

Разработка установки для 3D-печати металлом на основе метода послойного наплавления

© П.В. Круглов, А.О. Вовняков, Д.Д. Смирнов,
А.А. Михайлов, А.Л. Галиновский

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Статья посвящена разработке технологии 3D-печати металлических изделий на основе метода послойного наплавления FDM (Fused Deposition Modelling). Приведены результаты создания и апробации макета установки на базе экструзионной системы для работы с металлической проволокой. На основе термодинамического расчета, учитывающего мощность теплового потока и соответствующие тепловые потери, спроектирован специализированный нагревательный блок, способный перевести алюминиевый сплав в виде проволоки в жидкую фазу. Конструкция установки реализована путем модернизации бытового FDM-принтера: установлен высокотемпературный экструдер, система контроля температуры и термостойкая платформа. Проведенные натурные эксперименты с проволокой из алюминиевого сплава подтвердили принципиальную возможность экструзии жидкого металла и формирования детали слой за слоем. Для дальнейшего развития технологии предложены ключевые направления совершенствования, включающие организацию печати в защитной газовой среде и обеспечение равномерного теплового режима в зоне построения. Работа демонстрирует потенциал метода FDM для создания аддитивных систем печати металлом.

Ключевые слова: аддитивные технологии, послойное наплавление, 3D-печать металлом, экструзия металла

Введение. Для повышения эффективности производства ракетно-космической техники на предприятиях отрасли внедряются новые технологические методы. Одним из перспективных направлений в области заготовительного производства являются аддитивные технологии, основанные на 3D-печати металлами и неметаллами сложных конструкций [1]. Существенное преимущество данных технологий заключается, как правило, в меньшей трудоемкости при изготовлении деталей сложной формы [2]. Применение данного метода для изделий ракетно-космической техники позволяет конструкторам сократить число деталей и сборочных единиц в конструкции, а также снизить общую массу изделия за счет создания равнонапряженных конструкций и меньшего числа соединений [3]. Практический опыт внедрения установок по 3D-печати металлом в отрасли показывает, что их используют как для задач прототипирования и создания макетов, так и для серийных топологически-оптимизированных конструкций отдельных деталей и узлов.

В настоящее время аддитивные технологии развиваются по нескольким направлениям. Наиболее известным является селективное лазерное плавление (SLM) — метод, который основан на послойном

плавлении порошка фокусированным лазерным излучением [4, 5]. Детали получают в среде защитного газа, для чего требуется однородность и высокое качество порошка, а также соблюдение технологических режимов на всех этапах процесса. Ограничениями для данного метода являются небольшие габаритные размеры получаемых деталей, наличие остаточных напряжений в конструкции, определенная пористость материала детали, необходимость последующей обработки ряда поверхностей детали для снижения уровня шероховатости [6]. Данная технология получила развитие и применяется в многолучевых системах, а также при прямом лазерном спекании [7, 8].

Для создания крупногабаритных конструкций созданы установки на основе проволоочно-дугового аддитивного метода (WAAM). Данный метод основан на плавлении проволоки, подаваемой в зону сварки. Благодаря взаимному перемещению подложки и сварочного манипулятора формируется конструкция детали [9]. Ограничением данного метода является необходимость создания защитной атмосферы или вакуума, а также высокая шероховатость поверхности детали, в связи с чем требуется дополнительная обработка стыковочных поверхностей. Еще одним методом является метод электронно-лучевой плавки порошка (EBM), который основан на применении электронного луча, направленного в зону плавки [10]. Метод требует вакуумирования рабочей зоны установки и имеет ограничения по размерам детали.

В случаях применения вышеперечисленных методов предполагаются использование дорогостоящего оборудования, специальная подготовка исходных материалов, что приводит к повышению стоимости деталей, получаемых данными методами. Таким образом, снижение себестоимости деталей, изготовленных с помощью аддитивных технологий, является актуальной задачей для современной ракетно-космической отрасли. В данной статье для решения этой задачи предлагается создание технологической установки для 3D-печати металлической проволокой на базе более распространенных и менее дорогих принтеров и их компонентов для печати полимерами.

За основу был принят метод послойного наплавления (FDM — Fused Deposition Modelling), который сейчас широко используется для получения деталей из пластика [11, 12]. В качестве исходных материалов на современных установках используют полиактид, нейлон, поликарбонат и др. Установки для печати полимерной проволокой характеризуются невысокой стоимостью (от 30 до 150 тыс. руб. за установку [13]), а также низкой себестоимостью получаемых деталей — до 2–3 руб. за 1 см³ детали (при печати металлом себестоимость детали составляет 450–1100 руб. за 1 см³ [14]).

