

№3(12) • 2026 АПГРЕЙД

Аддитивное производство и цифровая трансформация в промышленности

В этом выпуске:

- **Путешествие по производству металлических 3D-принтеров AM.TECH**
- **Прямая печать с джоулевым нагревом: электрический метод аддитивного производства для изготовления конструкций в космосе**
- **Построение карт печатаемости Inconel 718**

**Инженерия аддитивного производства •
На производстве • События • Фотоотчет**

Электронное издание «АПГрейд» №3 (12) июль/сентябрь 2026

Редакция

Главный редактор:
Родина Екатерина, моб. +7 (925)
806-88-88, e-mail: info@industry3d.ru.

Распространение

Журнал «АПГрейд» выходит четыре раза в год, ежеквартально, в формате бесплатного цифрового издания.

Точность содержания

Издатель прилагает все возможные усилия для обеспечения достоверности информации, однако не несет ответственности за возможные ошибки, упущения или их последствия. Редакция не отвечает за мнения и заявления авторов и рекламодателей, которые могут не совпадать с позицией издателя.

Условия размещения статей

Редакция принимает статьи от авторов из России и других стран. Принятые к публикации материалы могут быть отредактированы (по согласованию с авторами) для соответствия стилистике издания. Редакция оставляет за собой право отказать в публикации материалов, не соответствующих тематике и стилю журнала, а также в случае ограниченного объема номера.

Реклама

Реклама, размещаемая в издании, должна соответствовать этическим нормам. Однако факт публикации рекламы не является гарантией качества товаров и услуг, а также достоверности заявлений производителей.

Издание «АПГрейд» доступно для бесплатного скачивания на сайте <https://industry3d.ru>.

О чем наше издание

Мы освещаем темы 3D-печати, метрологии, научные разработки и автоматизации производств.

Целевая аудитория

Издание будет полезно широкому кругу читателей, чья профессиональная деятельность или интересы связаны с инновациями, технологиями и производством:

- Инженерам и конструкторам
- Руководителям производств и техническим директорам
- Ученым и исследователям
- Предпринимателям и стартапам
- Студентам и преподавателям
- Архитекторам и дизайнерам
- Медицинским специалистам
- Инвесторам и аналитикам
- Энтузиастам и любителям технологий

Основные темы

Аддитивные технологии, аддитивное производство, прямое цифровое производство, 3D-печать, 3D-сканирование, робототехника, искусственный интеллект, цифровизация, цифровая трансформация, обратный инжиниринг, безопасное производство, гибкое производство, интеллектуальные платформы, быстрое прототипирование, цифровые фабрики, центры аддитивного производства, 3D-фермы, гибридное производство, экспертиза, интервью с лидерами рынка.

В номере:

Аддитивное производство изнутри: от материала до серийной детали.....	5
От чертежа до отгрузки: путешествие по производству металлических 3D-принтеров AM.TECH.....	6
Прямая печать с джоулевым нагревом: электрический метод аддитивного производства для изготовления конструкций в космосе	18
Построение карт печатаемости Inconel 718 при лазерном сплавлении в слое порошка на основе данных с использованием AIMPOD	30
Не демонстрационные образцы, а реальные изделия: что изменилось на производстве Metal-Sprint	63
От рецептуры до детали: как в М-Шейп разрабатывают материалы для 3D-печати.....	72
Календарь событий на октябрь-ноябрь.....	82
Фотоотчет мероприятий.....	83



Коллаж на титульном листе создан с использованием нейросети.

Подписывайтесь на наши группы и каналы в соцсетях:

Телеграм: t.me/infoindustry3d
Вконтакте: vk.com/media_industry3d
Дзен: dzen.ru/industry3d



ЛАЗЕРНОЕ 3D-СКАНИРОВАНИЕ
ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ,
НАУКИ И ИСКУССТВА





— единственный российский новостной медиа-ресурс о промышленном аддитивном производстве с

собственным экспертным мнением.

Освещаем главные новости и тренды в сфере промышленных аддитивных технологий, 3D-сканирования, метрологии, автоматизации и цифровизации современных производств.

Подготовка статей, обзоров, интервью, освещение важных событий.

Гибкие тарифные планы по сотрудничеству в любом формате.

