с утилизацией отходов материала или самих деталей, однако по той же причине детали могут быть пожароопасными. Как и во многих других аддитивных процессах, здесь является трудностью создание замкнутых полостей, так как поддерживающий материал остается заключенным внутри детали. Область применения процесса включает изготовление моделей для литья по выжигаемым моделям, литья в песчаные и гипсовые формы, силиконовых форм, вакуумной формовки и литья под давлением. В частности, процесс очень эффективен, когда требуется производство крупных прототипов, необходимо минимизировать стоимость и время производства или требуется изготовление одноразовых отливок по выжигаемым моделям.



Рисунок 3.51 – Образцы деталей, изготовленных методом ламинирования

На основе этой технологии были разработаны две установки моделей LOM-1015 Plus и LOM-2030H, отличающиеся размерами рабочего пространства. На рисунке 3.52 изображена установка модели LOM-1015 Plus.



Рисунок 3.52 – Установка модели LOM-1015 Plus

3.4.2 Селективно-наращиваемое наслоение

Еще одной аддитивной технологией, основанной на использовании листового материала, является селективно-наращиваемое наслоение (Selective Deposition Lamination – SDL). Данная технология была изобретена в 2003 году братьями МакКормак, позднее основавшими компанию «Mcor Technologies».

Технологию SDL, схема реализации которой приведена на рисунке 3.53, не следует путать с технологией изготовления объектов с использованием ламинирования (LOM). LOM использует лазер, ламинированную бумагу и клей, связывающий бумагу в единое целое, включая поддержку вокруг модели. Поэтому извлечение такой модели может представлять собой трудную задачу и часто приводит к ее повреждениям. SDL использует нож для резки материала и 3D принтер, избирательно наносящий клеящий материал только там, где это необходимо.

Процесс построения начинается с подготовки в CAD-системе 3D модели объекта, подлежащего производству. 3D принтеры «Mcor» поддерживают универсальные форматы файлов для трехмерного проектирования, такие как STL, OBJ и VRML (для цветной 3D печати). Далее подготовленная модель при помощи специального программного обеспечения «SliceIT» разрезается на печатаемые слои эквивалентные

толщине бумаги. Также с его помощью можно задать положение детали или деталей внутри рабочей камеры принтера.

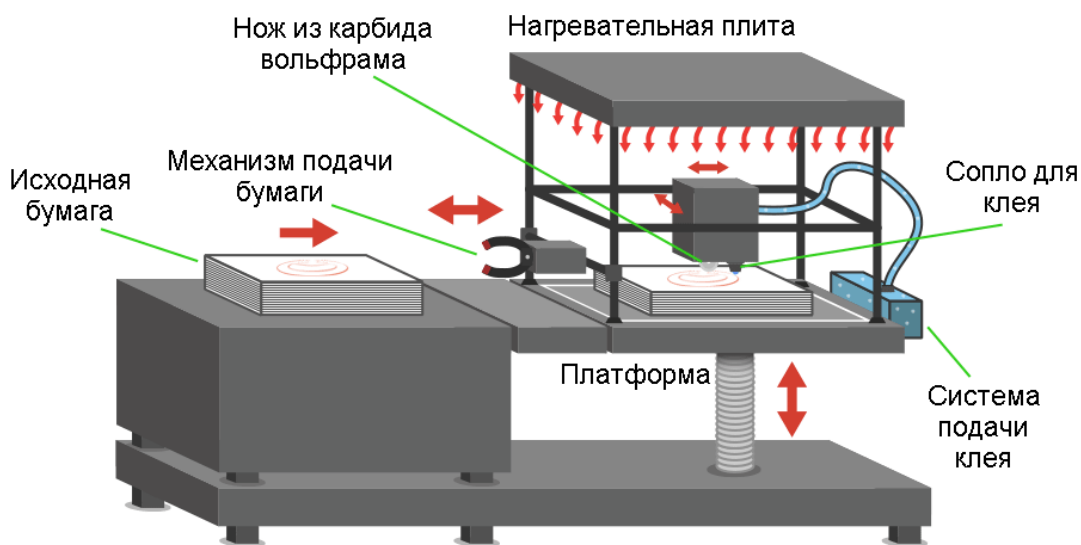


Рисунок 3.53 – Схема реализации процесса селективно-наращиваемого наслоения

Принтеры модели «IRIS» оснащаются дополнительным программным обеспечением «ColourIT», которое в сочетании со «SliceIT» используется для наложения цветов на цифровые данные 3D модели. «ColourIT» позволяет открывать многочисленные форматы файлов, включая STL, WRL, OBJ, 3DS, FBX, DAE и PLY. Как только файл будет загружен в среду «ColourIT», он может быть проверен на однозначность данных, для гарантии того, что модель является замкнутым многообразием. Однако главная функция «ColourIT» заключается в расцветивании модели перед ее разделением на слои в «SliceIT». После наложения цветов модель сохраняется в формате WRL и импортируется в «SliceIT» для подготовки к построению.

Непосредственно построение начинается с ручного прикрепления первого листа к строительной платформе. Размещение первого листа особой важности не имеет, так как первые несколько страниц прикрепляются в качестве базового слоя, перед тем как начнется фактическая обрезка детали. После настройки вылета ножа (глубины резания) и уровня подачи связующего материала дверца рабочей камеры закрывается и начинается процесс построения детали.

Первым этапом построения (рисунок 3.54) является нанесение слоя клеящего материала на верхнюю поверхность вручную размещенного листа бумаги. Клей наносится избирательно, т.е. в тех областях, которые должны войти в тело детали плотность клея будет намного больше, чем в областях вокруг детали, которые будут служить в качестве поддержки.

Следующий лист бумаги подается в принтер при помощи механизма подачи и помещается точно поверх только что нанесенного слоя клея. Строительная платформа поднимается и прижимается к нагревательной плите, за счет чего обеспечивается склеивание двух листов бумаги. Когда строительная платформа возвращается на высоту построения, регулируемый нож из карбида вольфрама разом обрезает лист бумаги, очерчивая контур слоя объекта.

После завершения процедуры обрезки машина начинает наносить следующий слой клея, и процесс полностью повторяется, пока все листы бумаги не будут склеены в пакет и обрезаны для получения обводов детали. Как только будет завершен последний слой, деталь может быть удалена из строительной камеры.