Несмотря на относительную простоту конструкции FDM-принтера, для печати металлом их не используют, поскольку отдельные компоненты принтера — экструдеры, нагреватели — не рассчитаны

на температуры плавления металлов. В основе технологии лежит метод экструзии, при котором проволока исходного материала нагревается до температуры, близкой к температуре плавления, и проталкивается через сопло. Управляя температурой, подачей проволоки, а также перемещая сопло относительно подложки, можно сформировать трехмерную структуру детали. При первом проходе слой расплавленной проволоки оседает на подложке, для формирования последующих слоев подложка опускается (или поднимается сопло) на величину шага по толщине детали. Таким образом, путем послойного наплавления заданного числа слоев, определяемого цифровой моделью детали, создается тело детали. В промышленных и бытовых принтерах, использующих такую технологию, в качестве проволоки применяют полимеры различного состава. Авторами данной работы была проведена модернизация бытового принтера, печатающего пластиком, путем замены ряда компонентов для печати металлом. В качестве исходного материала использовался алюминиевый сплав АК5 в виде проволоки диаметром 1,5 мм. В данной работе представлены основные характеристики созданного макета установки для печати проволокой из металла, а также результаты исследований, направленных на изучение технологических особенностей, возможностей метода, выявление ограничений, а также перспектив его развития.

Теплофизические характеристики метода послойного наплавления. Для нагрева проволоки до температуры плавления в конструкции установки должен быть использован нагревательный элемент. При определении его теплофизических характеристик и размеров требуется рассчитать потребное количество теплоты для перевода материала проволоки в жидкую фазу. В проведенном расчете применена модель конвективного теплообмена, в которой учитываются свойства материала нагревателя, степень черноты поверхности, целевая и начальная температуры, габаритные размеры, а также другие параметры. В качестве исходных данных были приняты следующие значения: начальная температура среды 22 °С, материал проволоки — алюминиевый сплав марки АК5, температура нагрева проволоки 700 °С (учитывая температуру плавления около 660 °С), материал корпуса нагревательного блока — прокат в виде квадрата из стали 45, степень черноты поверхности 0,8, потребляемая мощность отдельных нагревательных элементов 80 Вт, габаритные размеры нагревательных элементов — диаметр 6 мм, длина 20 мм.

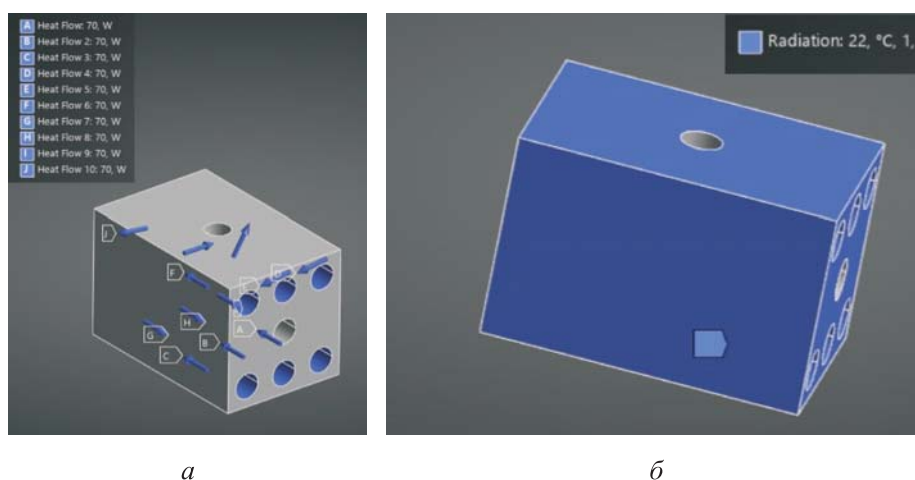
Разработка и изготовление конструкции. Методом последовательных приближений, путем изменения значений полной мощности нагревательного блока, габаритных размеров блока (расчеты проводились в программе для ЭВМ [15], разработанной ранее авторами и учитывающей конвективный теплообмен), были получены требуемые проектные параметры нагревательного блока (рис. 1):

Длина, мм	44
Ширина, мм	30
Высота, мм	30
Количество нагревателей, шт.	12
Полная мощность, Вт	840
Полезная мощность, Вт	512,7
Мощность теплопотерь, Вт	327,3



Рис. 1. 3D-модель нагревательного блока

Расчет, выполненный в программе [15], основан на вычислении теплопотерь на излучение, происходящих при конвективном теплообмене. Аналитический расчет параметров нагревательного блока был верифицирован с помощью численного моделирования теплового процесса в специальном программном комплексе. Моделирование проводилось в расчетном модуле нестационарного теплового анализа. Начальные условия для расчета были приняты следующими: тепловая мощность, выделяемая керамическими нагревателями, задается как тепловой поток (режим Heat Flow) на внутренней поверхности нагревательного блока (рис. 2, а); тепловое излучение (режим Radiation) от наружной поверхности блока (рис. 2, б).