Пишите нам на info@industry3d.ru.

Читайте нас на industry3d.ru.



Аддитивное производство изнутри: от материала до серийной детали

В этом номере мы решили посмотреть на аддитивное производство не со стороны выставочных стендов и презентаций, а непосредственно там, где технологии работают каждый день. Редакция побывала на нескольких производственных площадках, и именно эти поездки задали основную тему выпуска.

На Metal-Sprint мы приехали повторно спустя несколько месяцев. За это время парк оборудования увеличился, появились две новые установки Kings M480, а вместе с ними стало больше изделий, одновременно находящихся в работе. Особенно интересны здесь не сами машины, а реальные задачи: детали для авиации, транспорта и промышленного оборудования. На нескольких примерах можно сравнить исходную конструкцию и её переработанную версию — только за счёт изменения геометрии массу отдельных корпусов удалось уменьшить примерно на 22–50%, сохранив тот же материал.

В М-Шейп мы увидели другую сторону отрасли — разработку материалов. В день нашего визита коман-

да работала над бронзонаполненными гранулами в рамках НИОКР по заказу клиента. Нам удалось застать практически всю цепочку: подготовку и смешивание компонентов, получение композиции, гранулирование и печать тестовых образцов. На этой же площадке работают с инженерными полимерами, металлонаполненными и керамическими композициями.

Ещё одна поездка этого номера — на производство AM.TECH. Здесь фокус смещается уже на оборудование для металлической 3D-печати. Так в одном выпуске сходятся сразу несколько частей одной отрасли: разработка машин, производство материалов и изготовление деталей.

От производственных площадок мы переходим к исследованиям. Первая научная работа посвящена построению карт печатаемости Inconel 718 при LPBF с помощью AIMPOD. Авторы анализируют совместное влияние мощности лазера, скорости сканирования, шага штриховки и других параметров. Для обучения моделей использовали данные по 241 режиму LPBF,

а одним из основных показателей стала относительная плотность образцов.

Вторая работа рассматривает возможность производства металлических конструкций непосредственно в космосе. Метод ЖНАМ использует джоулев нагрев: источником тепла становится электрическое сопротивление самой металлической проволоки. Авторы исследовали многослойное осаждение нержавеющей стали 304 и показали, что технология может работать при энергопотреблении менее 1 кВт.

Получился номер о разных уровнях одной производственной цепочки. Где-то всё начинается с компонентов будущего материала, где-то — с конструкции установки, а где-то — с цифровой модели детали. Поэтому в этом выпуске особенно много фотографий с производств: оборудование, материалы, детали и рабочие процессы такими, какими мы увидели их сами.

Главная тема номера — аддитивное производство изнутри: от разработки материала и оборудования до детали, которая уже решает свою задачу. 

На производстве



Прочти
меня на
сайте

Участок
отработки
технологических
режимов печати
(R&D центр)

От чертежа до отгрузки: путешествие по производству металлических 3D-принтеров AM.TECH

Когда говорят о металлической 3D-печати, внимание почти всегда достается самому эффектному моменту — лазерному лучу, который слой за слоем превращает металлический порошок в готовую деталь.

Но промышленный SLM-принтер начинается совсем не с лазера. И даже не в сборочном цехе.

Его путь начинается значительно раньше — с инженерной идеи, расчетов, чертежей и десятков технических решений, которые затем должны превратиться в работающую промышленную машину.

Поэтому сегодня мы пройдем весь маршрут производства AM.TECH. Начнем с кабинета

конструкторов, затем спустимся в зону серийной сборки, посмотрим, как собираются AMT-16, AMT-32 и AMT-43, пройдем вместе с оборудованием этап настройки и контроля качества, заглянем в металлографическую лабораторию и сектор постобработки, а в конце окажемся на складе готовой продукции.

Это возможность посмотреть на металлический 3D-принтер не как на отдельно стоящий станок, а как на результат работы целой инженерной и производственной системы.