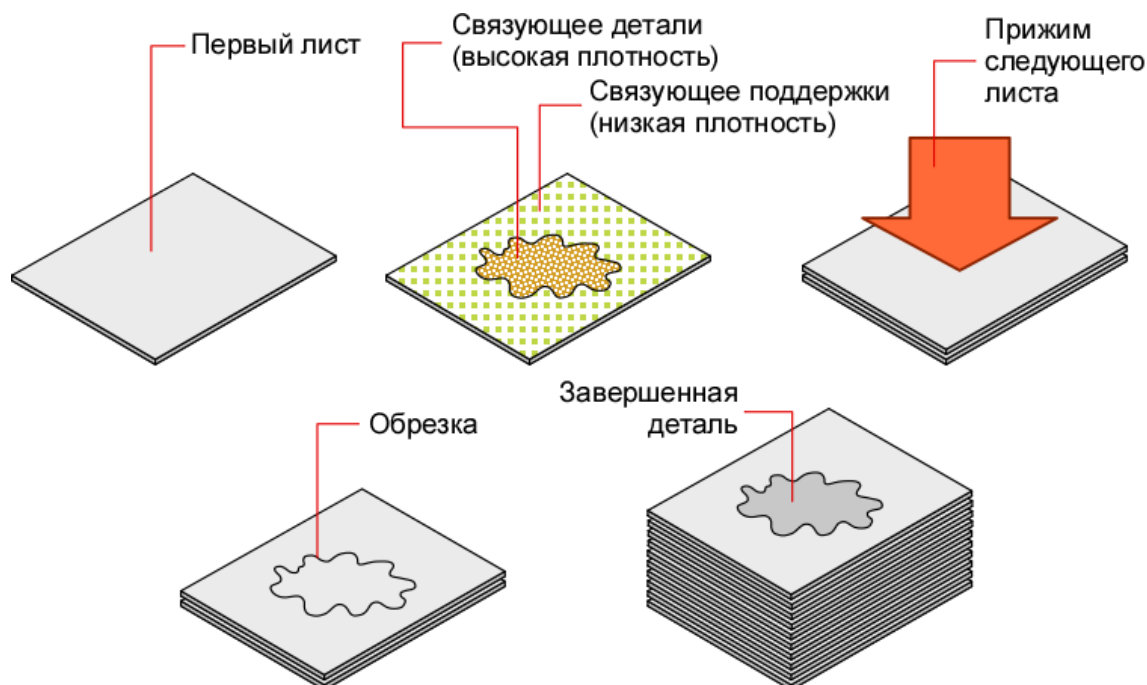


Рисунок 3.54 – Этапы построения объекта методом селективно-наращиваемого наслоения

Главное достоинство SDL процесса проявляется при удалении остатков материала. Этот процесс называется очисткой. Поскольку клеящий материал накладывается избирательно, связь между слоями будет более прочной для слоев, составляющих модель и менее прочной для слоев, обеспечивающих поддержку. Нужно заметить, что облегчения очистки материал поддержки нарезается так, чтобы он мог удаляться маленькими порциями для обеспечения сохранности модели.

В отличие от других технологий 3D принтеры «Mcoг» не требуют погружения деталей в токсичные химикаты или использования режущих инструментов для удаления поддерживающих структур, отсасывания порошка или инфильтрации. Модели, получаемые на принтерах «Mcoг» не подвержены крошению и являются прочными и жесткими. По существу они формируются из восстановленного дерева в форме тесно спрессованных листов бумаги. Несмотря на использование в качестве строительного материала бумаги, модели имеют высокую точность: точность обрезки составляет 0,012 мм и размерная точность – 0,1 мм.

Поскольку в качестве строительного материала используются обычные листы бумаги формата А4, связываемые клеем на водной основе, технология является дешевой и экологически чистой. Получаемые с ее помощью изделия находят применение в производстве (например, для изготовления моделей для литейных форм), в архитектуре, картографии, медицине, археологии и еще в ряде областей. Образец изделия, полученного методом селективно-наращиваемого наслоения, приведен на рисунке 3.55.



Рисунок 3.55 – Изделие, полученное методом селективно-наращиваемого наслоения

3.4.3 Процесс ультразвукового объединения

Процесс ультразвукового объединения (Ultrasonic Consolidation – UC) является гибридным методом получения твердых объектов, изобретенным и запатентованным компанией «Solidica Inc.» (США), для быстрого прототипирования и прямого производства металлических изделий [3,12].

Основой этого процесса является система ультразвуковой сварки металлов, посредством которой создаются металлические связи между тонкими листами металла (обычно толщиной 150 мкм). Ультразвуковая сварка комбинируется с программной фрезерной обработкой для формирования геометрических деталей. Установка «Solidica Formation» (рисунок 3.56), поставляемая на рынок компанией «Solidica» с 2000 г. представляет собой интегрированную станочную систему, которая объединяет ультразвуковую сварочную головку, механизм подачи фольги, трехкоординатный фрезерный станок и программное обеспечение для автоматической генерации траекторий движения инструмента при наращивании материала и обработке.



Рисунок 3.56 – Установка «Solidica Formation»

Производство детали осуществляется на базовой плите (обычно из того же материала, что и наращиваемая фольга), жестко закрепленной на верхней поверхности

нагревательной плиты. Нагревательная плита поддерживает температуру субстрата, допускающую выполнение процесса наращивания в диапазоне от температуры окружающей среды до 175 °С.

Рисунок 3.57 иллюстрирует основной принцип процесса ультразвукового объединения.

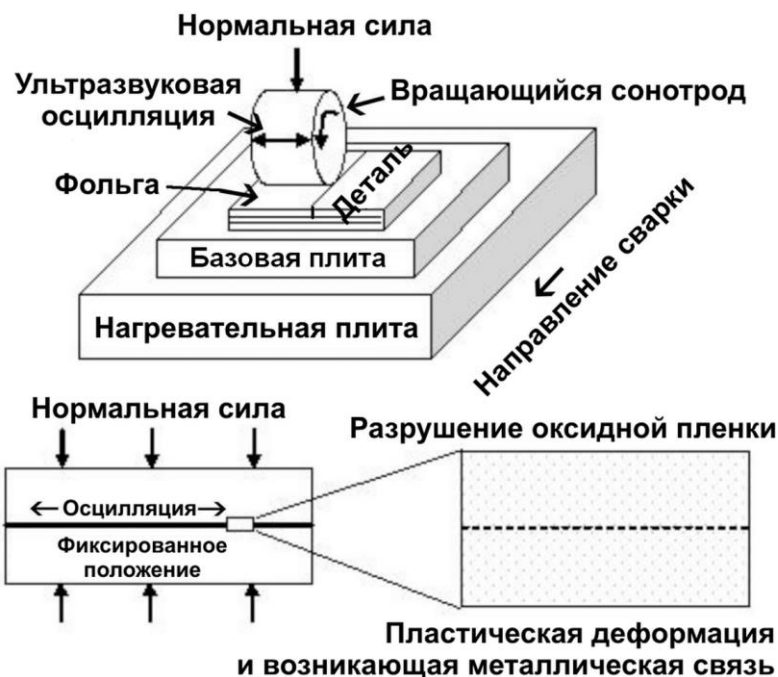


Рисунок 3.57 – Схема процесса ультразвукового объединения

В этом процессе вращающийся ультразвуковой соноотрод перемещается по длине листа тонкой металлической фольги, размещенной на субстрате. Между фольгой и соноотродом поддерживается тесный контакт за счет приложения к соноотроду постоянной нормальной силы. Соноотрод при перемещении по поверхности фольги совершает колебания в направлении, перпендикулярном направлению сварки на частоте 20 кГц с амплитудой заданной оператором. Комбинация нормальной, и появляющейся в результате колебаний, тангенциальной силы приводит к возникновению контактных напряжений на сопряженных поверхностях. Эти напряжения вызывают упруго-пластические деформации микронеровностей поверхностей, которые разрушают оксидную пленку, образуя относительно чистые металлические поверхности.

