

**Левина Варвара Александровна**, магистрант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, институт машиностроения, материалов и транспорта, г. Санкт-Петербург

Научный руководитель: **Шевчук Виктор Кириллович**, кандидат технических наук, доцент высшей школы физики и технологий материалов

## **АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ**

**Аннотация.** Статья "Аддитивные технологии в металлургии" рассматривает применение аддитивных методов производства в металлургической отрасли. Описываются преимущества, такие как сокращение времени на изготовление деталей, снижение отходов и возможность создания сложных геометрий. Также анализируются основные аддитивные технологии, такие как селективное лазерное спекание и 3D-печать. Обсуждаются актуальные исследования и примеры успешного внедрения аддитивных технологий в промышленность, а также вызовы и перспективы их развития в металлургии.

**Annotation.** The article "Additive Technologies in Metallurgy" examines the use of additive manufacturing methods in the metallurgical industry. Benefits such as reduced part production time, reduced waste, and the ability to create complex geometries are described. The main additive technologies such as selective laser sintering and 3D printing are also analyzed. Current research and examples of successful implementation of additive technologies in industry, as well as challenges and prospects for their development in metallurgy are discussed.

**Ключевые слова:** Аддитивные технологии; 3D-печать; материал; металлургия; технология; производство

**Key words:** Additive technologies; 3D printing; material; metallurgy  
Technology; production

**Введение**

В данной статье представлено исследование применения аддитивных методов в производстве металлических изделий, включая 3D-печать и порошковую металлургию. Анализ преимуществ и недостатков аддитивных технологий по сравнению с традиционными методами, а также их влияние на качество и свойства материалов. Обсуждение перспектив развития аддитивных технологий в металлургической отрасли.

## 1. Теоретические основы аддитивных технологий

### 1.1 Определение и классификация аддитивных технологий

Аддитивные технологии производства, также известные как 3D-печать, представляют собой методы создания объектов путем последовательного наложения слоев материала. Эти технологии становятся все более популярными благодаря своей способности сокращать время и затраты на производство, а также создавать сложные геометрии, которые трудно или невозможно получить традиционными методами.

- Классификация аддитивных технологий.
- 1. По типу материала:**
- Пластиковые: Используют термопласты (например, PLA, ABS).  
Применяются в FDM, SLA.
  - Металлические: Используют металлические порошки (например, сталь, титан).  
Применяются в SLS, DMLS.
  - Керамические: Используют керамические порошки или суспензии.  
Применяются в определенных SLA процессах.
  - Биоматериалы: Применяются для создания медицинских изделий и протезов. Часто используют специальные полимеры и клеточные структуры.
- 2. По технологии печати:**

- FDM (Fused Deposition Modeling): Экструзия нагретого пластика.
- SLA (Stereolithography): Затвердевание фотополимера с помощью лазера.
- SLS (Selective Laser Sintering): Спекание порошка с помощью лазера.
- DMLS (Direct Metal Laser Sintering): Лазерное спекание металлического порошка.
- LAMD (Laser Additive Manufacturing): Использование лазера для наплавки материала.

### **3. По количеству материалов:**

- Монофункциональные. Используют один материал для создания объекта.
- Мультиматериальные. Позволяют сочетать различные материалы в одном объекте, улучшая его функциональные характеристики.

### **4. По масштабу:**

- Микро- и наноаддитивные технологии. Применяются для создания очень мелких структур и деталей.
- Услуги по сооружению крупных объектов. Например, строительство зданий с помощью 3D-принтеров.

## **1.2 История развития аддитивных методов в металлургии**

Металлическое аддитивное производство берет свое начало в 1980-х годах, в ранние дни любого вида аддитивного производства. В 1987 году в коммерческий мир вошла пластиковая 3D-печать, известная как стереолитография. При стереолитографии УФ-свет использовался для затвердевания чувствительных к УФ-излучению жидких полимеров слой за слоем. Из этого процесса в 1992 году появилось селективное лазерное спекание (SLS), которое использует лазер для сплавления порошкообразных материалов в твердые тела по одному слою за раз. Именно в этот момент стало

возможным металлическое аддитивное производство, или металлическая 3D-печать.