Первая остановка — кабинет конструкторов

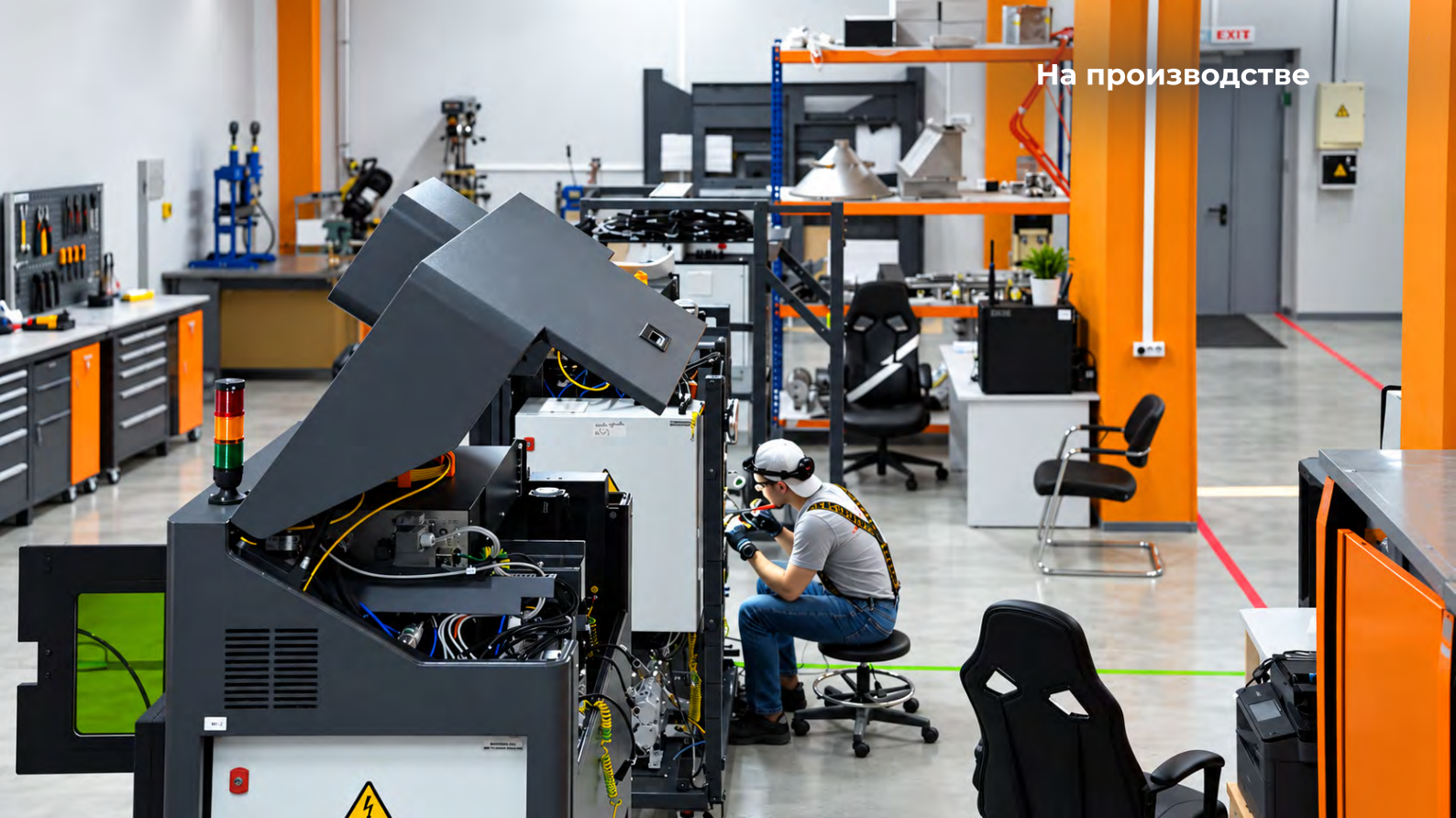
Начинаем там, где будущий 3D-принтер еще нельзя потрогать руками.

Перед нами кабинет конструкторов. На этом этапе установка существует преимущественно в цифровом виде: 3D-модели, сборки, чертежи, схемы, спецификации.

Здесь нет металлического порошка, работающих лазеров или раскаленных после термообработки деталей. Главные инструменты — инженерные CAD-системы, расчеты и опыт специалистов.