За счет того, что эти поверхности находятся в тесном контакте, между ними устанавливаются металлические связи. Разрушенные контактные пленки смещаются на периферию стыка или вдоль зоны сварки. После наращивания полосы фольги рядом с ней наращивается следующая, и этот процесс размещения фольги продолжается до тех пор, пока не будет сформирован слой. После формирования слоя фрезерная головка с ЧПУ обрабатывает контур слоя (сечение детали). Фрезерная обработка может производиться после наращивания каждого слоя или, для некоторых вариантов геометрии, после наращивания нескольких слоев. По завершению формообразования контура слоя стружка сдувается при помощи сжатого воздуха и начинается наращивание следующего слоя.

Обычно детали, полученные ультразвуковым объединением, имеют связанные области металла и несколько несвязанных областей (физические разрывы, являющиеся дефектами) вдоль границ раздела слоев. Для оценки числа связанных областей на полной длине стыка используется параметр, называемый линейной плотностью сварки (ЛПС), который прямо влияет на механические свойства сваренных деталей. Отсюда следует, что необходимо стремиться к минимизации несвязанных областей и максимизации параметра ЛПС в деталях, получаемых ультразвуковым объединением, для повышения их нагрузочной способности. Это, в свою очередь, требует тщательного анализа микроструктур контактных поверхностей и понимания механизма ультразвукового связывания.

Несмотря на то, что ультразвуковая сварка металлов используется уже достаточно долгое время, механизм образования в ее процессе металлических связей все еще серьезно обсуждается. Проведенные исследования показывают, что ультразвуковая сварка представляется сложным комплексом явлений, включающим удаление оксидной пленки, пластическое деформирование, теплообразование (за счет трения и пластической деформации), рекристаллизацию, диффузию, наклеп и усталостное разрушение, которые можно обобщить как: поверхностные эффекты, объемные эффекты и температурные эффекты. Образование связей предполагается за счет одного или нескольких следующих механизмов: механического сцепления, граничного сплавления, межатомного силового взаимодействия в стыке, граничных химических

реакций.

В настоящее время ультразвуковое объединение применимо пока только для металлических сплавов с низкой температурой плавления, например на основе алюминия, что является главным недостатком процесса.

К его достоинствам следует отнести:

- возможность прямого построения металлических изделий из дешевого сырья в виде фольги;
- возможность получения сложной внутренней геометрии с полостями и каналами;
- возможность получения композитных изделий с функционально градиентными свойствами;
- высокую точность получения геометрических элементов от 0,05 до 0,1 мм;
- высокую скорость производства;
- низкое тепловыделение;
- низкую стоимость по сравнению с использованием высокоэнергетических источников для производства металлических изделий;
- возможность остановки и запуска процесса построения в любое время.

Область практического применения процесса ультразвукового объединения включает в себя литье по выплавляемым моделям, вакуумную формовку, выдувное формование, литье под давлением и прямое изготовление деталей из алюминия. Помимо формирования металлических связей в процессе ультразвуковой сварки происходит пластическое перераспределение материала, за счет которого в изделие могут включаться разнообразные армирующие материалы. Например, волоконные композиты могут быть получены размещением волокон между слоями металлической фольги. Использование высокопрочных карбидокремниевых и борных волокон позволяет получать жесткие панели, изотропия которых обеспечивается за счет армирующих сеток. Сплавы с памятью формы, такие как нитинол, могут встраиваться в алюминиевую матрицу для создания «умных» подвижных деталей. Также таким способом могут встраиваться в изделие термодатчики и тензодатчики. Данный процесс может служить хорошей автоматизированной альтернативой построению изделий с

использованием клея, винтовых соединений и защелок, но обычно применяется для получения изделий малого размера, таких как часы, кассеты, игрушки и медицинские инструменты. Применение ультразвуковой сварки металлов быстро расширяется и она уже доказала свою пригодность для создания ходовой части автомобилей из алюминия.

Фактически эта же самая технология, получившая название ультразвукового аддитивного производства (Ultrasonic Additive Manufacturing – UAM), используется в промышленном оборудовании, выпускаемом компанией «Fabrisonic LLC» (США). В настоящее время компания поставляет на рынок гибридные (аддитивно-субтрактивные) производственные системы «SonicLayer», пример которой приведен на рисунке 3.58.



Рисунок 3.58 – Гибридная система Fabrisonic «SonicLayer 4000»

Ультразвуковое аддитивное производство представляет собой процесс построения твердых металлических объектов посредством ультразвуковой сварки набора металлических лент в трехмерную форму, чередуемой с механической обработкой, используемой для придания окончательной формы строящемуся объекту. На рисунке 3.59 показана используемая в процессе накатная система ультразвуковой сварки, состоящая из двух ультразвуковых преобразователей и акустического волновода (сонотрода).

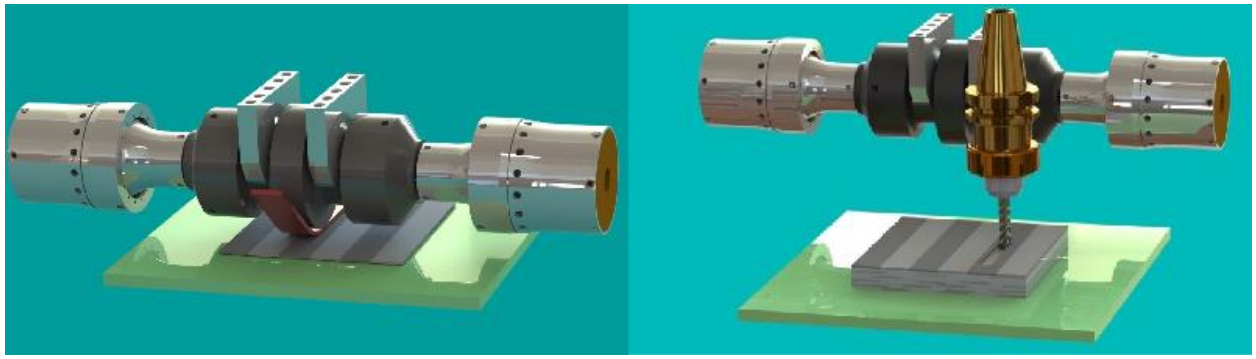


Рисунок 3.59 – Система ультразвуковой сварки компании «Fabrisonic LLC»

С ее помощью высокочастотные (обычно частотой 20 кГц) ультразвуковые вибрации локально возбуждаются между находящимися под давлением листами фольги, что приводит к их свариванию. Вибрации ультразвукового преобразователя передаются волноводу дискообразной формы, который, в свою очередь, создает твердое сварное соединение между тонкой металлической лентой и базовой плитой. Непрерывное перекачивание волновода по поверхности плиты обеспечивает полное приваривание ленты к плите. Точно таким же способом для наращивания высоты привариваются последующие слои. Данный процесс повторяется до тех пор, пока не будет построен необходимый твердотельный компонент. После этого он подвергается контурному фрезерованию для достижения требуемых допусков и качества поверхности. Образцы полученных таким способом композитных деталей (из алюминия и меди) приведены на рисунке 3.60.