а

б

Рис. 2. Начальные условия расчета:
а — режим Heat Flow; б — режим Radiation

В результате расчетов получено, что равновесная температура нагревательного блока составляет 820 °С, это позволяет проволоке, расположенной во внутреннем канале нагревательного блока, нагреться выше температуры плавления (660 °С) и перейти в жидкую фазу (рис. 3).

Корпус нагревательного блока изготовлен из стали 45, в нем установлены керамические нагреватели для бытовых принтеров мощностью 80 Вт в количестве 6 шт. (рис. 4, а), биметаллический сопловой блок Unicorn K2 для подачи проволоки по его внутреннему каналу (рис. 4, б), термопары К-типа для текущего контроля температуры блока (рис. 4, в).

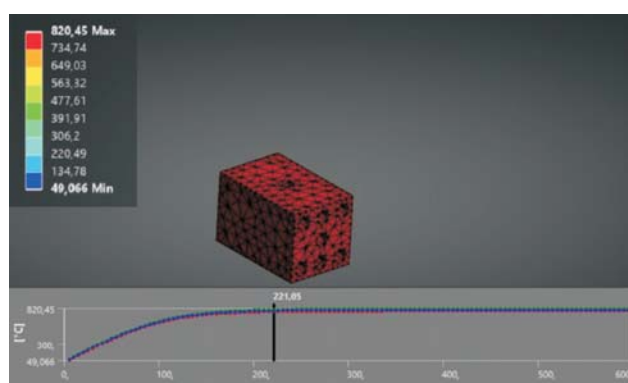


Рис. 3. Моделирование теплового процесса в программе



Рис. 4. Компоненты нагревательного блока:

а — керамические нагреватели; б — биметаллический сопловой блок Unicorn K2;
в — термопара К-типа

Нагревательный блок в сборе представлен на рис. 5. Для обеспечения работы нагревательного блока, достижения заданной температуры, а также для текущего контроля мощности используют следующие электрические и электронные компоненты: блок питания (рис. 6, а), реле постоянного тока (рис. 6, б) и терморегулятор Rex C-100 (рис. 6, в).



Рис. 5. Нагревательный блок в собранном виде



Рис. 6. Электрические и электронные компоненты нагревательного блока:
а — блок питания; б — реле постоянного тока; в — терморегулятор

В установке предусмотрен механизм подачи проволоки — экструдер марки BIQU H2O с водяным охлаждением. Данное устройство может выдерживать температуру до 500 °С, его корпус и отдельные детали выполнены из стали. В конструкцию экструдера был внесен ряд изменений: вместо соплового блока был установлен нагревательный блок (рис. 7, а), пластиковая крышка была заменена на алюминиевую (рис. 7, б), а также к приводу подачи проволоки было подведено дополнительное охлаждение (рис. 7, в).

В качестве основы для установки был использован бытовой принтер для печати пластиком Flying Bear S1 (рис. 8).

Платформа для размещения детали была дополнена специальной термостойкой плитой из силиката кальция, приклеенной на основание для формирования первичного слоя жидкого металла. Плита из силиката кальция выдерживает температуру до 1600 °С, а при ее достижении карбонизируется и не воспламеняется [16]. Предварительное тестирование на термостойкость данной плиты прошло успешно (рис. 9). Было подтверждено, что ее можно использовать при максимальной мощности нагревательного блока, сама плита при этом не подвергается нагреву до критических для данного материала температур.