Именно здесь определяется, каким будет будущий аддитивный комплекс: его компоновка, рабочая область, конструкция камеры построения, размещение лазерно-оптической системы, механика нанесения порошка, системы фильтра-





Производственная площадка AM.TECH — здесь проходит путь промышленной аддитивной установки от разработки до подготовки к отправке заказчику.

ции, газооборота, охлаждения и автоматики.

Со стороны промышленный SLM-принтер может выглядеть как большой металлический шкаф с экраном оператора.

Но стоит мысленно снять внешние панели — и внутри обнаруживается значительно более сложная система.

Здесь одновременно должны работать механика, оптика, лазер, электроника, программное обеспечение, газовая система, фильтрация, охлаждение и узлы обращения с металлическим порошком.

Причем каждый из этих элементов связан с остальными.

Например, недостаточно просто установить мощный лазер. Необходимо точно

направить луч в нужную точку рабочей зоны и обеспечить стабильные характеристики пятна.

Недостаточно сделать герметичную камеру. Нужно создать внутри нее контролируемую защитную атмосферу, следить за содержанием кислорода и организовать движение газа через зону построения.

Недостаточно один раз ровно распределить металлический порошок. Система должна наносить слой за слоем сотни и тысячи раз на протяжении всего процесса печати.

Именно поэтому разработка промышленной аддитивной установки — это прежде всего задача системной инженерии.

Чтобы понять масштаб

задачи, достаточно вспомнить, как работает сама технология.

SLM — Selective Laser Melting, или селективное лазерное плавление, — относится к технологиям послойного аддитивного производства металлических изделий.

На платформу построения наносится тонкий слой металлического порошка. Лазер выборочно расплавляет материал в тех областях, которые соответствуют сечению цифровой 3D-модели. Затем платформа смещается, наносится следующий слой порошка — и процесс повторяется. Так постепенно формируется объемная металлическая деталь.

И если при построении

На производстве

высокой детали этот цикл повторяется тысячи раз, становится понятно, почему стабильность каждого узла критически важна.

Небольшое отклонение на одном слое может показаться незначительным. Но промышленный принтер должен сохранять требуемые параметры не несколько минут, а в течение всего построения.

У линейки AM.TECH есть интересная инженерная особенность: в SLM-принтерах используется унифицированный подход к лазерно-оптической системе. Такая архитектура позволяет использовать накопленные технологические наработки при переходе между установками разного формата и сокращать количество дополнительных итераций при масштабировании процесса.

Поэтому кабинет конструкторов — логичная



Конструкторский отдел AM.TECH. Здесь создаются цифровые модели, компоновка и конструкторская документация будущих SLM-установок.

первая точка нашего маршрута.

Практически все, что дальше мы увидим в металле, проводке, датчиках, трубопроводах и механизмах, сначала должно сложиться здесь — в единую цифровую модель работающей машины.

Спускаемся в цех: цифровая модель становится железом

Оставляем компьютеры

конструкторов и спускаемся туда, где будущий принтер уже можно увидеть в металле.

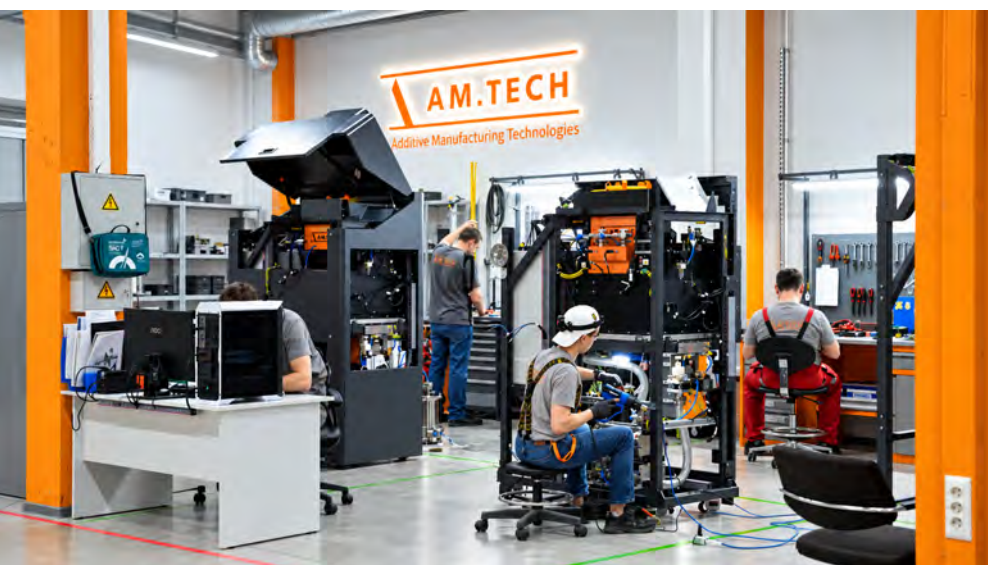
Следующая остановка — помещение серийной сборки. Здесь совсем другая атмосфера.