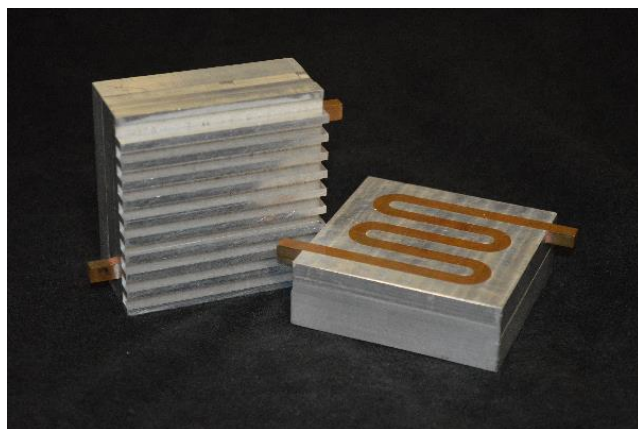


Рисунок 3.60 – Образцы композитных деталей, полученных методом ультразвукового аддитивного производства

3.4.4 Автоматизированное производство ламинированных конструкционных материалов

Автоматизированное производство ламинированных конструкционных материалов (Computer Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials – CAM-LEM) является аддитивным процессом, разработанным одноименной американской компанией на основе LOM-технологии. CAM-LEM процесс базируется на том же самом принципе, что применяется в большинстве систем твердотельного аддитивного производства. Объекты строятся слой за слоем из разнообразных конструкционных материалов [4].

Сечения, которые формируют слои, вырезаются независимо друг от друга из исходного набора листов при помощи углекислотного лазера, а затем избирательно извлекаются и точно соединяются в пакет. В процессе построения одновременно могут использоваться различные типы материалов. Данный процесс позволяет формировать внутренние полости и каналы без необходимости ручного удаления отходов материала, что решает проблему замкнутых объемов, от которой страдает большинство других систем аддитивного производства. Отличительной чертой процесса является отделение процесса геометрического формообразования от процесса добавления материала, что обеспечивает большую гибкость.

Процесс, основные этапы которого представлены на рисунке 3.61, начинается с подготовки CAD-модели с ее последующей декомпозицией в набор тонких слоев, ограниченных заданными моделью контурами. В соответствии с вычисленными контурами из комплекта исходного листового материала, такого как необожженная керамическая лента, при помощи лазера вырезаются сечения объекта. Полученные сечения извлекаются из комплекта листов и состыковываются друг с другом для трехмерной физической реализации оригинальной CAD-модели. Операция сборки включает процедуру присоединения, при помощи которой фиксируется положение каждого листа относительно пакета ранее собранных листов.

После сборки слои спрессовываются вместе путем горячего изостатического прессования (или другими подходящими методами) для достижения тесного контак-

та между слоями, способствующего формированию прочных связей в ходе последующей операции спекания. Слоеный «сырой» объект затем обжигается для его уплотнения в монолитную структуру. В ходе выполнения этого шага история наслоения полностью удаляется, в результате чего конечные компоненты приобретают свойства материала эквивалентные тем, что достигаются стандартными методами производства. В итоге получается трехмерная деталь, которая не только имеет корректную геометрическую форму, но и обладает функциональными прочностными свойствами.



Рисунок 3.61 – Основные этапы процесса SAM-LEM

Технология SAM-LEM обладает следующими основными достоинствами:

- возможность формирования внутренних полостей и каналов. В процессе SAM-LEM операция лазерной обрезки отделяется от операций пакетирования и ламинирования, что позволяет формировать внутренние полости объектов, исключая проблему замкнутых объемов;

- настройка мощности лазера. Мощность режущего лазера, используемого в процессе SAM-LEM, не нуждается в точной настройке, так как здесь используется принцип ламинирования, где контур поперечного сечения слоя вырезается прежде, чем быть наложенным на предыдущий слой. Таким образом, это устраняет проблему возможного повреждения лазером предыдущих слоев объекта;

- высокое качество прототипов. За счет используемого принципа построения данная технология гарантирует, что слои очищаются от мельчайших частиц нежелательного материала перед их связыванием с предыдущими слоями. Это является положительным моментом, так как частицы материала, заключенные между слоями будут ухудшать механические свойства готового изделия и такой ситуации следует избегать для получения прототипов высокого качества;

- настраиваемая толщина слоев. Процесс SAM-LEM позволяет строить прототипы с использованием различных толщин материала, что дает возможность эффективно ускорить процесс. Области с большим объемом строятся из более толстых листов материала, а поверхности, которые требуют высокого качества, строятся из более тонких листов. Толщина слоя может варьировать от 0,03 до 1,3 мм, хотя для большинства возможных материалов она составляет от 0,15 до 0,6 мм.

К недостаткам технологии SAM-LEM можно отнести следующие пункты:

- значительная усадка. Главным недостатком технологии SAM-LEM является то, что прототипы дают усадку около 12-18 % от своего размера, что осложняет размерный контроль готового продукта;

- необходимость точного выравнивания. Процесс требует использования высокоточной системы позиционирования для относительного выравнивания слоев перед их связыванием. Любое незначительное отклонение положения слоя относительно предыдущих слоев будет не только влиять на точность модели, но и на ее форму в целом;

- отсутствие естественных поддерживающих структур. В то время как процесс устраняет проблему замкнутого объема, он требует от пользователя указания положений для размещения поддержки прототипа, особенно в случае нависающих элементов. Поскольку в процессе осуществляется только перенос нужных слоев для их связывания с предыдущими слоями, все излишки материала, которые могли бы использоваться как поддержка, становятся недоступными.

Процесс SAM-LEM главным образом используется для производства инструментальной оснастки. Также с его помощью могут изготавливаться функциональные

прототипы и даже керамические и металлические компоненты. Примеры изделий, полученных технологией CAM-LEM, приведены на рисунке 3.62.



Рисунок 3.62 – Детали, полученные технологией CAM-LEM

Практической реализацией данной технологии выступает система «CL-100», приведенная на рисунке 3.63. Система имеет рабочий объем с размерами 150×150×150 мм и позволяет одновременно использовать пять типов материалов.



Рисунок 3.63 – Система CL-100, реализующая технологию CAM-LEM

3.5 Контрольные вопросы

- 1 В чем заключаются основные особенности процесса стереолитографии?
- 2 Что является достоинствами и недостатками процесса стереолитографии?
- 3 Что собой представляет схема построения изделий методом отверждения на твердой основе?
- 4 Что является основным отличием аддитивного процесса, основанного на использовании маски?
- 5 Каким образом осуществляется построение объектов в процессе «PolyJet»?
- 6 Какие материалы и их сочетания могут использоваться в процессе «PolyJet»?
- 7 Какой принцип положен в основу процесса прототипирования на основе быстрой заморозки (Rapid Freeze Prototyping)?
- 8 В каких практических областях возможно применение изделий, получаемых быстрой заморозкой?
- 9 Что собой представляет аддитивный процесс на основе тепловой полимеризации жидкости?
- 10 Что собой представляет аддитивный процесс на основе интерференции лазерных лучей?
- 11 Каким образом реализуется аддитивный процесс на основе использования электрочувствительной жидкости?
- 12 В чем заключаются особенности построения изделий путем баллистического осаждения частиц?
- 13 Что является достоинствами и недостатками технологии баллистического осаждения частиц?
- 14 На каких принципах основано моделирование методом наплавления?
- 15 В каких практических областях применяются изделия, моделируемые методом наплавления?
- 16 На чем основано производство объектов наращиванием формы (Shape Deposition Manufacturing)?

