

АДДИТИВНО-СУБТРАКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Чжан Ц.¹, Ци М.², Козлов В.Н.³, Пань М.⁴, Клименов В.А.⁵

¹НИ ТПУ, ИШНПТ, аспирант гр. А3-21,

E-mail: cinzhun1@tpu.ru;

²НИ ТПУ, ИШНПТ, аспирант гр. А1-21,

E-mail: 2629074591@qq.com;

³НИ ТПУ, ИШНПТ, доцент ОмШ,

E-mail: kovn@tpu.ru;

⁴НИ ТПУ, ИШНПТ, аспирант гр. А3-21,

E-mail: menhual@tpu.ru;

⁵НИ ТПУ, ИШНПТ, профессор Ом,

E-mail: klimenov@tpu.ru

Аддитивно-субтрактивная технология подразумевает 3Д (3D) печать заготовки и последующую механическую её обработку для устранения погрешности формы, удаления дефектного слоя, повышения точности и уменьшения шероховатости поверхностей детали, к которым предъявляются повышенные требования.

Аддитивные технологии (АТ) (англ. Additive Manufacturing) объединяют в себя методы послойного наращивания на основу слоя материала с особыми свойствами (например, с повышенной износостойкостью или химической инертностью) или синтеза деталей. Используются также термины «фаббер-технологии» (от англ. FaberTechnology, т. е. волоконная технология) и «3D-печать» (от англ. 3DPrinting), т. е. создание объёмных объектов (в трёх направлениях) [1].

В настоящее время этот вид получения деталей всё чаще используется для изготовления деталей в единичном производстве макетов и прототипов для изучения особенностей конструкции, её улучшения и последующего изготовления этих деталей уже обычными традиционными способами лезвийной обработки.

Однако по мере совершенствования устройств для 3D печати, получения высококачественных исходных порошков металлов и сплавов, разработки новых технологий эти АТ стали использоваться для изготовления полноценных деталей, имеющих высокую прочность и точность. Особое преимущество аддитивные технологии имеют при изготовлении нежёстких изделий сложной формы, которые традиционными способами изготовить практически невозможно.

Одним из существенных недостатков большинства методов АТ является малая скорость синтеза, т. е. получения изделия, особенно при высоких требованиях к точности и прочности. Некоторые методы требуют выполнения в вакуумных камерах или в среде инертного газа, что ограничивает размеры изделия.

В перспективе совершенствование устройств и методов 3D печати постепенно приведёт к широкому использованию АТ при изготовлении изделий, о чём свидетельствует появление 3D печати в школьных мастерских и даже в домашних условиях, и, что особенно важно, без применения больших, дорогих и сложных металлорежущих станков.

Существует множество методов реализации 3D печати, которые называются как различные технологии исполнения [1].

1. **Селективное лазерное плавление (СЛП) (SLM – Selectiv Laser Melting)** (или лазерное нанесение металла) – это метод, при котором лучом лазера расплавляется порошок из металла или другого материала и осаждается на подложке (рис. 1). Порошок доставляется в зону фокуса луча инертным транспортно-защитным газом для предотвращения окисления. После отверждения получается требуемое изделие. Траектория движения пятна лазерного луча определяет конфигурацию изделия. Этот метод является наиболее перспективным среди остальных методов аддитивного производства,

т. к. из-за малых размеров пятна синтеза (от 100 до 20 мкм в зависимости от мощности лазера) происходит более быстрое охлаждение изделия. Но этот фактор приводит и к уменьшению производительности. Достоинством СЛП является также малая шероховатость поверхностей ($Ra < 2,5$ мкм), а высокая точность и прочность в случае применения мелкодисперсных и высококачественных порошков позволяет получать ответственные элементы изделий.

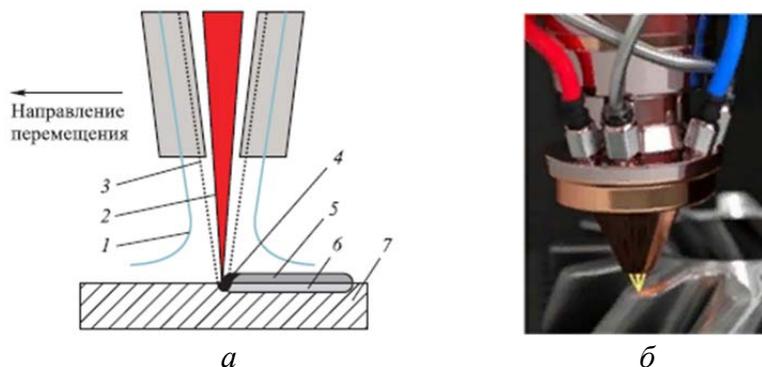


Рис. 1. Схема (а) и фото (б) формирования объёма селективным лазерным плавлением. 1 – защитный или транспортный газ; 2 – сфокусированный луч лазера; 3 – порошок; 4 – зона расплава; 5 синтезированный слой; 6 – высокотемпературная зона; 7 – подложка или исходная заготовка, на которую наносится материал при ремонте или для получения слоя с особыми свойствами