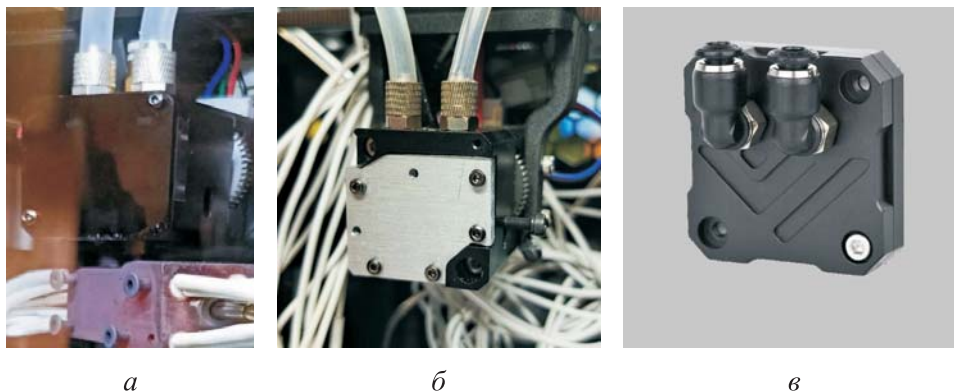


Рис. 7. Экструдер BIQU H2O с водяным охлаждением:

а — соединение экструдера с нагревательным блоком; *б* — крышка экструдера;
в — модуль системы охлаждения привода



Рис. 8. Принтер Flying Bear S1
с экструдером и нагревательным блоком



Рис. 9. Тестирование теплостойкости
стола принтера Flying Bear S1

Проведение экспериментов. В ходе предварительных экспериментов была проведена проверка работоспособности установки, а также ее выбранных параметров, полученных при расчетах с использованием программы для ЭВМ [15]. На основе результатов экспериментов построена эмпирическая зависимость температуры от времени при максимальной мощности нагревательного блока (рис. 10). Данная зависимость подтвердила верность выбора параметров модели естественного конвективного теплообмена, а замедление нагрева при увеличении температуры указывает на большие тепловые потери на излучение. Анализируя график на рис. 10, можно заметить, что до температуры 600 °С зависимость практически линейна, после чего возрастание температуры становится нелинейным, а после значения 820 °С температура перестает повышаться. Представленная закономерность

позволяет определить время нагрева установки и выхода на максимальный режим (рис. 11), что дает возможность рассчитывать вспомогательное время технологической операции. Согласно графику, минимальное время нагрева до температуры 820 °С составляет 10 мин, эту величину можно использовать для нормирования времени технологической операции.

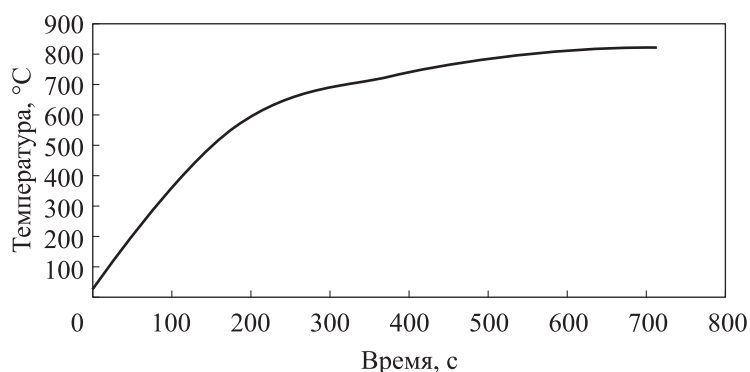


Рис. 10. Изменение температуры от времени при максимальной мощности нагревательного блока

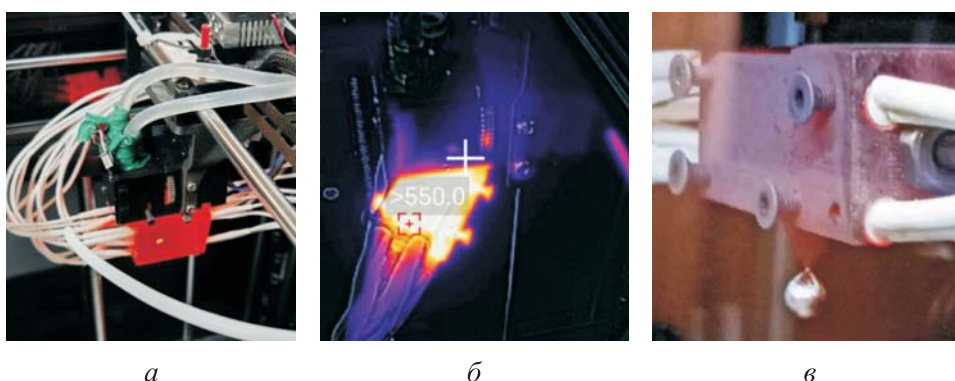


Рис. 11. Испытания системы:

а — нагрев блока; *б* — инфракрасная термометрия процесса;
в — выход жидкого металла из сопла

Эксперимент с алюминиевой проволокой марки АК5 толщиной 1,5 мм (см. рис. 11, рис. 12) показал, что при значении температуры 820 °С (по показаниям установленной термопары) удалось получить течение металла в виде тонкой струи аналогично филаменту при экструзии при печати пластиком.