17 Что собой представляет процесс микролитья, используемый в производстве наращиванием формы?

18 На чем основан процесс трехмерной сварки?

19 В чем заключаются основные особенности процесса селективного лазерного спекания?

20 Что является достоинствами и недостатками процесса селективного лазерного спекания?

21 В чем заключаются особенности процесса селективного лазерного сплавления от селективного лазерного спекания?

22 Что собой представляет аддитивный процесс селективного лазерного осаждения (Selective Area Laser Deposition)?

23 Что собой представляет аддитивный процесс селективного лазерного осаждения с газовой инфильтрацией (Selective Area Laser Deposition and Vapor Infiltration)?

24 Что собой представляет аддитивный процесс селективного лазерного реактивного спекания (Selective Laser Reactive Sintering)?

25 В чем заключаются особенности процесса трехмерной печати (3DP)?

26 Что является уникальной особенностью технологии трехмерной печати?

27 Что собой представляет прямое изготовление оболочковых форм (Direct Shell Production Casting)?

28 Какие этапы включает в себя процесс лазерного формообразования (Laser Engineered Net Shaping)?

29 Какие этапы включает в себя процесс отверждения многофазной струи (Multiphase Jet Solidification)?

30 Какие этапы включает в себя процесс электронно-лучевой плавки (Electron Beam Melting)?

31 Что собой представляет аддитивный процесс изготовления объектов с использованием ламинирования (Laminated Object Manufacturing)?

32 В чем заключаются особенности процесса селективно-наращиваемого наслоения (Selective Deposition Lamination)?

33 На чем основано построение объектов методом ультразвукового объединения (Ultrasonic Consolidation)?

34 Что является достоинствами процесса ультразвукового объединения?

35 В каких практических областях могут использоваться изделия, получаемые в процессе ультразвукового объединения?

36 Что собой представляет технология ультразвукового аддитивного производства (Ultrasonic Additive Manufacturing)?

37 Какие принципы положены в основу автоматизированного производства ламинированных конструкционных материалов (Computer Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials)?

4 Материалы для аддитивных процессов

За последние годы стремительно возросли достижения в области разработки и использования материалов для 3D печати. Сегодня существующие процессы 3D печати используются для создания прототипов и производства конечных изделий из сотен видов пластиковых и металлических материалов. Улучшения в технологии аддитивного производства в сочетании с соответствующими улучшениями в технологии материалов существенно повлияли на направления развития 3D печати, на которую опираются инженеры, дизайнеры и производители во время разработки и производства изделий [13].

Материалы в системах аддитивного производства определяются используемой технологией. Каждая технология 3D печати преобразует материал посредством воздействия на него внешних источников тепла, света, лазерного излучения и других направленных энергий. Способность материала положительно реагировать на определенный вид направленной энергии связывает его с технологией, которая позволяет получить желаемые преобразования. Эта взаимосвязь материалов и технологий все более расширяется, так как не прекращаются разработки в области создания новых материалов и их химических взаимодействий. Развитие технологий способствует более качественным реакциям материала на внешние источники энергии при послойном построении объектов. Механизм преобразования материала является уникальным для каждого отдельного процесса и технологии 3D печати, и определяется изменением состояния материала, его механических свойств и возможностей проектного использования.

В настоящее время для реализации технологий 3D печати используется множество термопластичных и металлических материалов, традиционно применяемых в производстве. Пластики, обычно используемые для литья под давлением, применяются для изготовления изделий на основе моделирования методом наплавления (FDM). Металлы, традиционно подвергаемые механической обработке, такие как нержавеющая сталь и титан, в форме металлических порошков используются в технологии прямого лазерного спекания металлов (DMLS). Биосовместимые материа-

лы, такие как ULTEM 1010 и поликарбонат используются для получения деталей методами селективного лазерного спекания (SLS) и наплавления материала (FDM). Данные материалы имеют высокие механические свойства и позволяют получать изделия сложной геометрической формы, создание которых невозможно традиционными методами обработки.

Наиболее популярными аддитивными технологиями на сегодняшний день являются PolyJet, Laser Sintering (LS), Fused Deposition Modeling (FDM) and Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Эти технологии позволяют разрабатывать конструкции пластиковых и металлических изделий методом послойного построения с использованием специфических процессов. PolyJet является технологией, которая наращивает объекты путем послойного нанесения фотополимерной смолы, где смола одновременно отверждается сразу после нанесения, с использованием энергии ультрафиолетового лазера. Стереолитография также использует фотополимерные материалы и ультрафиолетовое излучение, однако смола здесь содержится в баке в виде жидкости. Для отверждения деталей заданной формы ультрафиолетовое излучение направляется посредством системы динамических зеркал. FDM тоже является процессом наращивания материала, в котором нагретый термопластик экструдруется слой за слоем из высокоточной фильеры. Лазерное спекание является процессом, основанным на использовании порошкообразных материалов, в котором для сплавления пластикового или металлического порошка в твердое тело, осуществляется воздействие на него инфракрасным лазером в закрытой камере. Все эти процессы, привязанные к материалам, которые они используют, предоставляют многообразные уникальные возможности для индустрии 3D печати.

При выборе материала для аддитивного производства изделия необходимо учитывать назначение, функции и особенности конструкции этого изделия. Материалы, доступные для 3D печати имеют широкий диапазон теплостойкости, химической стойкости и прочности, в связи с чем «жизнеспособность» конкретного материала будет во многом зависеть от конструкции, назначения и требуемого срока службы изделия. Для определения материала и аддитивного процесса, которые будут наилучшим образом удовлетворять целям проектирования, необходимо рас-

смотреть особенности использования основных материалов, к которым относятся фотополимеры, порошкообразные пластики и металлы, а также термопластики.

4.1 Фотополимерные материалы

Применение фотополимерных материалов в 3D печати началось с жидких смол, отверждаемых ультрафиолетовым излучением для получения пластмассовых прототипов и деталей. Светоотверждаемые материалы варьируют по цвету, прозрачности и жесткости. В аддитивном производстве наиболее распространены две технологии, основанные на использовании светоотверждаемых материалов, которыми являются стереолитография и технология PolyJet.

Материалы для процесса стереолитографии (SL материалы) обеспечивают хорошую размерную точность деталей, составляющую $\pm 0,2$ мм в плоскости сечения (XY) и $\pm 0,127$ мм в направлении построения (ось Z). Каждый из них реагирует на излучение ультрафиолетового лазера своим специфическим способом, зависящим от механических свойств материала; эти различия в реакции могут определять допуски геометрических элементов или помимо других факторов определять степень усадки и скорость построения. Использование SL материалов наиболее подходит для тех конструкций деталей, оптимальное исполнение которых определяется скоростью построения, усадкой и геометрической точностью.