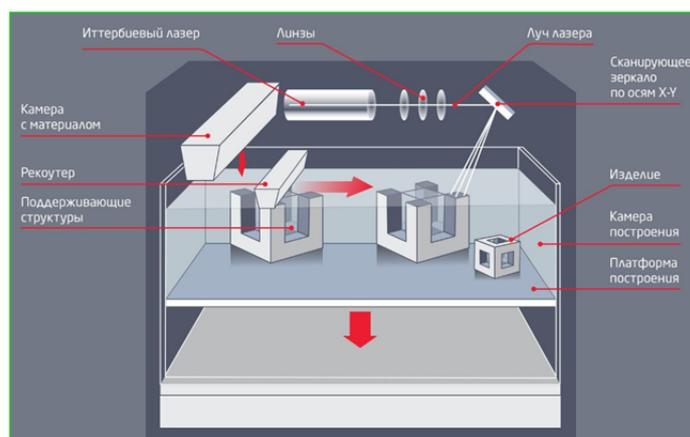


Рис. 2. Схема построения изделия в аддитивных установках SLM

2. Метод лазерной стереолитографии (SLA – Stereolithogathy Laser Additional Method, или STL – Stereolitogathy Laser) – это метод, при котором деталь послойно формируется на поверхности специального жидкого фотополимера, который отвердевает под действием лазерного излучения с определённой длиной света или при освещении ртутной лампы. Свет попадает только на те участки поверхности фотополимера, где будут формироваться участки поверхности будущей детали. После этого изделие погружается на толщину будущего слоя, и процесс продолжается.

Для увеличения производительности применяется DLP-проектор (Digital Light Processing), с помощью которого проецируется изображение очередного слоя сразу на всей поверхности ванны. В разновидности этого метода SLA-DLP применяется нижнее расположение проектора под ванной с прозрачным дном, что позволяет получать не верхний, а нижний слой, после чего образуемое изделие поднимается на толщину следующего слоя.

3. Селективное лазерное спекание (SLS – Selective Laser Sintering, или DMLS – Direct Metal Laser Sintering) – это метод, при котором изделие образуется путём плавления порошка пластика или металла лазерным лучом (рис. 3). Порошок насыпается равномерным слоем в резервуаре перед каждым новым слоем. После окончания формирования слоя резервуар опускается на толщину нового слоя, порошок насыпается (может даже другого состава) и процесс продолжается.

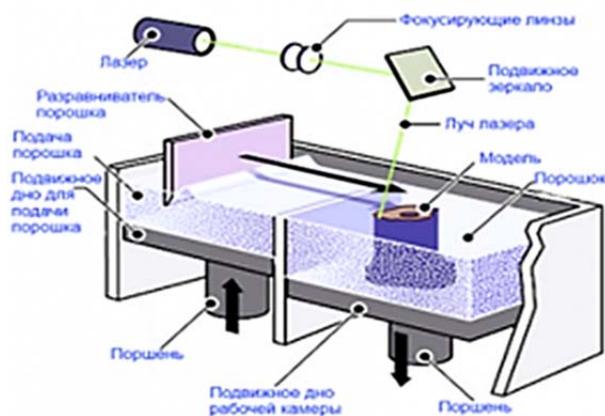


Рис. 3. Схема SLS

В рассматриваемом методе не требуются поддерживающие элементы «висящих в воздухе» частей детали, т. к. они будут опираться на оставшийся невогребованный порошок. Для предупреждения окисления в камеру нагнетается инертный газ, а для уменьшения требуемой мощности для спекания температура в камере устанавливается чуть ниже точки плавления порошка.

4. Реализация **электронно-лучевой плавки (EBM – Electron Beam Melting)** возможна только в вакуумной камере, а в остальном он похож на SLS/DMLS метод. Размеры объекта ограничиваются размерами вакуумной камеры с учётом пространства для развёртки электронного пучка.

