

Еременко Максим Сергеевич, магистрант,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕЧАТИ И МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ БЮДЖЕТНОГО 3D-ПРИНТЕРА ЛИТЬЕВЫХ ФОРМ

Аннотация. Работа рассматривает выбор технологии для бюджетного 3D-принтера литейных форм. Сравнены методы SLS/SLM, SLA/DLP, экструзия и Binder Jetting. Оптимальным признан Binder Jetting по точности и цене. Разобраны свойства кварцевого песка и оксидных порошков. Показана эффективность неорганических силикатных связующих.

Ключевые слова: Аддитивные технологии, binder jetting, литейные формы, выбор материалов, бюджетный 3D-принтер, кварцевый песок.

Введение. Развитие технологий аддитивного производства открывает новые возможности для изготовления литейных форм без длительной и затратной оснастки.

Однако выбор конкретной технологии печати и материалов становится ключевым вопросом при проектировании бюджетного 3D-принтера для производства керамических литейных форм.

Технологии порошкового плавления (SLS/SLM), фотополимеризация (SLA/DLP), экструзия густых паст и струйное нанесение связующего (Binder Jetting) предлагают разные уровни точности, производительности и стоимости.

Материалы для форм – от кварцевого песка до циркониевой пыли – имеют различную термостойкость, газопроницаемость и цену.

Цель данной статьи – систематизировать факторы выбора технологии и материалов для бюджетного принтера, опираясь на данные диссертационной работы по разработке оборудования для изготовления литейных форм, и обосновать оптимальный вариант.

1. Критерии выбора технологии печати для бюджетного принтера

При сравнении аддитивных технологий для литейных форм учитываются стоимость оборудования, скорость печати, точность изготовления и сложность внедрения.

Порошковое плавление (SLS/SLM) обеспечивает высокую прочность деталей, но требует мощных лазеров и камер с инертным газом; стоимость промышленных установок достигает десятков миллионов рублей, а производительность ограничена небольшим рабочим объёмом.

Фотополимеризация (SLA/DLP) характеризуется высокой точностью – шероховатость может быть 5-10 мкм – и позволяет изготавливать восковки и пластиковые модели, но не подходит для керамических форм из-за отсутствия дешёвых жаростойких фотополимеров.

Экструзия густых паст привлекательна низкой стоимостью оборудования (0,4–8 млн руб.) и простотой узлов, но ограничена низкой скоростью (толщина слоя 0,1–0,5 мм) и высоким процентом брака (10–30 %) при нарушении реологии пасты.

Технология струйного нанесения связующего (Binder Jetting) основана на распределении порошкового слоя и выборочном нанесении капель связующего печатающей головкой.

Она обеспечивает толщину слоя 30-200 мкм, разрешение 30-100 мкм и производительность до 10000 см³/ч, при этом не требуется высокая температура в процессе печати, что позволяет использовать недорогие головки и простой механизм.

Промышленные установки Binder Jetting стоят 20-120 млн руб., но на основе стандартных компонентов возможно создание более бюджетных вариантов.

Сравнение показывает, что для бюджетного принтера наиболее перспективна технология Binder Jetting, так как она сочетает приемлемую точность, высокую производительность и возможность построения оборудования на недорогих узлах.



2. Требования к материалам и выбор порошков для бюджетного принтера

При выборе материалов для литейных форм необходимо учитывать термостойкость, газопроницаемость, прочность и доступность.

Кварцевый песок остаётся самым доступным материалом: его цена невысока, а термостойкость до 1450 °С позволяет использовать его для отливки цветных сплавов.

Оксид алюминия и циркониевая пыль обеспечивают жаростойкость до 1700-2700 °С, необходимую для железных и стальных сплавов, но стоимость таких порошков в десятки раз выше.

Размер частиц влияет на точность: фракция около 100 мкм обеспечивает удовлетворительное качество, а уменьшение до 20-50 мкм увеличивает стоимость порошка в 2-5 раз.

Газопроницаемость формы должна быть 100-200 ед., чтобы гарантировать отвод газов при заливке; для достижения таких значений оптимально соотношение связующего 2-3 % по массе.

Связующие на основе силикатов натрия и калия после контакта с CO₂ образуют аморфный гель, создающий прочную сетку; применение неорганических связующих удобно для Binder Jetting, поскольку позволяет использовать стандартные печатающие головки и перистальтические насосы.