SL материалы с малой усадкой и высокими скоростями печати включают в себя такие материалы, как SC 4500, SL7810, Accura25, Somos 18420 (и подобные им материалы). Все эти материалы по цветовому признаку можно обозначить как SLA White, то есть материалы белого цвета. Кроме этих материалов существует категория бесцветных или прозрачных SL материалов, которые можно обозначить как SLA Clear, то есть бесцветные материалы. Бесцветные материалы включают в себя Somos 10122, Accura 60, Somos 11122 (и подобные им материалы). Материалы, используемые для производства деталей высокой точности, включают Somos NeXT и SC 5500, запатентованный компанией «Stratasys».

Любая из названных категорий материалов позволяет создавать прототипы деталей хорошего качества, но область их применения, в первую очередь, будет определяться прочностными свойствами материала. Так материалы SLA White обычно используются для производства более прочных прототипов и, кроме того, в зависимости от геометрии детали, они могут обеспечивать наивысшую скорость печати в сравнении с остальными категориями SL материалов. Достоинствами материалов SLA Clear является их прозрачность и изгибная прочность, близкая к поликарбонату. Предел прочности на изгиб для материалов SLA Clear обычно находится в пределах от 87 до 101 МПа (в зависимости от конструкции детали). Материалы SLA Clear, SLA White и Somos NeXT доступны для использования в микро-стереолитографических системах и позволяют воспроизводить мельчайшие геометрические элементы моделей и прототипов маленького размера при обеспечении хорошей изгибной прочности в диапазоне от 67,8 до 70,8 МПа (в зависимости от конструкции детали).

Помимо этих стандартных SL материалов также известен менее распространенный материал SC 1000. Данный SL материал был специально разработан для технологии литья по выплавляемым моделям. Здесь он используется для создания мастер-моделей среднего и большого размера со сложной геометрией. Этот SL материал обладает более высокой влагоустойчивостью по сравнению с другими SL материалами, которая уменьшает набухание смолы в баке. Его высокая прочность минимизирует массу завершённой модели, а низкая/стабильная вязкость гарантирует устойчивый дренаж. SC 1000 является основным модельным материалом для многих литейных заводов, где требуются точные мастер-модели большого размера по более низкой цене, чем восковые модели того же размера (в настоящее время данный материал распространяется только компанией «Stratasys Direct Manufacturing»).

Как упоминалось выше, технология PolyJet является производной от стереолитографии, где фотополимерные материалы отверждаются одновременно с их нанесением, а не в баке с жидкой смолой. Материалы, используемые этой технологией, способны давать наивысшее разрешение, чем любой другой материал или технология 3D печати, с толщиной слоя, достигающей 16 мкм (по оси Z). Высокое раз-

решение получаемых изделий устраняет необходимость в продолжительной постобработке их поверхностей, а малая толщина слоя обеспечивает более ровные текстуры, чем другие технологии 3D печати. PolyJet также является единственным в настоящее время процессом 3D печати, позволяющим печатать несколькими материалами с различной твердостью. Для использования в процессе PolyJet разработаны сотни фотополимерных композитов, в качестве примеров которых можно назвать следующие материалы.

VeroWhitePlus, VeroBlue, VeroGray, Amber Clear, GreenFire, Endur и Flex обладают набором механических свойств, характерным для большинства популярных PolyJet материалов. VeroWhitePlus, VeroGray и Amber Clear имеют изгибную прочность около 93 МПа, в то время как, VeroBlue, GreenFire и Endur позволяют обеспечивать изгибную прочность от 52 до 67 МПа. Эти материалы способны формировать слои толщиной 16 мкм с размерной точностью геометрических элементов в 300 мкм. GreenFire и Endur являются материалами со слегка более высокими деформационной теплостойкостью и относительным удлинением при разрыве. Температура тепловой деформации для материала GreenFire находится в диапазоне от 51°C до 55 °C при давлении 1,82 МПа, в то время как, для материала Endur эта температура находится в диапазоне от 49 °C до 54 °C. Относительное удлинение для обоих материалов составляет 20-40 %, при этом GreenFire менее устойчив к разрыву, чем Endur.

Материалы группы Flex имеют твердость по Шору от 27A до 95A и используются для симуляции эластомерных материалов. Данные материалы имеют дополнительное преимущество печати при их использовании в сочетании с жесткими материалами; такой подход называется переформованием (Over-Mold) и может быть использован для создания прототипирующих моделей с градиентными функциональными свойствами. При переформовании материал Flex смешивается с материалом VeroWhitePlus, что позволяет получать изделия с переменной твердостью. Материалы Flex обеспечивают печать с немного большей толщиной слоя в 30 мкм при размерной точности, сопоставимой с жесткими материалами.

PolyJet и SL материалы обычно применяются для создания концептуальных моделей высокого разрешения, мастер-моделей для процессов уретанового литья и

оценочных прототипов изделий на ранних стадиях их разработки во множестве отраслей. Обе группы материалов, с соответствующими им процессами используются для создания моделей медицинских устройств, анатомических наглядных пособий, демонстрационных моделей потребительских товаров и во многих других практических областях. Материалы PolyJet обеспечивают гладкие поверхности и разнообразные цвета изделий, в то время как, SL материалы обеспечивают хорошую шлифуемость поверхностей для их отделочной покраски. Оба типа процесса с сопутствующими материалами появились в связи с отсутствием подходящих технологий, необходимых для решения проблем, которые повсеместно возникают при разработке изделий.

В качестве ограничений фотополимерных материалов следует назвать их температуру тепловой деформации, которая много ниже, чем для других материалов, используемых для 3D печати, и их большую подверженность короблению под воздействием теплового или светового излучения. Поэтому на рынке они позиционируются не как материалы для производства конечных функциональных изделий, а скорее как материалы для создания прототипирующих моделей, которые помогают оценить важные особенности конструкции изделия.

4.2 Порошкообразные пластики

Наиболее распространенным порошковым материалом, используемым для 3D печати, является порошок полиамида. Этот порошок в процессе построения изделия спекается, т.е. нагревается и слой за слоем сплавляется в монолитную пластиковую конструкцию при помощи углекислотного лазера. Использование полиамидных материалов в 3D печати основано на их хорошей теплостойкости, высокой прочности и превосходной способности к удлинению. Процесс построения на основе этих материалов не требует материала поддержки, вследствие чего позволяет создавать более сложные геометрические конструкции, чем большинство других аддитивных технологий.

Лазерное спекание (LS) полиамидных композитов преимущественно осуществляется на основе двух полиамидных порошков: Nylon 12 и Nylon 11. Эти два материала могут улучшаться или армироваться за счет различных наполнителей, включая алюминий, стекло и даже углеволокно, для получения требуемых механических свойств. LS материалы обычно обеспечивают построение с толщиной слоя от 0,1 до 0,15 мм и размерной точностью $\pm 0,5$ мм. В настоящее время существуют разнообразные полиамидные порошковые композиты, доступные для технологий лазерного спекания. Некоторые из них не горючи и не токсичны и множество других обладают высокой теплостойкостью. В начале этого ряда следует упомянуть порошки общего назначения, а в конце – порошки с повышенными свойствами для работы в агрессивных средах.