5. При использовании метода «**Моделирование методом наплавления**» (**FDM – Fused Deposition Modelling**) изделие образуется послойной укладкой расплавленной проволоки из наплавляемого материала. Для этого используется пластик или даже воск для уменьшения требуемой температуры и уменьшения себестоимости объекта. Но в металлических принтерах **проволочно-дугового аддитивного производства (WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing)**, похожий на FDM (рис. 4) используется металлическая проволока различной толщины. Это самый производительный метод при использовании металла, но изделие получается грубым, особенно при большой толщине проволоки. Проволока подаётся в экструзионную головку, где происходит нагрев до температуры, близкой к температуре плавления и выдавливание материала на охлаждаемую платформу. После нанесения слоя происходит опускание платформы на один слой. Для предотвращения провисания нависающего слоя типа карниза используются несколько рабочих головок, одна из них выдавливает рабочий материал, а остальные – легко удаляемый впоследствии материал поддержки.



Рис. 4. Создание детали методом наплавления с использованием проволоки

6. Использование метода **многоструйного моделирования (MJM – Multy JetModelling)** похоже на метод FDM, но вместо экструдера применяется струйная печать воском или порошком с клеящим составом, иногда используются фотополимеры (рис. 5). В последнем случае дополнительно используются ртутные лампы для быстрого отверждения слоя.



Рис. 5. Метод многоструйного моделирования

7. При изготовлении изделия методом **ламинирования (LOM – Laminated Object Manufacturing)** используется последовательное склеивание слоёв плёнок за счёт нагрева или давления с последующим вырезанием лазерным лучом или лезвием требуемого контура на каждом слое. Провисание нависающих элементов может представлять определённую проблему, но при печати неметаллами выступы не мешают выполнять ламинирование.

8. Под методом «3D печать» (3D Printing, или 3DP – Three-Directional Printing) может подразумеваться любой из приведённых методов, но обычно он выделяется как метод, при котором изделие образуется из порошка путём его склеивания клеем, подаваемым струйным принтером. Принтер имеет простую конструкцию (рис. 6), компактен, сравнительно недорогой, и поэтому изделия-модели имеют минимальную себестоимость. Из-за этих достоинств метод часто используется для получения навыков программирования по аддитивным технологиям, в том числе и в школах. Добавление в клей красителя при печати или применение нескольких печатающих головок с разноцветным клеем позволяет выполнять цветное моделирование, что увеличивает товарный вид изделий и делает работу более привлекательной. К тому же появляется навык использования как бы разных материалов при создании объекта, что является одним из достоинств аддитивных технологий.

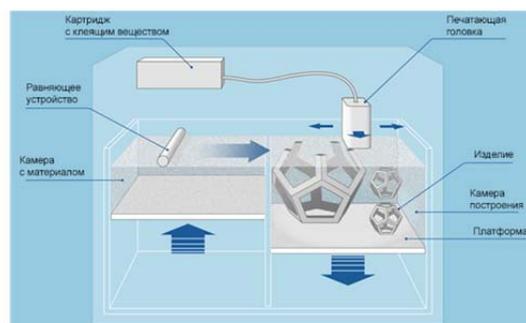


Рис. 6. 3D принтер с использованием склеивания порошка клеем

9. Метод компьютерной осевой литографии, или вычислительной осевой литографией (CAL – Computed Axial Litography) получают изделия за счёт отвердевания специальных полимеров под действием света. Основное преимущество этого метода высокая скорость создания объекта – от 30 секунд до нескольких минут. Программное обеспечение CAL переводит цифровую модель желаемого объекта в серию изображений, которые проецируются на вращающийся сосуд с фото отвердевающей жидкостью. Когда общий объем света превосходит заданный предел, материал отвердевает.



Рис. 7. Объект, сформированный CAL технологией

Такой метод позволяет печатать мягкие объекты без каркасов или систем поддержки, даже с нависающими элементами, т. к. образуемый объект находится в сосуде с жидкостью высокой вязкости (рис. 7). Можно делать и достаточно твёрдые наслоения.

Аддитивные технологии используются в машиностроении, судостроении, космонавтике, при строительстве домов, мостов и др. крупных объектов; в сельскохозяйственной промышленности, фармакологии, медицине для протезирования, пищевой промышленности при оформлении тортов и пр.

