

КОВАЛЕНКО И.Д., студент гр.ОУб-221 (КузГТУ)
Научный руководитель ГАЛАНИНА Т.В., к.с.-х.н., доцент (КузГТУ)
г. Кемерово

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АДДИТИВНЫХ И СУБСТРАКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ

Аддитивные технологии в современном производстве.

Аддитивные технологии, под которыми часто подразумевают 3D-печать, представляют собой процесс создания трехмерных объектов путем послойного нанесения материала. Этот процесс начинается с создания цифровой 3D-модели с использованием специализированного программного обеспечения, такого как AutoCAD, SolidWorks или Fusion 360. Модель затем преобразуется в серию тонких сечений (процесс, называемый слайсингом), которые служат инструкциями для 3D-принтера. Принтер последовательно добавляет материал слой за слоем, формируя объект в соответствии с заданной геометрией. Толщина слоя варьируется в зависимости от технологии и составляет от 10 микрон (0,01 мм) для высокоточных методов и до 200 микрон (0,2 мм) для более доступных систем [8].

Основные методы аддитивного производства включают:

1. FDM (Fused Deposition Modeling): экструзия расплавленного термопластика (например, PLA или ABS) через нагретое сопло, которое движется по заданной траектории, охлаждая и отверждая материал слой за слоем.
2. SLA (Stereolithography): использование ультрафиолетового лазера для точечного отверждения жидкой фотополимерной смолы, в ходе чего создаются твердые слои с высокой детализацией.
3. SLS (Selective Laser Sintering): спекание полимерного порошка (например, нейлона) с помощью лазера, в ходе чего частицы плавятся и сцепляются, образуя прочный объект.
4. DMLS (Direct Metal Laser Sintering): полное или частичное сплавление металлических порошков (например, титана или нержавеющей стали) с использованием высокомощного лазера в контролируемой инертной среде, такой как аргон [1].

Аддитивные технологии находят широкое применение в отраслях, где требуется высокая степень кастомизации, сложная геометрия или быстрое создание прототипов. Их уникальные возможности делают их незаменимыми в следующих сферах:

1. Авиация: здесь они используются для производства легких компонентов с оптимизированной геометрией, таких как топливные форсунки, лопатки турбин и решетчатые структуры, снижающие вес конструкции. Например, компания GE Aviation применяет DMLS для создания деталей реактивных двигателей, что

позволяет сократить вес на 20-30% по сравнению с традиционными методами [2].

2. Медицина: создание индивидуальных имплантатов (например, титановых тазобедренных протезов), зубных коронок и ортопедических конструкций. Технология SLA применяется для печати биосовместимых смол, используемых в хирургических шаблонах, а DMLS – для производства имплантатов с микропористой структурой, улучшающей остеointеграцию (процесс соединения кости с искусственным имплантатом) [3].

3. Автоспорт: быстрое производство аэродинамических элементов, таких как спойлеры или внутренние компоненты подвески для болидов Формулы-1. Команды используют SLS для создания легких и прочных деталей, что дает конкурентное преимущество в скорости и адаптации [4].

4. Архитектура и дизайн: создание масштабных моделей зданий или сложных декоративных элементов, где важна детализация и возможность экспериментировать с формами. (<https://cyberleninka.ru/article/n/additivnye-tehnologii-v-arhitekture-novye-gorizonty/viewer>)

Аддитивные технологии обладают такими преимуществами как:

1. Гибкость геометрии: возможность создавать сложные формы, включая полые структуры, подвижные элементы и микроканалы, которые невозможно реализовать с помощью традиционных методов. Это особенно важно для топологической оптимизации (это метод проектирования, который оптимизирует распределение материала в заданном объёме при определённых нагрузках и ограничениях; его цель – достичь максимальной жёсткости или прочности при минимальном весе).

2. Минимизация отходов: материал добавляется только в необходимых местах, что снижает количество отходов до 5-10% от исходного объема по сравнению с субтрактивными методами.

3. Быстрое прототипирование: позволяет создавать функциональные прототипы за часы или дни, что ускоряет цикл разработки продукции (от идеи до тестирования).

4. Кастомизация: идеально подходит для индивидуального производства, например, создания ортопедических стелек или зубных протезов, адаптированных под конкретного пациента.

5. Децентрализация производства: возможность печати деталей на месте снижает логистические затраты и время поставки.

К недостаткам аддитивных технологий относятся:

1. Ограниченнная скорость: производство крупных или сложных деталей может занять от нескольких часов до дней, особенно при использовании высокоточных методов, таких как DMLS.

2. Стоимость оборудования: профессиональные 3D-принтеры, особенно для металлической печати, стоят примерно от 4 млн до 90 млн рублей, что делает их недоступными для малых предприятий.

3. Ограничения по материалам: хотя ассортимент материалов растет (пластики, смолы, металлы), многие из них имеют ограничения по прочности, теплопроводности или биосовместимости.