Впервые появившись в 1990-х годах, металлическое аддитивное производство в основном использовалось только для прототипов. Это было связано с новизной технологии, которая не работала быстро или достаточно хорошо для крупномасштабного промышленного использования. Однако эта ранняя версия аддитивного производства позволяла относительно дешево и намного быстрее обычного прототипирования, что привело к появлению формы быстрого прототипирования, которая никогда ранее не встречалась.

Металлическое аддитивное производство продолжает развиваться и может работать с более широким спектром материалов, гораздо быстрее, чем раньше, и может производить объекты более высокого качества. Используется не только селективное лазерное спекание, но и струйная обработка металлического связующего, направленное энергетическое осаждение и ламинирование листов.

Современное аддитивное производство металлов имеет уникальные преимущества, которые помогли ему усовершенствоваться. Как и другие формы 3D-печати, 3D-печать металлов основана на компьютерных моделях, и принтеры будут точно следовать модели. Это означает, что возможно больше креативности с дизайнами, а также больше возможностей для создания дизайнов среди большего количества людей; вам не нужно уметь чертить вещи с аддитивным производством, вам просто нужен компьютер, правильные программы и некоторая практика в создании моделей 3D-печати.

### 1.3 Основные принципы 3D-печати и порошковой металлургии

Процесс 3D-печати металлами заключается в последовательном послойном сплавлении металлических порошков при помощи мощного излучения иттербиевого лазера. В индустрии используется несколько различных наименований одного и того же процесса, в том числе селективное лазерное плавление (SLM).

Металл для аддитивных установок выпускается в виде мелкодисперсных сферических гранул с величиной зерна от 4 до 80 микрон. Этот показатель определяет толщину объекта, который будет выращен в аддитивной установке. При создании порошка задается **величина и состав зерна**, так как необходимо соблюсти определенное процентное соотношение крупных и мелких зерен. Таким образом определяется текучесть металла, проверяемая с помощью прибора Холла (воронки с калиброванным отверстием). Если у зерна будет слишком мелкая фракция, металл не будет течь через воронку и, соответственно, плохо подаваться на стол построения, а это напрямую влияет на равномерность получаемых слоев и качество выращиваемого изделия.

Разным металлам требуется разная **термообработка**, и иногда для этого используются специально подогреваемые платформы. В процессе построения, при плавлении металла, вырабатывается большое количество тепла, которое нужно отводить. Роль радиаторов, отводящих тепло, выполняют поддержки, применяемые при построении изделий. В некоторых случаях сама деталь без поддержек приваривается к рабочему столу, как к радиатору.

## **2. Анализ применения аддитивных технологий в производстве**

### **2.1 Методы 3D-печати в металлургии**

Основные методы аддитивного производства включают стереолитографию (SLA), селективное лазерное спекание (SLS) и FDM (моделирование наплавляемым пластиком). Каждый из этих методов имеет свои преимущества и применяется в различных отраслях, таких как автомобилестроение, медицина и аэрокосмическая промышленность.

Стереолитография (SLA) - это процесс аддитивного производства, результат в котором достигается по средствам полимеризации смолы. В SLA печати, объект создается путем селективного отверждения полимерной

смолы, слой за слоем, с использованием ультрафиолетового (УФ) лазерного луча. Материалы, используемые в SLA печати, представляют собой светочувствительные термореактивные полимеры, которые выпускаются в жидкой форме.

FDM (Fused Deposition Modeling, или моделирование методом послойного наплавления) — самый простой и распространенный метод. Фактически FDM-принтер является термоклеевым пистолетом, которым управляет робот. Через горячее сопло проталкивается пластиковый пруток, он плавится и укладывается слоями. FDM используется в «Норникеле» для быстрой замены небольших и некритичных деталей.

SLM (Selective Laser Melting, или выборочная лазерная плавка) — печать непосредственно металлом с помощью лазерного спекания. Камера 3D-принтера заполняется инертным газом, например аргоном, чтобы минимизировать окисление металлического порошка, а затем нагревается до оптимальной температуры. Металлический порошок распределяется по платформе. Затем мощный лазер проходит по заранее заданной траектории, спекает вместе металлические частицы и создает слой. Платформа опускается, и формируется новый слой. Процесс повторяется до готовности детали.