Экономически выгодным сочетанием для бюджетного принтера является использование кварцевого песка с неорганическим силикатным связующим: такая смесь обеспечивает достаточную прочность (1-4 МПа после сушки) и газопроницаемость, а стоимость порошка составляет порядка 800 руб. за 50 кг.

Использование более дорогих порошков целесообразно только при необходимости литья стали и чугуна в условиях мелкосерийного производства.

3. Экономический анализ и влияние рынка

Рост мирового рынка аддитивных технологий составляет 15-25 % в год; сегмент Binder Jetting для литейных форм занимает около 13 % и оценивается в сотни миллионов долларов.

В России аддитивные технологии в литейной отрасли развиваются медленно: рынок 2023 года составил 38,5 млрд руб., прогноз роста до 154,5 млрд руб. к 2030 году (20,5 % в год).

Высокая стоимость импортных установок и материалов, а также слабое сервисное обслуживание являются серьёзными барьерами для отечественных предприятий.

Экструзия привлекает низкой ценой оборудования, но не обеспечивает требуемой точности, поэтому предприятия вынуждены обращаться к дорогостоящим иностранным установкам Binder Jetting.

Разработка бюджетных принтеров на отечественных компонентах может снизить стоимость оборудования в несколько раз и укрепить технологическую независимость.

При выборе материалов экономический фактор является решающим: стоимость кварцевого порошка и неорганического связующего составляет лишь 20-40 % себестоимости формы, в то время как использование циркониевых и алюмооксидных порошков повышает эту долю до 60 %.

Рынок требует универсального решения, позволяющего производить формы для различных сплавов при минимальных капитальных затратах.

4. Обоснование выбора технологии и материалов

На основании анализа критериев выбор падает на технологию Binder Jetting с использованием кварцевого песка и неорганического силикатного связующего.

Этот вариант сочетает приемлемые затраты на оборудование и материалы, достаточную точность (0,1-0,3 мм), высокую скорость печати (100-400 л смеси в час) и возможность широкого внедрения.



В конструкции бюджетного принтера рекомендуется использовать порталную кинематику с перемещением печатающей головки по осям X и Y и подачей платформы по оси Z.

Подача связующего реализуется перистальтическими насосами, что удешевляет систему и обеспечивает стабильный расход; печатающая головка может быть стандартной струйной, используемой в широкоформатных принтерах.

Отверждение смеси осуществляется подачей CO₂, а сушка – в отдельной камере при температуре около 120 °С.

Такая конфигурация позволяет собирать установку из доступных компонентов и при этом обеспечить необходимое качество форм.

Использование кварцевого песка ограничивает применение принтера отливками из цветных металлов, однако для расширения номенклатуры возможно замена порошка на оксид алюминия или циркониевую пыль при сохранении той же схемы подачи и отверждения.

Заключение. Выбор технологии печати и материалов для бюджетного 3D-принтера определяется компромиссом между точностью, производительностью и стоимостью.

Анализ существующих методов показал, что технология Binder Jetting является оптимальным решением для изготовления керамических литейных форм, так как обеспечивает высокую скорость печати и точность при сравнительно низких требованиях к оборудованию.

Кварцевый песок в сочетании с неорганическим силикатным связующим обеспечивает достаточную термостойкость, газопроницаемость и прочность формы при низких затратах, что делает этот материал предпочтительным для бюджетных установок.

Реализация принтера на основе порталной кинематики и стандартных компонентов, включая струйную печатающую головку и перистальтические насосы, позволяет существенно снизить стоимость оборудования без ухудшения качества.

Результаты диссертационного исследования подтверждают, что предложенный выбор технологии и материалов позволяет создавать литейные формы с точностью до 0,3 мм и прочностью 1-4 МПа, а также обеспечивает экономическую эффективность для мелкосерийного производства.

Список литературы:

1. Гибсон И., Розен Д., Стакер Б. Аддитивные технологии: быстрый прототипинг и прямое цифровое производство. – М.: Техносфера, 2016. – 656 с.
2. Чуа Ч.К., Леонг К.Ф., Лим К.С. Rapid Prototyping: Principles and Applications. – Singapore: World Scientific, 2010. – 512 p.
3. Гуляев А.П. Литейные процессы. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
4. Campbell J. Complete Casting Handbook. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015. – 978 p.
5. Wohlers T. Wohlers Report 2023: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry. – Fort Collins: Wohlers Associates, 2023.
6. ASTM F2792-12a. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. – ASTM International, 2012.
7. Fraunhofer Institute. Additive Manufacturing Technologies Overview [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fraunhofer.de> (дата обращения: 20.03.2026).