4. Постобработка: детали часто требуют удаления поддерживающих структур (временные конструкции, которые принтер добавляет к модели для того, чтобы она правильно напечаталась), шлифовки, термообработки или очистки от остатков порошка, что увеличивает трудозатраты [5].

5. Качество поверхности: Поверхность может быть шероховатой, что требует дополнительной отделки для эстетических или функциональных целей.

Субтрактивные технологии в современном производстве.

Субтрактивные технологии основаны на удалении материала из заготовки для формирования конечной детали. Процесс начинается с выбора твердого блока или стержня материала (металл, пластик, дерево), который затем обрабатывается с использованием режущих инструментов, управляемых компьютерными системами (ЧПУ – числовое программное управление). Инструменты, такие как фрезы, сверла, токарные резцы или лазеры, удаляют избыточный материал, оставляя деталь с заданной формой и размерами. Точность движения инструмента определяется программным обеспечением, основанным на 3D-модели, импортированной из CAD-систем [6].

Основные методы таковы:

1. Фрезеровка: использование многоосевого станка с вращающейся фрезой, который удаляет материал с плоских или кривых поверхностей.
2. Токарная обработка: вращение заготовки с одновременным движением резца для создания цилиндрических деталей, таких как валы или шпинNELи.
3. Лазерная резка: точное удаление материала с помощью концентрированного лазерного луча, часто используемого для тонких листов металла или пластика.
4. Электроэрозионная обработка (EDM): удаление материала с помощью контролируемых электрических разрядов, применяемое для обработки твердых металлов с высокой точностью.

Субтрактивные технологии доминируют в отраслях, требующих высокой точности, прочности и массового производства:

1. Машиностроение: изготовление критически важных деталей, таких как шестерни, валы, корпуса насосов и поршни, где важны допуски в пределах 5-10 микрон (0,005-0,01 мм) [7].
2. Массовое производство: производство металлических и пластиковых компонентов для автомобилей (корпуса двигателей), бытовой техники и электроники (корпуса смартфонов).
3. Судостроение: обработка крупных металлических деталей, таких как гребные винты, корпуса судов и валов, которым требуется высокая прочность и устойчивость к коррозии.
4. Инструментальное производство: создание пресс-форм, штампов и матриц для литья под давлением, для чего важна долговечность и точность.

Преимущества субтрактивных технологий:

1. Высокая точность: достижение допусков до 1-5 микрон (0,001-0,005 мм), что критично для аэрокосмического и медицинского применения.

2. Широкий выбор материалов: возможность обработки металлов (сталь, титан, алюминий), пластиков, композитов и даже дерева с использованием соответствующих инструментов.
3. Качество поверхности: поверхностная гладкость достигается без значительной постобработки, что важно для эстетических и функциональных целей.
4. Скорость при серийном производстве: высокая производительность при обработке больших партий благодаря параллельной работе нескольких станков.
5. Надежность: детали обладают высокой механической прочностью и устойчивы к нагрузкам, сравнимым с нагрузками, выдерживаемыми литыми изделиями.

Недостатки субтрактивных технологий:

1. Ограничения по геометрии: трудности с обработкой внутренних полостей, подвижных элементов или деталей с резкими изгибами из-за ограниченного доступа инструмента.
2. Высокий уровень отходов: до 70-90% исходного материала может превратиться в стружку, что требует дорогостоящей переработки.
3. Дорогостоящее оборудование: станки с ЧПУ стоят приблизительно от 1,5 млн до 40 млн рублей, а их обслуживание и настройка требуют квалифицированного персонала.
4. Длительная подготовка: настройка станка, включая выбор инструмента, программирование траекторий и фиксацию заготовки, может занять часы.
5. Энергозатраты: высокое потребление энергии, особенно при обработке твердых металлов, что увеличивает экологический след.

Сравнительный анализ

Сравнительный анализ аддитивных и субтрактивных технологий будет проведен путем сравнения их по некоторым важным критериям.

Точность и разрешение

Аддитивные технологии обеспечивают точность на уровне 10–200 микрон в зависимости от метода (например, SLA достигает 25 микрон, FDM — до 100–200 микрон). Однако пористость и необходимость постобработки могут снизить итоговую точность. Субтрактивные технологии, такие как фрезерование с ЧПУ, предлагают допуски до 1–5 микрон, что делает их предпочтительными для высокоточных деталей в аэрокосмической и медицинской отраслях.

Скорость производства

Аддитивные технологии медленнее для крупных деталей или больших партий: печать металлической детали на DMLS может занять 10-50 часов в зависимости от сложности. Субтрактивные технологии быстрее для серийного производства, особенно при использовании многоосевых станков, где обработка одной детали занимает 5-30 минут.