Nylon 12 является порошковым материалом общего назначения без наполнителя. Температура тепловой деформации данного материала составляет около 86 °С (при давлении 1,82 МПа), а изгибная прочность – около 47 МПа. Его хорошая прочность и температура тепловой деформации сделали его основой для создания функциональных прототипов, архитектурного моделирования и даже произведений искусства. Nylon 12 имеет относительное удлинение в пределах от 4 % до 15 %, которое может быть повышено за счет добавления определенных наполнителей. Для повышения прочности и теплостойкости Nylon 12 может быть армирован стеклом или карбоном. Nylon 12 Glass Filled (GF – стеклянный наполнитель) имеет температуру тепловой деформации 134 °С (при давлении 1,82 МПа). Nylon 12 с карбоновым наполнителем имеет примерно такую же температуру тепловой деформации при более высокой изгибной жесткости, чем у полиамида без наполнителя.

В качестве еще одного наполнителя полиамида используется алюминий. Nylon 12 Aluminum Filled (AF – алюминиевый наполнитель) имеет более высокую прочность на изгиб и растяжение, но его малое относительное удлинение делает его более подходящим для создания прототипов и моделей при сравнении с другими полиамидными материалами. Эффектный внешний вид этого материала делает его популярным для нефункциональных изделий. Помимо названных полиамидных композитов общего назначения существуют доступные полиамидные материалы с по-

вышенной упругостью. Примером такого материала является Flex TPE, представляющий собой эластомерный полиамид, который имеет наивысшее удлинение, по сравнению с любым другим полиамидом, используемым в 3D печати. Flex TPE может быть подвергнут инфильтрации дополнительным материалом для повышения его твердости (от 40 до 70 единиц по Shore). Без инфильтрации Flex TPE имеет относительное удлинение 110 % при разрыве. Это делает его превосходным решением для создания эластичных изделий.

Вышеописанные полиамидные материалы общего назначения дополняет материал FAR 25.853, имеющий сертифицированные характеристики по горению, дымообразованию и токсичности. Полиамиды FAR 25.853 используются для отделки коммерческих и корпоративных интерьеров, а также для отделки салонов пассажирских самолетов. Эти материалы проходят 15 и 60 секундные тесты на вертикальное горение, а также тесты на дымообразование и токсичность, необходимые для использования в авиационной или подобных областях применения. Доступные сегодня для 3D печати полиамиды, удовлетворяющие всем этим стандартам, включают в себя армированный Nylon 12 (также известный как 606-FR или NyTek™ 4 1200 FR) и улучшенный Nylon 11 (также известный под названием FR-106). Наиболее значительное отличие между этими термостойкими и нетоксичными материалами заключается в их способности к удлинению. Nylon 12 FR (NyTek 1200 FR) имеет относительное удлинение при разрыве близкое к обычному Nylon 12, в то время как, Nylon 11 FR (FR-106) имеет намного большее удлинение при разрыве, составляющее около 21-38 %. Использование Nylon 12 FR показало, что он имеет более низкую степень усадки, чем Nylon 11 FR, что особенно важно при построении деталей большого объема, для которых более низкая степень усадки дает большую точность.

LS материалы великолепно подходят для изготовления конечных изделий или прототипов, используемых в разнообразных агрессивных средах. Их способность к производству замысловатых изделий сложной геометрической формы не имеет аналогов в традиционных или высокотехнологичных производствах. Полиамиды, используемые в 3D печати, имеют минимальные технологические требования, что делает процесс незаменимым при производстве высокотехнологичных единичных де-

талей. Однако процессы спекания могут использоваться для изготовления средними и большими партиями деталей малого и среднего размера и эта область их использования все более расширяется.

При проектировании деталей для производства методом лазерного спекания следует принимать во внимание минимальный размер геометрических элементов детали, а также фактор возможной усадки. Предварительное внесение в конструкцию детали поправок на возможную усадку позволяет получать более точные результаты.

4.3 Металлы

Для 3D печати металлических изделий используются металлы в порошкообразном состоянии. При реализации процесса металлические порошки нагреваются и сплавляются мощным иттербиевым волоконным лазером, энергия которого приводит к свариванию частиц порошка слой за слоем для формирования тела детали. Несмотря на то, что металлическая 3D печать является очень сложным процессом, требующим обслуживания высококвалифицированным персоналом, она позволяет получать сложные плотные детали, производство которых традиционными методами возможно только с использованием нескольких технологических операций. Комплексность металлической 3D печати позволяет ускорять производство изделий.

Металлическая аддитивное производство дает возможность исключить операции сварки и механической обработки множества элементов конструкции путем ее построения в виде единой детали. Материалы, доступные для металлической 3D печати, включают в себя распространенные металлы, используемые в аэрокосмической, медицинской, нефтегазовой и транспортной промышленности.

Металлическая 3D печать позволяет достигать невероятно малых толщин слоя, с минимальной толщиной в 40 мкм. Минимальный размер геометрических элементов таких металлических деталей составляет 0,3 мм со стандартным допуском $\pm 0,127$ мм. Металлические материалы, используемые для 3D печати, включают нержавеющие стали (17-4PH и 316L), алюминиевые сплавы (AlSi10Mg),

хромоникелевые сплавы (Inconel 625, Inconel 718), титан (Ti64) и хромокобальтовые сплавы (CoCrMo). В большинстве случаев эти материалы проявляют свариваемость и прочность, сопоставимые с традиционными конструкционными материалами. К материалам с высокой прочностью на растяжение относятся Inconel 625 и CoCrMo. Ti64 является биосовместимым материалом; детали изготовленные из данного материала проходят тест на сканирование электронным микроскопом и могут использоваться в газораспределительных системах.

Металлические детали, получаемые 3D печатью, не всегда имеют механически свойства идентичные литым деталям или полученным механической обработкой, т.к. металлы во время 3D печати претерпевают специфические изменения, которые влияют на их механические свойства. Тем не менее, напечатанные металлы обеспечивают получение плотных, коррозионно-устойчивых и высокопрочных деталей, которые дополнительно могут быть подвергнуты термообработке, нанесению покрытий или стерилизации для обеспечения предъявляемых к ним требований.

Использование металлической 3D печати дает наилучшие результаты при построении деталей сложной геометрической формы и позволяет существенно сократить трудоемкость изготовления конструкции детали за счет объединения нескольких технологических операций.

Необходимо заметить, что процесс 3D печати с использованием металлов требует использования поддерживающих структур. Эти структуры воспроизводятся из того же металлического порошка, что составляет основную деталь, и в связи с этим, требуют использования специального оборудования и подготовленного персонала для своего удаления надлежащим образом.

4.4 Термопластичные материалы

Термопласты, используемые в 3D печати, являются конструкционными материалами с высокими характеристиками, которые обладают большинством механических свойств пластиков, получаемых литьем под давлением. Термопласты для 3D печати включают в себя поликарбонат (PC), акрилонитрил-бутадиен-стирол (ABS-

пластик), акрилонитрил-стирол-акрилат (ASA-пластик) и полиэфиримид (ULTEM). Обычно эти материалы в технологиях 3D печати используются для моделирования методом наплавления (FDM).