В машиностроении АТ используются для создания объектов ажурных, оболочковых, а также маложёстких конструкций (рис. 8, а), когда традиционные способы изготовления изделия невозможны или требуют удаления большого объёма металла из исходной плиты. АТ очень часто используются при изготовлении решётки и подобных изделий (рис. 8, б).



Рис. 8. Ажурное маложёсткое изделие, изготовленное АТ (а) и решётка (б)

При изготовлении изделий методом наплавки из проволоки получается неравномерная толщина стенки (рис. 9 а, б), особенно при использовании повышенных режимов получения изделия. Это вызывает необходимость последующей обработки фрезерованием для увеличения точности размеров и формы детали. Технологии, связанные с удалением материала, называются **субтрактивными**.

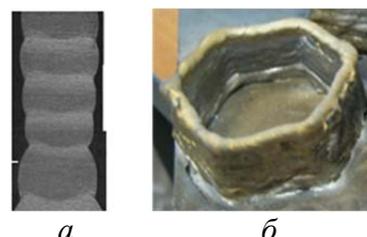


Рис. 9. Сечение стенки изделия, полученного методом наплавки проволокой (а), и его общий вид (б)

Чаще всего для окончательной механической обработки используются фрезерование концевыми фрезами (рис. 10). При этом происходит изменение величины сил из-за изменения толщины среза и поворота зубьев фрезы. Эти изменения составляющих сил приводят к изменению упругой деформации системы станок – приспособление – инструмент – деталь (СПИД), появлению вибрации, особенно при резонансе, когда частота внешней нагрузки совпадает с частотой собственных колебаний, ухудшению качества обработки и уменьшению надёжности работы фрез.

Большое значение имеет величина радиальной силы P_y , действующей в радиальном направлении, из-за малой жёсткости фрезы в этом направлении. Износ по задней поверхности, примыкающей к главной режущей кромке, существенно увеличивает величину этой силы, что может привести к выкрашиванию режущей кромки или даже поломке фрезы [2, 3, 4].

Малая жёсткость концевых фрез в радиальном направлении из-за небольшого диаметра пальцевых концевых фрез ($d_{фр} = \text{Ø}6\text{--}12$ мм) и большой длины вылета l_2 рабочей части фрезы относительно цанги ($l_2 = 3 \cdot d_{фр}$) приводит к отжиму фрезы от заготовки и возникновению вибрации.

В ходе наших исследований выполнялась обработка стали четырёхзубыми концевыми фрезами из твёрдого сплава ВК8, во время которой с помощью динамометра Kistler непрерывно измерялись составляющие P_h , P_v и P_x силы резания. В программное обеспечение динамометра Kistler заложено, что вертикально направленная сила на мониторе обозначается как F_z , сила в горизонтальной плоскости в направлении к оператору как F_y , сила в горизонтальной плоскости в направлении справа налево как F_x [5].

С учётом встречного фрезерования стороны заготовки с наибольшей длиной (заготовка установлена **поперёк** динамометра, направление минутной подачи $s_{мин}$ (мм/мин) стола станка справа налево, как показано на рис. 10) сила F_x на мониторе есть сила P_h , сила F_y на мониторе есть сила P_v , а сила F_z на мониторе есть осевая сила P_x (рис. 11).

В данной статье представлены результаты измерения сил при глубине фрезерования $t = 3,8$ мм, равной чуть меньше половине диаметра фрезы. Поэтому при врезании зуба на экране монитора появляются составляющая $F_x = P_h$, которая является силой P_z , т. к. при врезании она направлена против направления подачи стола s_m , т.е. пока центральный угол ψ небольшой [6]. Составляющая $F_y = P_v$ будет представлять силу P_y , т. к. при врезании она направлена радиально и перпендикулярно направлению подачи.

Так как количество зубьев равно четырём ($z = 4$) и $t < d_{фр}/2$, то одновременно в контакте с заготовкой будет находиться только один зуб, что облегчает анализ изменения сил при фрезеровании. При выходе зуба из контакта составляющая P_v будет представлять силу P_z , а составляющая P_h будет представлять силу P_y .