Стоимость

Стоимость аддитивных технологий значительно выше для оборудования, которое варьируется от 4 млн до 90 млн рублей в зависимости от типа принтера (например, промышленные металлические системы стоят ближе к верхней границе). Стоимость единицы продукции остается высокой для малых партий —

от 5000 до 30000 рублей за деталь, включая затраты на материалы (порошки и смолы по 4000-17000 рублей за кг) и постобработку. В эксплуатации добавляются расходы на энергию и обслуживание, что делает технологию оправданной только для прототипов или кастомных изделий. В отличие от этого, субтрактивные технологии имеют более доступное оборудование – от 1,5 млн до 40 млн рублей за станки с ЧПУ, с низкой стоимостью единицы продукции для больших партий (500-5000 рублей за деталь благодаря масштабированию). Материалы здесь дешевле (500-2000 рублей за кг для металлов и пластиков), но эксплуатация включает затраты на режущие инструменты, их замену и переработку отходов. В целом, аддитивные технологии экономичны для малых серий и сложных деталей, тогда как субтрактивные – для массового производства с минимальными затратами на единицу.

Возможность реализации сложной геометрии детали

Аддитивные технологии лучше в создании сложных форм, таких как решетчатые структуры или детали с внутренними каналами, благодаря отсутствию ограничений на доступность поверхности для инструмента. Субтрактивные технологии ограничены доступностью поверхности для режущего инструмента, что затрудняет обработку глубоких полостей или подвижных элементов.

Используемые материалы

Аддитивные технологии работают с пластиками (PLA, ABS, нейлон), смолами, металлами (титан, сталь), композитами, но выбор ограничен совместимостью с конкретным принтером. Субтрактивные технологии охватывают более широкий спектр материалов, включая твердые сплавы, композиты и древесину, что делает их универсальными для промышленных нужд.

Влияние на окружающую среду

Аддитивные технологии производят меньше отходов (5-10% материала), но энергозатраты на производство порошков и печать могут достигать 10-15 кВт·ч/кг, что увеличивает углеродный след. Субтрактивные технологии генерируют до 70-90% отходов в виде стружки, требующей переработки, и потребляют 5–20 кВт·ч/кг в зависимости от материала.

Аддитивные и субтрактивные технологии не являются прямыми конкурентами, а представляют собой взаимодополняющие подходы. Аддитивные технологии оптимальны для прототипирования, кастомизации и создания сложных деталей с минимальными отходами, тогда как субтрактивные технологии доминируют в массовом производстве и высокоточных применениях благодаря своей надежности и точности. В будущем можно ожидать развития гибридных систем, где аддитивные методы создают заготовки, а субтрактивные – обеспечивают финальную обработку. Прогнозируется снижение стоимости 3D-принтеров и расширение ассортимента материалов, что сделает аддитивные технологии более доступными, однако субтрактивные методы останутся ключевыми для серийного производства благодаря их зрелости, эффективности и точности.

Список литературы:

1. Аддитивные технологии и их возможности – Текст: электронный / URL: <https://trends.rbc.ru/trends/futurology/6284222d9a79472c8b9a67bc>
2. Замена традиционно обработанных деталей на 3D-печать – Текст: электронный / URL: <https://forgelabs.com/blog/ise-replacing-traditionally-machined-parts-3d-printing>
3. Развитие рынка аддитивных технологий в России – Текст: электронный / URL: <https://sber.pro/publication/kak-razvivaetsya-v-rossii-rinok-additivnih-tehnologii>
4. Какую роль играет 3D-печать в Формуле 1? – Текст: электронный / URL: <https://www.3dnatives.com/en/formula-1-turning-to-3d-printing-281020194>
5. Что такое поддержки в 3D-печати и для чего они нужны – Текст: электронный / URL: <https://www.ixbt.com/live/3d-modelling/chto-takoe-podderzhki-v-3d-pechat-i-dlya-chego-oni-nuzhny.html>
6. Понимание аддитивного производства и субтрактивного производства – Текст: электронный / URL: <https://blog.goldsupplier.com/ru/additive-manufacturing-vs-subtractive-manufacturing>
7. Аддитивное и субтрактивное производство: что выбрать? – Текст: электронный / URL: <https://www.stankoff.ru/blog/post/965>
8. Аддитивные технологии это – Текст: электронный / URL: <https://inner.su/articles/additivnye-tehnologii-eto>

Аннотация: В данной статье рассматриваются два вида технологий изготовления различных предметов: аддитивная и субтрактивная. Статья освещает ключевые принципы работы каждой технологии, их преимущества и недостатки. Также в статье производится сравнение этих технологий по разнообразным критериям.

Ключевые слова: аддитивные технологии, субтрактивные технологии, 3D-печать, ЧПУ-обработка, послойное добавление, фрезеровка, токарная обработка, прототипирование, точность, экологическое влияние, машиностроение, массовое производство.