## 2.2 Порошковая металлургия: технологии и процессы

Изготовление деталей из порошкообразного материала состоит из 3 главных этапов: подготовка смеси, прессование и спекание. В зависимости от требуемого результата и вида материала технологии серьезно различаются. Рассмотрим более подробно все процессы и их разновидности.

### **Подготовка смеси.**

Порошок, поступающий на производство, почти всегда требует доработки. Например, железный порошок подвергается предварительному отжигу в печи с целью восстановления оксидов и удаления нежелательных примесей. Процесс заключается в нагреве состава до 0,5 температуры



В зависимости от необходимой структуры изделия на порошок производят деформирующие усилия, происходит частичное слипание компонентов.

Процесс имеет некоторые нюансы:

Давление прикладывается в вертикальном направлении, поэтому внутреннее напряжение в смеси распространяется неравномерно. Эту проблему решают введением пластификаторов, которые улучшают скольжение между зернами порошка. На более сложном оборудовании производят обжим по нескольким направлениям.

Структура спрессованного материала может значительно отличаться в середине изделия, в плоскостях касания с матрицей и в зонах, на которые воздействуют пуансоны. Недостаток нивелируется подбором порошков с нужными формами частиц и пластификаторами.

Иногда применяют двухэтапное прессование с предварительным уплотнением состава на всю глубину.

Режимы пресса настраивают под требуемый результат, так как иногда необходимо создать максимально плотную или пористую структуру.

По некоторым технологиям достаточно спрессовать исходную смесь без спекания. Частицы соединяются за счет диффузии. Для достижения высоких давлений применяют взрывное, электрогидравлическое (эффект увеличения объема при пропускании электрического разряда) формование. Экструзию применяют для изготовления длинномерных заготовок, например, алюминиевых труб.

### **Спекание.**

Операция необходима для укрепления внутренних связей между частицами.

Можно выделить два типа спекания:

Когда применяется температура, достаточная для размягчения легкоплавкого компонента. Этот элемент равномерно распределяется между тугоплавкими частицами, «склеивая» весь объем в единое целое.

Когда все компоненты смеси становятся пластичными. Происходит частичная деформация всех зерен и взаимное диффузионное проникновение между ними. Здесь применяются режимы от 0,75 температуры плавления.

После температурной обработки деталь чаще всего уменьшается в размере. Этот фактор также необходимо учитывать. Если плотность исходной заготовки была неравномерной, то и усадка будет отличаться на разных участках.

Нагрев приводит к появлению оксидной пленки, поэтому при спекании используют контролируемую газовую среду.

На выбор режимов спекания влияют физические и химические характеристики порошка и требования по конечной структуре изделия. Поэтому температурный режим и время воздействия выбирают индивидуально под каждый технологический процесс.

В большинстве случаев после спекания изделие готово к использованию. Но иногда требуется дальнейшая доработка механическим способом или обработка химическими реагентами.

Сфера применения порошков разных металлов постоянно расширяется, так как технологии позволяют значительно сократить трудозатратность и энергоемкость процессов изготовления сложных деталей. Такими методами можно добиться уникальных свойств материала. Новым течением в порошковой металлургии стала объемная печать. Это позволяет быстро менять ассортимент выпускаемой продукции с разнообразной формой и делает мелкосерийное производство рентабельным.

### 2.3 Примеры успешных применений аддитивных технологий в промышленности

Аддитивные технологии находят применение в отраслях:

Медицина: Создание на заказ имплантатов и протезов, планирование сложных операций.

Авиация: Производство лёгких и прочных деталей для самолётов.

Автомобилестроение: Изготовление деталей с высокой точностью.

Космическая промышленность: Производство компонентов для космических аппаратов, которые должны быть легкими и прочными. Использование 3D-печати позволяет изготавливать детали непосредственно в космосе, что значительно снижает затраты на запуск.

Мода: Использование 3D-печати для создания уникальных и сложных аксессуаров, элементов одежды и обуви, что позволяет дизайнерам экспериментировать с новыми формами и структурами, недоступными традиционными методами.

Строительство: Печать строительных элементов, таких как бетонные конструкции, панели и декоративные элементы, что ускоряет процесс строительства, снижает затраты и открывает новые возможности для архитектурных решений.