На разных стадиях производства можно увидеть корпуса установок, рамы, рабочие камеры, шкафы автоматики, отдельные технологические модули, трубопроводы, элементы систем охлаждения и фильтрации.

Именно здесь инженерная документация начинает превращаться в реальное промышленное оборудование.

На производстве собираются SLM-принтеры AMT-16, AMT-32 и AMT-43.

Если поставить эти машины рядом, хорошо видно, как одна технологическая идея масштабируется под разные задачи и производительность.



Участок серийной сборки AM.TECH. На площадке собираются промышленные SLM-принтеры AMT-16, AMT-32 и AMT-43.

На производстве собираются SLM-принтеры AMT-16, AMT-32 и AMT-43. Если поставить эти машины рядом, хорошо видно, как одна технологическая идея масштабируется под разные задачи и производительность.



Начнем с AMT-16.

Это самая компактная установка из нашей сегодняшней тройки. Область построения составляет $\varnothing 165 \times 225$ мм, используется один лазер мощностью 500 Вт.

Несмотря на относительно небольшую рабочую область, это полноценная промышленная SLM-система: с контролем атмосферы, фильтрацией, динамической фокусировкой лазерного луча, контролем порошкового слоя и возможностью настройки технологических параметров.



Следующий шаг — AMT-32.

Здесь масштаб уже заметно увеличивается. Рабочая область составляет $320 \times 320 \times 375$ мм, а вместо одного лазера применяются два лазера мощностью по 500 Вт.

Установка проектировалась для длительной промышленной работы. Она оснащается верхней подачей порошка, системой формирования и контроля защитной атмосферы, фильтрацией и системой машинного зрения для контроля нанесенного порошкового слоя.



Дальше идем к AMT-43.

Это уже трехлазерная промышленная система с рабочей областью $320 \times 520 \times 370$ мм. Базовая мощность каждого лазерного канала составляет 500 Вт, предусмотрена опция 1000 Вт.

В конструкции используются двустороннее нанесение порошкового слоя и автоматизированный замкнутый контур работы с порошком.

На примере этих трех машин хорошо видно, что увеличение SLM-установки — это далеко не просто увеличение размеров корпуса.

Чем больше рабочая зона и количество лазеров, тем серьезнее требования к синхронизации систем, стабильности газового потока, нанесению порошка, работе оптики и контролю процесса.

Что на самом деле собирают внутри SLM-принтера

Если наблюдать за производством со стороны, взгляд невольно цепляется за самые крупные элементы: металлический каркас, панели, двери, рабочую камеру.

Но настоящая сложность находится внутри.

SLM-принтер должен одновременно управлять несколькими физическими процессами.

Рабочая камера должна поддерживать контролируемую атмосферу.



На производстве

позволяет отслеживать качество нанесения порошкового слоя.

В AMT-32 установлены три датчика содержания кислорода, а параметры процесса фиксируются системой управления.

В AMT-43 также применяются три датчика кислорода, но дополнительно машина должна обеспечивать работу уже трех лазерных каналов и автоматизированного контура обращения с металлическим порошком.

Поэтому фраза «сборка 3D-принтера» звучит значительно проще, чем выглядит сам процесс.

По сути, здесь собирают компактный производственный комплекс, в котором механика, оптика, электроника, газовая система и программное обеспечение должны работать как единое целое.

И именно поэтому после завершения сборки машина еще не считается готовой.

Впереди у нее один из самых важных этапов.

Следующая остановка — контроль качества и донастройка

Казалось бы, корпус собран, электрика подключена, системы запускаются — можно отправлять принтер заказчику.