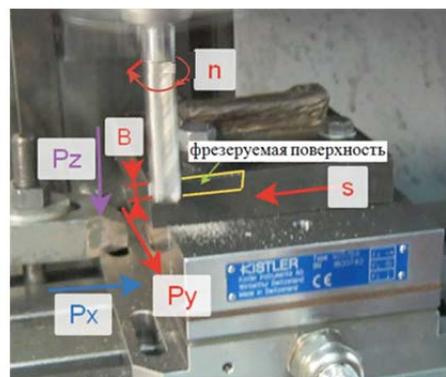


Рис. 10. Направление составляющих силы резания, отображающихся на мониторе динамометра Kistler, и направление подачи s (мм/мин) при встречном фрезеровании подложки концевой фрезой

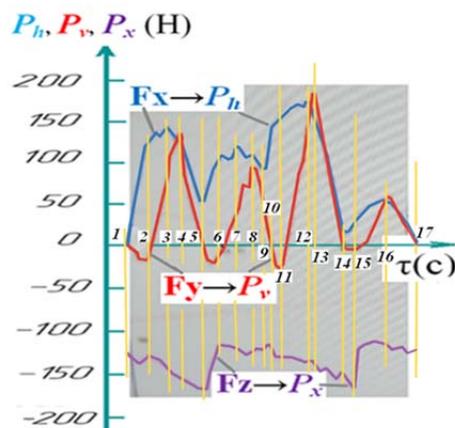


Рис. 11. Графики изменения сил при фрезеровании стали при повороте острой фрезы на один оборот. Встречное фрезерование 4-х зубой твёрдосплавной фрезой диаметром 8 мм, $t = 3,8$ мм, $b = 2$ мм, $n = 500$ об/мин, $s_m = 28$ мм/мин, Сталь 40X13 после АТ (576 HV) – твердый сплав

Составляющая P_x будет всегда направлена вдоль оси вращения фрезы, поэтому проблемы с изменением направления её действия не будет. Однако по торцу с заготовкой всегда будет контактировать 2 зуба, а иногда, короткое время, даже 3 зуба, т. к. пока один зуб врезается, то предыдущий по торцевой части ещё не вышел из контакта с заготовкой, а следующий уже зашёл в контакт с горизонтальной поверхностью уже обработанной поверхности заготовки. Конечно, сила на следующем зубе небольшая, т.к. он не срезает стружку. Но, тем не менее, сила P_x никогда не будет равна нулю.

Выводы

1. Для получения изделий из прочного металла очень часто используется более дешёвый способ аддитивной технологии – наплавлением проволоки.

2. Изделия из стали, полученные аддитивной технологии, имеют более высокую твёрдость, чем полученные из прутка, т. к. происходит закаливание металла в результате быстрого охлаждения после их нагрева при наплавлении. Особенно значим этот эффект при использовании легированных сталей. Это вызывает ухудшение обрабатываемости при последующем фрезеровании заготовки.

3. Большая амплитуда изменения боковой составляющей P_y в направлении наименьшей жёсткости концевой фрезы приводит к появлению вибрации, а её, пусть и небольшое по величине, отрицательное значение усугубляет это негативное влияние.

В работе применялось оборудование ЦКП НОИЦ НМНТ ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710.

Список литературы

1. Кравченко Е.Г. Аддитивные технологии в машиностроении: учебное пособие/ Кравченко Е.Г., Верещагина А.С., Верещагин В.Ю.. – Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2021. – 139 с. – ISBN 978-5-4497-1012-3. Текст электронный// Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/105704.html> (дата обращения: 18.01.2022). – Режим доступа: для авторизир. пользователей. – DOI: <https://doi.org/10.23682/105704>.

2. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента/Полетика М.Ф. – Москва: Машиностроение, 1969. – 148 с.

3. Развитие науки о резании металлов /В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев и др. – Москва: Машиностроение, 1967. – 416 с.

4. Зубарев, Ю.М. Основы резания материалов и режущий инструмент: учебник / Ю.М. Зубарев, Р.Н. Битюков. – Санкт-Петербург: Лань, 2019. – 228 с. – URL:<https://e.lanbook.com/book/126717> (дата обращения: 14.04.2019). – Режим доступа: из корпоративной сети ТПУ. – Текст: электронный.

5. Утенков, В.М. Возможности использования динамометра Kistler для испытания металлорежущих станков / В.М. Утенков, П.А. Быков // Инженерный вестник. – 2012. – № 10. – С. 9.

6. Козлов В.Н., Петровский Е.Н., Шэ Л., Чжан Х. Особенности фрезерования образцов после аддитивного синтеза // Современные проблемы машиностроения сборник трудов XV Международной научно-технической конференции, г. Томск, 22–25 ноября 2022 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ); ред. кол. Е. Н. Пашков [и др.]. – Томск: Томский политехнический университет, 2022. – [С. 102–104].