Ювелирное дело: Создание сложных и уникальных ювелирных изделий с высокой степенью детализации, что позволяет создавать изделия с меньшими затратами и быстрее.

Промышленное производство:

- Прототипирование: Быстрое создание прототипов новых изделий для тестирования и проверки, что позволяет ускорить процесс разработки и снизить затраты на производство.
- Мелкосерийное производство: Изготовление небольших партий деталей и компонентов, что особенно полезно для малых и средних предприятий, позволяя им выпускать продукцию по мере необходимости.
- Инструментальная оснастка: Производство пресс-форм, штампов и других инструментов для массового производства, что сокращает время и затраты на

их

изготовление.

- Запасные части и ремонт: Быстрое производство запчастей для ремонта и обслуживания оборудования, что сокращает время простоя и повышает эффективность производственных процессов.

Образование и научные исследования: Использование 3D-принтеров для создания учебных пособий, моделей и прототипов для исследований.

Электроника: Производство корпусов и компонентов для электроники, что позволяет создавать более компактные и функциональные устройства.

Киноиндустрия и анимация: Создание реквизита, костюмов и моделей для фильмов и анимационных проектов, что упрощает процесс производства и снижает затраты.

### **3. Сравнительный анализ: аддитивные технологии и традиционные методы**

#### **3.1 Преимущества аддитивных технологий**

Аддитивные технологии имеют множество преимуществ, такие как:

- **Сложная геометрия:** Возможность создания деталей с высокой степенью сложности, которые невозможно или трудно произвести традиционными методами.
- **Минимальные отходы:** Основной принцип аддитивных технологий заключается в добавлении материала, что значительно снижает количество отходов по сравнению с традиционной субтрактивной обработкой.
- **Индивидуализация:** Упрощение процесса создания индивидуализированных и кастомизированных изделий для клиентов, включая протезы и специализированные компоненты.
- **Скорость прототипирования:** Быстрое получение прототипов позволяет ускорить процесс разработки продукта и тестирования.

- Легкость в производстве малых партий: Эффективно подходит для производства небольших серий изделий, снижая затраты на производство пресс-форм и оснастки.
- Материаловедение: Широкий выбор используемых материалов, включая пластики, металлы и биоматериалы, расширяет возможности применения.
- Локальное производство: Возможность производства изделий на месте, что снижает затраты на транспортировку и сокращает сроки поставки.
- Оптимизация конструкции: Возможность создавать более легкие, но прочные конструкции за счёт использования топологической оптимизации.

Эти преимущества делают аддитивные технологии привлекательными как для крупных промышленных предприятий, так и для малых бизнесов и стартапов.

### 3.2 Недостатки и ограничения аддитивных методов

Несмотря на свои преимущества, аддитивные технологии имеют и ряд недостатков и ограничений:

1. Скорость производства: Для массового производства аддитивные методы могут быть медленнее традиционных подходов, таких как литье или фрезеровка.
2. Качество поверхности: Детали, полученные с помощью аддитивных технологий, могут требовать дополнительной обработки для достижения необходимого качества поверхности.
3. Ограничения по размеру: Размеры объектов, которые можно создать, ограничены рабочими размерами 3D-принтеров, что может быть недостатком для решения некоторых задач.

4. Требования к материалам: Не все материалы подходят для аддитивной печати. Некоторые из них могут иметь ограниченные механические свойства или стабильность под воздействием внешних факторов.

5. Стоимости оборудования: Актуальные 3D-принтеры и сопутствующее оборудование могут быть дорогостоящими, особенно в случае профессиональных технологий.

6. Сложность в контроле качества: Проверка качества и мониторинг процессов печати могут быть более сложными по сравнению с традиционными методами.

7. Подбор параметров печати: Необходимость тщательной настройки параметров печати (температуры, скорости, густоты и т.д.) для достижения оптимального результата требует времени и экспертизы.

8. Нормативные и сертификационные барьеры: Для некоторых приложений (например, в аэрокосмической или медицинской отраслях) требуется строгая сертификация, что может усложнять внедрение аддитивных технологий.

Эти недостатки следует учитывать при выборе метода производства, особенно для критически важных приложений.