Вместе с тем было выявлено, что процесс является нестабильным: это проявилось в формировании пробки внутри нагревательного элемента и прекращении течения металла из сопла. Ведущей гипотезой

для объяснения данного явления служит то, что материал, уже вышедший из сопла, продолжает получать тепло от нагревательного блока. Тем самым, полезная мощность, предназначенная для нагрева металла в сопле, уходит на нагрев уже расплавленного материала. Вследствие этого происходит недогрев материала внутри соплового блока и он затвердевает внутри канала сопла. Другим объяснением является закупоривание тонкого канала сопла (диаметр 0,4 мм) окисными пленками алюминия. Поэтому необходимо предложить техническое решение, направленное на предотвращение данных процессов или снижение их влияния на формирование детали.



Рис. 12. Формирование металлической капли

На основе проведенных экспериментальных работ отметим следующие факторы, которые должны быть учтены при дальнейших исследованиях.

1. Некоторые металлы подвержены окислению в воздушной среде с образованием тугоплавких оксидов [17], что важно учитывать при печати детали. Для этого рекомендуется создать в зоне печати инертную среду с защитным газом, например, аргоном, гелием, ксеноном, как это реализовано в WAAM-принтерах [18]. В этом случае что потребуется создание закрытой герметичной камеры с подводом защитного газа.

2. Тепловая энергия может быть перенесена за пределы нагревательного блока, что приводит к недогреву подаваемой проволоки. Для снижения влияния этого фактора следует более точно определить температурный режим в области нагревательного блока.

3. Необходима модернизация конструкции установки с целью повышения ее теплостойкости, что может быть реализовано в виде применения дополнительной системы охлаждения для силовых и кинематических узлов установки.

Заключение. В данной работе разработана схема и практический макет установки для печати металлом деталей ракетно-космической техники с помощью нагрева проволоки нагревательным блоком с использованием типовых элементов бытовых 3D-принтеров. Проведены аналитический и численный расчет нагревательного блока, на его основе разработана и изготовлена конструкция нагревателя. Спроектирована и изготовлена система автоматического управления нагревом. Показана работоспособность представленного образца установки при печати проволокой из алюминиевого сплава АК5. Таким образом, установлено, что печать металлом технологически осуществима, однако необходимо уточнить параметры энергетического баланса процесса, а также формирования инертной среды в ходе процесса печати.

Выявлено, что для печати металлом на основе конструкции бытового принтера потребуется применение теплостойкой плиты для формирования первичного слоя металла, усиление подающего устройства экструдера, использование системы водяного охлаждения.

Получена экспериментальная зависимость времени нагрева от температуры материала образца, минимальное время нагрева до температуры 820 °С составляет 10 мин.

Развитие данной технологии предполагается в направлении точного анализа и выбора рациональных режимов установки при использовании легкоплавких сплавов на основе олова, свинца, а также численного моделирования процесса течения металла при печати.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кабанов А.А. Прототипирование в разработке изделий ракетно-космической техники и систем их производства. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 8. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-8-2202>
- [2] Буй В.Ф., Прокопов В.С., Гаврюшин С.С., Папазафеиропоулос Д. Топологическая оптимизация конструкции диска турбины при действии термомеханических нагрузок. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 4, с. 60–70. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-4-60-70
- [3] Шемонаева, Е.С., Гончаров А.В., Андреев В.Д. Оценка целесообразности применения аддитивных технологий в изделиях аэрокосмической техники. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 12 (120). <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-12-2136>. EDN VJZJJK
- [4] Быков А.А., Ставертий А.Я., Колчанов Д.С. Разработка экспериментальной установки для изготовления деталей из металлических порошков. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 11. URL: <https://engjournal.bmstu.ru/catalog/msm/pmcm/1445.html>
- [5] Григорьянц А.Г., Колчанов Д.С., Дренин А.А., Денежкин А.О. Влияние основных параметров процесса селективного лазерного плавления на стабильность формирования единичных дорожек при выращивании изделий из медных сплавов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 6, с. 20–29. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-6-20-29