Но для промышленной SLM-установки этого недостаточно.

Ее необходимо проверить не только как машину.

Она должна доказать, что

Один из этапов сборки SLM-принтера: монтаж внутренних технологических узлов и систем контроля оборудования

Газовый поток должен проходить через область построения и участвовать в удалении продуктов процесса.

Система фильтрации должна очищать циркулирующий газ.

Лазерно-оптическая система — с высокой точностью направлять энергию в заданные координаты.

Механизм нанесения порошка — раз за разом формировать равномерный слой.

Платформа построения — точно перемещаться по вертикальной оси.

А многочисленные датчики должны сообщать системе управления, что происходит с оборудованием прямо сейчас.

И все это обязано работать синхронно.

Например, в AMT-16 используется контроль содержания кислорода, давления и состояния фильтрации, а система компьютерного зрения

умеет печатать металл.

Именно поэтому из сборочного участка оборудование переходит в зону контроля качества и технологической донастройки.

Здесь проверяется работа механики, автоматики, датчиков, газовой системы, лазерно-оптической части и других узлов.

Но затем начинается самое интересное — тестовые построения.



Участок контроля качества и технологической настройки SLM-оборудования перед финальной приемкой.

Почему нельзя ограничиться обычной диагностикой оборудования?

Потому что в SLM-процессе конечный результат зависит сразу от большого числа параметров.

На качество формируемого материала влияют мощность лазера, скорость его перемещения, размер лазерного пятна, толщина порошкового слоя, расстояние между проходами, стратегия сканирования, свойства самого порошка, состояние газовой атмосферы и тепловые процессы внутри детали.

Изменили один параметр — изменилось распределе-

ние энергии.

Изменилось распределение энергии — изменилось формирование расплава.

А значит, потенциально может измениться и структура получаемого металла.

Именно здесь становится понятно, зачем промышленному аддитивному производству нужны технологии.

Машина должна не просто перемещать лазер по заданной траектории. Нужно найти рабочее технологическое окно, в котором конкретный материал стабильно формирует требуемую структуру.

Для управления процессом на установках использу-

ется программная платформа PrintMate. На AMT-16 доступно более 60 параметров настройки лазерного синтеза, а для AMT-32 производитель указывает почти 100 параметров построения. Динамическая фокусировка дает возможность изменять диаметр лазерного пятна и подбирать баланс между производительностью и более точным режимом печати.

Но цифры в интерфейсе сами по себе ничего не гарантируют.

Главная проверка начинается после того, как напечатан реальный металлический образец.

На производстве

Металлографическая лаборатория: смотрим не на деталь, а внутрь металла

Рядом с зоной настройки находится одно из самых интересных помещений нашего маршрута — металлографическая лаборатория.

Именно здесь становится особенно заметна разница между любительской 3D-печатью и промышленным аддитивным производством.

Внешне напечатанный металлический образец может выглядеть отлично.

Но внешнего вида недостаточно.

Для промышленности важно понимать, что происходит внутри материала.

Для этого используются методы металлографического исследования. Из тестового образца подготавливается участок для изучения микроструктуры материала. Специалисты могут оценивать наличие и характер пор, несплавлений и других особенностей структуры, а затем сопоставлять результат с параметрами, на которых выполнялась печать.



Металлографическая лаборатория AM.TECH. Здесь исследуются образцы, напечатанные на разных материалах и технологических режимах.

Представим простой пример.

Если плотность энергии оказывается недостаточной, частицы порошка могут сплавляться не полностью. В структуре способны появляться области несплавления.

Изменяем параметры — меняется характер формирования ванны расплава.

Слишком высокая энергия тоже не означает автоматически лучший результат: тепловой режим процесса становится другим, и вместе с ним могут изменяться структура и дефектность материала.

Поэтому металлография превращается в своеобразную систему обратной связи.

Принтер получает определенный режим.

Печатается тестовый образец.

Образец изучается в лаборатории.

Специалист видит результат уже на уровне структуры материала. После этого параметры при необходимости корректируются — и цикл повторяется.

ПРИНТЕР > ТЕСТОВАЯ ПЕЧАТЬ > ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦА КОРРЕКТИРОВКА > ПОВТОРНАЯ ПЕЧАТЬ

Вот почему фраза «донастройка оборудования» применительно к SLM означает значительно больше, чем обычная регулировка механики.