#### **4. Перспективы и будущее аддитивных технологий в металлургии**

##### **4.1 Тенденции развития аддитивных технологий**

За последние десятилетия аддитивное производство или 3D-печать, произвело революцию в промышленности. Аддитивные технологии стали незаменимым инструментом промышленного производства. Благодаря непрерывным инновациям, аддитивные технологии внедряют новые

стандарты для гибкости проектирования, повышения эффективности производства и использования материалов.

Расширение промышленной 3D-печати означает, что производители могут использовать высокопроизводительные материалы, такие как титан, высокопрочные полимеры и композиты. Эта возможность позволяет компаниям проектировать детали с оптимизированной геометрией, снижая вес и улучшая производительность, что особенно ценно в таких секторах, как аэрокосмическая и автомобильная промышленность.

Рост мультиматериальной 3D-печати позволяет производителям изготавливать детали, которые сочетают в себе различные материалы с различными свойствами, такими как гибкость и жесткость, в рамках одной сборки. Например, мультиматериальная печать может создавать медицинские устройства, которым требуются как жесткие, так и мягкие секции для лучшей функциональности. Благодаря достижениям в области технологий печатающих головок и материаловедения производители теперь могут проектировать детали, отвечающие сложным требованиям и работающие лучше в конкретных областях применения.

Интеграция ИИ и машинного обучения выводит аддитивное производство на новый уровень развития. Алгоритмы ИИ оптимизируют процесс печати, отслеживают качество в процессе производства и прогнозируют сбои до их возникновения. Это приводит к улучшению качества печати, сокращению отходов материала и повышению надежности производственных процессов.

Машинное обучение улучшает дизайн, анализируя данные прошлых проектов, чтобы предлагать изменения, которые повышают технологичность. Корректировки на основе ИИ могут сократить время производства и повысить общую эффективность процесса печати.

Благодаря этим возможностям производители могут добиться лучших результатов, минимизируя при этом риски, связанные со сложными задачами печати.

Крупногабаритная 3D-печать становится все более распространенной, поскольку производители стремятся производить более крупные компоненты или несколько деталей за один тираж. Эта возможность особенно важна для таких отраслей, как строительство и аэрокосмическая промышленность, где наиболее значительная потребность в крупных и сложных деталях. Последние разработки в сфере аддитивных технологий позволили крупногабаритным 3D-принтерам эффективно создавать более прочные и высококачественные детали. Эта тенденция экономит время и затраты, связанные со сборкой более мелких деталей, и открывает новые возможности для изготовления конструкций и инструментов, которые ранее было невозможно напечатать цельными.

### **Заключение**

В заключение, аддитивные технологии представляют собой будущее производства, предоставляя возможности для инноваций и оптимизации процессов в различных отраслях. С развитием технологий и увеличением доступности оборудования, можно ожидать, что их применение будет только расти.

### **Список литературы:**

Шишковский, И. В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения. — Спб. : Питер, 2016. — 400 с.

Слюсар, В. И. Фаббер-технологии : Новое средство трехмерного моделирования : [арх. 21 сентября 2018] // Электроника : журн. — 2003.

Токарев Борис Евгеньевич. Анализ рынка 3D-принтеров: состояние и перспективы // Практический маркетинг. — 2014. — Вып. 3 (205).

Additive manufacturing — General principles — Part 1: Terminology. - International Organization for Standardization

Григорьев, С. Н. Перспективы развития инновационного аддитивного производства в России и за рубежом / С. Н. Григорьев, И. Ю. Смуров // Инновации : журн. — 2013.

***References:***

Shishkovsky, I. V. Fundamentals of high-resolution additive technologies. - St. Petersburg: Piter, 2016. - 400 p.

Slyusar, V. I. Fabber technologies: New means of three-dimensional modeling: [archive. September 21, 2018] // Electronics: journal. - 2003.

Tokarev Boris Evgenievich. Analysis of the 3D printer market: status and prospects // Practical Marketing. - 2014. - Issue 3 (205).

Additive manufacturing — General principles — Part 1: Terminology. - International Organization for Standardization

Grigoriev, S. N. Prospects for the development of innovative additive manufacturing in Russia and abroad / S. N. Grigoriev, I. Yu. Smurov // Innovations: journal. - 2013.