- [6] Поярков М.А. Морозов Е.А. Исследование процесса SLM-печати. *Химия. Экология. Урбанистика*, 2024, т. 4, с. 134–136. EDN CYJDOW
- [7] Шахов В.А., Смелик В.А., Хлынин И.А. [и др.]. Анализ технологий селективного лазерного спекания и лазерного осаждения металлов. В сб.: *Совершенствование инженерно-технического обеспечения производственных процессов и технологических систем: Материалы национальной научно-практической конференции с международным участием, посвященной 70-летию юбилею начала освоения целинных и залежных земель в Оренбургской области, Оренбург, 2 февраля 2024 года*. Москва, Изд-во «Перо», 2024, с. 81–83. EDN UTFDAG
- [8] Градобаев Р.А. Технология прямого лазерного спекания (DMLS) в 3D-печати изделий из металла. *Научному прогрессу — творчество молодых*, 2024, № 1, с. 178–179. EDN TEQVDW
- [9] Федотова М.А., Винныйчук В.А. Перспективы аддитивной технологии WAAM в энергетическом машиностроении. *Студенческая научная весна — 2024: Сборник тезисов Всероссийской научно-практической молодежной конференции, Волгодонск, 25–29 марта 2024 года*. Волгодонск, Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 2024, с. 92–93. EDN LZKWWG
- [10] Будкин Ю.В., Соколов Ю.А. Селективное электронно-лучевое сплавление: основы разработки оборудования и технологии синтеза изделий. *Технология машиностроения*, 2018, № 3, с. 34–40. EDN VKENJM
- [11] Лаговская Е.В., Кучер Д.О. Особенности FDM-печати. *Культура. Наука. Производство*, 2024, № 13, с. 27–36. DOI: 10.52978/26187701_2024_13_27-36. EDN QUFORF
- [12] Дектярев А.В., Зобов П.Г., Дзюнин Г.Р., Морозов В.Н. Отклонения геометрических параметров составных частей маломерного судна, полученных с помощью аддитивных технологий. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 7, с. 24–32. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-7-24-32
- [13] Баянова У.С., Малахов М.С., Киселев И.Н. Экономическая эффективность печати на FDM 3D-принтерах. *Научные достижения 2023: естественные, точные и технические науки: Сборник материалов XLII Международной очно-заочной научно-практической конференции, Москва, 11 декабря 2023 года*. Москва, НИЦ «Империя», 2023, с. 49–53. EDN BXMPYU
- [14] Романова А.М. Влияние аддитивного производства на себестоимость продукции. *Экономика и управление: проблемы, решения*, 2025, т. 11, № 5 (158), с. 51–56. DOI: 10.36871/ek.up.r.g.2025.05.11.007. EDN CTTNPC
- [15] Вовняков А.О., Смирнов Д.Д., Михайлов А.А. Программа для проектировочного термодинамического расчета аддитивной системы 3D-печати жидким металлом. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025662504*, Российская Федерация, 2025.
- [16] Исламова Г.Г., Лыгина Т.З., Губайдуллина А.М. Кинетика твердофазного синтеза силикатов кальция и качественная диагностика продуктов синтеза. *Вестник Казанского технологического университета*, 2010, № 8, с. 257–262. EDN MVNDJL
- [17] Коршак В.Э., Садоха М.А. Плавка и металлургическая обработка алюминиевых литейных сплавов. *Сборник научных трудов*. Минск, Белорусский национальный технический университет, 2022, с. 71–73.
- [18] Привалов А.С. Гипотетическая и практическая возможность применения существующих инертных газов и их смесей в 3D-печати электродуговой сваркой в защитных газах. *Проблемы и перспективы развития России:*

Молодежный взгляд в будущее: Сборник научных статей 6-й Всероссийской научной конференции. В 3-х томах. Курск, 19–20 октября 2023 года. Курск, «Университетская книга», 2023, т. 3, с. 417–423. EDN PQMPTQ

Статья поступила в редакцию 16.01.2026

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Круглов П.В., Вовняков А.О., Смирнов Д.Д., Михайлов А.А., Галиновский А.Л. Разработка установки для 3D-печати металлом на основе метода послойного наплавления. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 4. EDN TCJWVO

Круглов Павел Владимирович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: kpv17@bmstu.ru

Вовняков Алексей Олегович — инженер кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: vovnyakov02@mail.ru

Смирнов Дмитрий Дмитриевич — инженер кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: sdd20m112@student.bmstu.ru

Михайлов Александр Александрович — инженер кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: alexander_lev2002@mail.ru

Галиновский Андрей Леонидович — д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: galcomputer@mail.ru

Design of Metal 3D Printing Technology Based on the Fused Deposition Modelling Process