Диапазон, используемых в FDM термопластичных материалов, простирается от функциональных материалов общего назначения для прототипирования и производства конечных изделий до высококачественных материалов для медицинской и аэрокосмической промышленности. Термопласты общего назначения, такие как, ABS, ABSi, ASA, Nylon 12 и поликарбонат имеют хорошую изгибную прочность, высокую прочность на растяжение и сопротивляемость ударным нагрузкам. Эти термопласты общего назначения могут дополнительно улучшаться для получения специальных материалов. Эти специально улучшенные FDM термопласты включают: электропроводящий материал ABS-ESD7, предотвращающий накопление статического электрического заряда; PC-ISO сертифицированный материал с биосовместимыми свойствами и ABS-M30i, материал, разработанный для пищевой и фармацевтической упаковочной промышленности. Для использования в аэрокосмической промышленности был разработан огнеупорный и химически устойчивый материал ULTEM 9085, поддерживающий FDM процессы. ULTEM 9085 представляет собой конструкционный термопластик для использования в агрессивных средах с температурой тепловой деформации 153 °С и хорошим пределом прочности на растяжение и изгиб.

С учетом возможности включения в себя термопластов, используемых для литья под давлением, и получения сложной геометрии 3D печатью, FDM материалы нашли широкое применение в аэрокосмической, медицинской, упаковочной промышленности и в ряде других областей. FDM материалы, безопасные в отношении накопления электростатического заряда, нашли свое место в электронной промышленности как различные зажимы и фиксаторы, а также при упаковке материалов, чувствительных к статическому электричеству. Благодаря свойствам используемых термопластов FDM производство является хорошим всеобъемлющим выбором для создания функциональных, и прочных деталей и изделий сложной геометрической формы.

Моделирование методом наплавления является аддитивным производственным процессом, в котором осуществляется экструдирование расплавленного материала для послойного формирования объекта. Такой метод построения приводит к тому, что границы слоев детали могут быть очень заметны на ее поверхностях и для их сглаживания без потери каких-либо важных геометрических элементов может потребоваться ручная доводка детали опытным специалистом. Такая ручная доводка может быть оптимальным решением для постобработки, в то время как, методы наподобие ацетоновых ванн и дробеструйной обработки могут приводить к уменьшению размерных допусков детали.

4.5 Контрольные вопросы

- 1 В чем выражается взаимосвязь между технологиями 3D печати и используемыми в них материалами?
- 2 Что необходимо учитывать при выборе материалов для аддитивного производства объектов?
- 3 Какими общими характеристиками обладают фотополимерные материалы для процесса стереолитографии?
- 4 Для чего используются материалы категории SLA White?
- 5 Какие достоинства имеют материалы категории SLA Clear?
- 6 Что собой представляет специальный фотополимерный материал SC 1000, разработанный компанией «Stratasys Direct Manufacturing»?
- 7 Чем характеризуются фотополимерные материалы, используемые в технологии PolyJet?
- 8 Какие механические свойства имеет большинство жестких материалов, используемых в технологии PolyJet?
- 9 Какими свойствами обладают гибкие материалы группы Flex, используемые в технологии PolyJet?
- 10 Для чего обычно используются PolyJet и SL материалы?
- 11 Что является ограничениями фотополимерных материалов?

12 На чем основано использование в аддитивном производстве полиамидных порошковых материалов?

13 Какими характеристиками обладают полиамидные порошки Nylon 12 и Nylon 11?

14 Какие наполнители могут использоваться для армирования полиамидных материалов?

15 Для чего наилучшим образом подходят полиамидные порошковые материалы, подвергаемые селективному лазерному спеканию?

16 Какие преимущества имеет металлическое аддитивное производство над традиционными технологиями обработки металлов?

17 Какие металлические материалы в основном используются для 3D печати?

18 Что отличает металлические детали, получаемые 3D печатью?

19 Какими свойствами обладают термопласты общего назначения, используемые при моделировании изделий методом наплавления?

20 Какими свойствами обладают улучшенные FDM термопласты?

21 В каких практических областях преимущественно применяются FDM термопласты?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Venuvinod, P. K. Rapid Prototyping – Laser-based and Other Technologies / P. K. Venuvinod, W. Ma. – New York: Springer Science+Business Media, 2004. – 389 p. – ISBN 978-1-4419-5388-9.

2 Gibson, I. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker. – New York: Springer Science+Business Media, 2010. – 459 p. – ISBN 978-1-4419-1119-3.

3 Liou, F. W. Rapid Prototyping and Engineering Applications: A Toolbox for Prototype Development / F. W. Liou. – Boca Raton: CRC Press, 2007. – 568 p. – ISBN 978-0-8493-3409-2.

4 Chua, C. K. Rapid Prototyping: Principles and Applications, 2nd Edition / C. K. Chua, K. F. Leong, C. S. Lim. – Singapore: World Scientific Publishing, 2003. – 448 p. – ISBN 981-238-117-1.

5 Pham, D. T. A Comparison of Rapid Prototyping Technologies / D. T. Pham, R. S. Gault // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998. – №38. – P.1257-1287.

6 Boboulos, M. A. CAD-CAM & Rapid Prototyping Application Evaluation / M. A. Boboulos. – Frederiksberg: Ventus Publishing ApS, 2010. – 174 p. – ISBN 978-87-7681-676-6.

7 Shape Deposition Manufacturing / R. Merz, F. B. Prinz, K. Ramaswami, M. Terk, L. E. Weiss // Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium / The University of Texas at Austin, August 8-10, 1994. – 8 p.

8 Pham, D.T. Rapid Manufacturing: The Technologies and Applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling / D.T. Pham, S.S. Dimov. – London: Springer-Verlag, 2001. – 214 p.

9 Weiss, C. M. Selective Area Laser Deposition for Silicon Nitride Joining / C. M. Weiss, H. L. Marcus // Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium / The University of Texas at Austin, August 6-8, 2012. – 8 p.

10 Weiss, C. M. Selective Area Laser Deposition For the Purpose of Ceramic Joining and Repair: a dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy / C. M. Weiss. – Mansfield: University of Connecticut, 2013. – 130 p.

11 Solid Freeform Fabrication: A New Direction in Manufacturing / O. J. Beaman [at al.]. – New York: Springer Science+Business Media, 1997. – 330 p.

12 Janaki Ram, G.D. Interface Microstructures and Bond Formation in Ultrasonic Consolidation / G.D. Janaki Ram [at al.] // Proceedings of the 18th Solid Freeform Fabrication Symposium / The University of Texas at Austin, 2007. – 18 p.

13 3d Printing Materials: Choosing the Right Material for Your Application // STRATASYS Direct Manufacturing: [сайт]. [2016]. URL: https://www.stratasysdirect.com/content/white_papers/STR_7463_15_SDM_WP_3D_MATERIALS.PDF (дата обращения: 02.01.2017).

Учебное пособие

Сергей Владимирович Каменев
Константин Сергеевич Романенко

ТЕХНОЛОГИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

ISBN 978-5-7410-1696-1



9 785741 016961