

**УДК 621.7**

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 высокомоощного 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 остеоинтеграцию (процесс соединения кости с искусственным имплантом) [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 объеме 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. Ограниченная 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 шпиндели.
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 нескольким 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-pechati-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-tekhnologii-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.