© P.V. Kruglov, A.O. Vovnyakov, D.D. Smirnov,
A.A. Mikhaylov, A.L. Galinovskiy

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

The article is devoted to the development of 3D printing technology for metal products based on the Fused Deposition Modelling (FDM) method. The aim of the research is the creation and testing of a prototype extrusion system for working with metal wire. Based on thermodynamic calculations accounting for specific melting energy and heat losses, a specialized heating block was designed, capable of transforming aluminium into a liquid phase. The device design was implemented by upgrading a consumer-grade FDM printer: a high-temperature extruder, a temperature control system, and a heat-resistant build platform were installed. Physical experiments with aluminium wire confirmed the fundamental possibility of extruding liquid metal and forming material layer by layer. For the further development of the technology, key improvement directions are proposed, including implementing printing in an inert gas environment and ensuring a uniform thermal regime in the build zone. The work demonstrates the potential of the FDM method for creating economically accessible metal additive manufacturing systems.

Keywords: additive manufacturing, fused deposition modelling (FDM), metal 3D printing, metal extrusion.

REFERENCES

- [1] Kabanov A.A. Prototipirovanie v razrabotke izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki i sistem ikh proizvodstva [Prototyping in developing rocket and space technology products and their production systems]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2022, iss. 8. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2022-8-2202>
- [2] Buy V.F., Prokopov V.S., Gavryushin S.S., Papazafeiropoulos D. Topologicheskaya optimizatsiya konstruktssii diska turbiny pri deystvii termomekhanicheskikh nagruzok [Topology optimization of a turbine disk structure under thermomechanical loading]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2019, no. 4, pp. 60–70. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2019-4-60-70>
- [3] Shemonaeva E.S., Goncharov A.V., Andreev V.D. Otsenka tselesoobraznosti primeneniya additivnykh tekhnologiy v izdeliyakh aerokosmicheskoy tekhniki [Feasibility evaluation of using additive technologies in aerospace products]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2021, iss. 12 (120). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2021-12-2136> EDN VJZJIK
- [4] Bykov A.A., Stavertiy A.Ya., Kolchanov D.S. Razrabotka eksperimental'noy ustanovki dlya izgotovleniya detaley iz metallicheskih poroshkov [Development of an experimental setup for manufacturing of parts from metal powders]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2015, iss. 11. Available at: <https://engjournal.bmstu.ru/catalog/msm/pmcm/1445.html>
- [5] Grigoriyants A.G., Kolchanov D.S., Drenin A.A., Denezhkin A.O. Vliyanie osnovnykh parametrov protsessa selektivnogo lazernogo plavleniya na stabilnost

- formirovaniya edinichnykh dorozhek pri vyraschivani izdeliy iz mednykh splavov [Influence of the Main Parameters of Selective Laser Melting on Stability of Single Track Formation when ‘Growing’ Parts from Copper Alloys]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2019, no. 6, pp. 20–29. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2019-6-20-29>
- [6] Poyarkov M.A., Morozov E.A. *Issledovanie protsessa SLM-pechati* [Investigation of the SLM printing process]. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika*, 2024, vol. 4, pp. 134–136. EDN CYJDOW
- [7] Shakhov V.A., Smelik V.A., Khlynin I.A. et al. Analiz tekhnologiy selektivnogo lazernogo spekaniya i lazernogo osazhdeniya metallov [Analysis of selective laser sintering and laser metal deposition technologies]. In: *Sovershenstvovanie inzhenerno-tehnicheskogo obespecheniya proizvodstvennykh protsessov i tekhnologicheskikh sistem: Materialy natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 70-letnemu yubileyu nachala osvoiniya tselinnykh i zaleznykh zemel v Orenburgskoy oblasti* [Improvement of engineering and technical support of production processes and technological systems: Proceedings of the national scientific-practical conference with international participation dedicated to the 70th anniversary of the development of virgin and fallow lands in the Orenburg region]. Moscow, Pero Publ., 2024, pp. 81–83. EDN UTFDAG
- [8] Gradobaev R.A. Tekhnologiya pryamogo lazernogo spekaniya (DMLS) v 3D-pechati izdeliy iz metalla [Direct metal laser sintering (DMLS) technology in metal additive manufacturing]. *Nauchnomu progressu — tvorchestvo molodykh*, 2024, no. 1, pp. 178–179. EDN TEQVDW
- [9] Fedotova M.A., Vinnichuk V.A. Perspektivy additivnoy tekhnologii WAAM v energeticheskoy mashinostroyeni [Prospects of WAAM additive technology in power engineering]. In: *Studencheskaya nauchnaya vesna — 2024: Sbornik tezisev Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy molodezhnoy konferentsii, Volgodonsk, 25–29 March 2024* [Student Scientific Spring — 2024: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Youth Conference]. Volgodonsk, National Research Nuclear University MEPhI Publ., 2024, pp. 92–93. EDN LZKWGW
- [10] Budkin Yu.V., Sokolov Yu.A. Selektivnoe elektronno-luchevoe splavlenie: osnovy razrabotki oborudovaniya i tekhnologii sinteza izdeliy [Selective electron beam melting: fundamentals of equipment development and manufacturing technology]. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*, 2018, no. 3, pp. 34–40. EDN VKENJM
- [11] Lagovskaya E.V., Kucher D.O. Osobennosti FDM-pechati [Features of FDM printing]. *Kultura. Nauka. Proizvodstvo — Culture. Science. Production*, 2024, no. 13, pp. 27–36. https://doi.org/10.52978/26187701_2024_13_27-36
- [12] Dektyarev A.V., Zobov P.G., Dzyunin G.R., Morozov V.N. Otkloneniya geometricheskikh parametrov sostavnykh chastey malomernogo sudna, poluchennykh s pomosh'yu additivnykh tekhnologiy [Geometric deviations of small vessel components manufactured by additive technologies]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 7, pp. 24–32. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-7-24-32>
- [13] Bayanova U.S., Malakhov M.S., Kiselev I.N. Ekonomicheskaya effektivnost' pečati na FDM 3D-printerakh [Economic efficiency of FDM 3D printing]. In: *Nauchnye dostizheniya 2023: estestvennye, tochnye i tekhnicheskie nauki: Sbornik materialov XLII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*,

- Moscow, 11 December 2023 [Scientific Achievements 2023: Natural, Exact and Technical Sciences: Proceedings of the International Conference]. Moscow, NITs “Imperiya” Publ., 2023, pp. 49–53. EDN BXMPYO
- [14] Romanova A.M. Vliyanie additivnogo proizvodstva na sebestoimost’ produktsii [Influence of additive manufacturing on production cost]. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya*, 2025, vol. 11, no. 5 (158), pp. 51–56.
<https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2025.05.11.007> EDN CTTNPC
- [15] Vovnyakov A.O., Smirnov D.D., Mikhailov A.A. *Programma dlya proektirovochnogo termodinamicheskogo rascheta additivnoy sistemy 3D-pechati zhidkim metallom* [Software for thermodynamic design calculation of liquid metal 3D printing system]. Certificate of state registration of computer program No. 2025662504, Russian Federation, 2025.
- [16] Islamova G.G., Lygina T.Z., Gubaydullina A.M. Kinetika tverdogfaznogo sinteza silikatov kal’tsiya i kachestvennaya diagnostika produktov sinteza [Kinetics of solid-phase synthesis of calcium silicates and qualitative analysis of synthesis products]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta — Herald of Technological University*, 2010, no. 8, pp. 257–262. EDN MVNDJL
- [17] Korshak V.E., Sadokha M.A. Plavka i metallurgicheskaya obrabotka aluminievyykh liteynykh splavov [Melting and metallurgical processing of aluminum casting alloys]. In: *Sbornik nauchnykh trudov* [Proceedings]. Minsk, Belarusian National Technical University Publ., 2022, pp. 71–73.
- [18] Privalov A.S. Gipoteticheskaya i prakticheskaya vozmozhnost’ primeneniya inertnykh gazov i ikh smesey v 3D-pechati elektricheskoy dugovoy svarkoy v zashchitnykh gazakh [Hypothetical and practical applicability of inert gases and their mixtures in arc welding 3D printing]. In: *Problemy i perspektivy razvitiya Rossii: Molodezhnyy vzglyad v budushchee: Sbornik nauchnykh statey 6-y Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii. Vol. 3, Kursk, 19–20 October 2023* [Problems and prospects of Russia’s development: Youth vision of the future: Proceedings of the 6th All-Russian Scientific Conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2023, pp. 417–423. EDN PQMPTQ

Kruglov P.V., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Rocket and Space Manufacturing Technology, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: kpv17@bmstu.ru

Vovniakov A.O., Engineer, Department of Rocket and Space Manufacturing Technology, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: vovnyakov02@mail.ru

Smirnov D.D., Engineer, Department of Rocket and Space Manufacturing Technology, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: sdd20m112@student.bmstu.ru

Mikhailov A.A., Engineer, Department of Rocket and Space Manufacturing Technology, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: alexander_lev2002@mail.ru

Galinsky A.L., Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department of Rocket and Space Manufacturing Technology, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: galcomputer@mail.ru