Фактически идет настройка связки **«оборудование + материал + технологический режим»**.

Один принтер — разные материалы и разные режимы

Отдельная задача — работа с различными металлическими порошками.

SLM-оборудование может использоваться для печати нержавеющей сталью, никелевыми сплавами, титановыми и алюминиевыми материалами, кобальт-хромовыми и другими металлическими композициями. Для AMT-16 и AMT-32 производитель прямо указывает возможность работы, в частности, с материалами на основе железа, никеля, титана и алюминия.

При этом у каждого материала свои физические свойства.

Различается теплопроводность.

Различается поглощение энергии лазера.

Отличается поведение расплава.

Меняются требования к

технологическому режиму.

Поэтому универсального набора параметров «для любого металла» не существует.

Именно здесь снова становится важной металлографическая лаборатория: она позволяет связывать настройки оборудования не только с внешним видом детали, но и с фактическим качеством сформированного материала.

Для конечного промышленного потребителя это принципиальный момент.

Ему недостаточно получить красивую металлическую деталь.

Нужен воспроизводимый процесс.

Напечатать деталь — это только половина маршрута

Из лаборатории переходим в соседний сектор — постобработку.

Здесь находится электроэрозионный станок и вакуумная печь.

И это отличный момент, чтобы разрушить еще один популярный миф о металлической 3D-печати.

SLM редко выглядит так: нажали кнопку, открыли принтер, достали полностью готовую деталь и сразу установили ее в изделие.

В реальном промышлен-

ном цикле после печати обычно остается еще несколько операций.

Металлическая деталь формируется непосредственно на платформе построения и может быть соединена с ней поддерживающими структурами.

Кроме того, в процессе послойного локального нагрева и охлаждения материала возникают термические напряжения.

Поэтому после построения изделия в зависимости от материала и требований могут потребоваться термообработка, отделение от платформы, удаление поддержек, механическая обработка и финишные операции.

В типовой технологической цепочке SLM сама AM.TECH отдельно выделяет термическую обработку, удаление изделия с платформы и поддержек, механическую обработку и последующую доводку.

Электроэрозионный станок позволяет работать с токопроводящим материалом и аккуратно отделять металлическую деталь от платформы построения.

Рядом — вакуумная печь.

У нее совершенно другая задача.

На производстве

Термическая обработка может использоваться для снятия остаточных напряжений и получения требуемого состояния материала после аддитивного выращивания.

И здесь особенно хорошо видно, почему промышленную SLM-печать нельзя рассматривать изолированно.

Это технологическая цепочка:



Только увидев эту цепочку целиком, начинаешь понимать, почему правильнее говорить не просто о «3D-принтере», а об аддитивном производстве.



Вакуумная печь на участке постобработки. Термическая обработка является частью технологического маршрута многих металлических SLM-деталей.

Почему проверка одной красивой детали ничего не доказывает

Теперь возвращаемся к принтеру, который проходит донастройку.

К этому моменту машина уже прошла большой путь.

Сначала она существовала в конструкторской документации.

Затем была собрана.

После этого специалисты проверили работу ее систем.

Дальше начались тестовые построения, исследование образцов, подбор и корректировка параметров.

И только после всех необходимых итераций оборудование можно считать готовым к следующему этапу.

Здесь важен принцип, на котором вообще строится промышленное производство: **одного удачного**

результата недостаточно.

Можно один раз напечатать красивую деталь.

Но промышленность интересует другое — повторяемость.

Оборудование должно снова и снова выполнять процесс в заданном диапазоне параметров.

Газовая система должна сохранять необходимые условия.

Механика должна повторять движения.

Порошковый слой должен наноситься стабильно.

Оптика должна сохранять характеристики.

Система управления — контролировать процесс.

Особенно важно это для построений, которые продолжаются не час и не два, а десятки часов или несколько суток.

Поэтому участок контроля качества — не формальная



последняя галочка перед отгрузкой.

Это место, где принтер окончательно превращается из набора правильно собранных узлов в промышленный технологический инструмент.

Финальная остановка — склад готового оборудования

После всех проверок и донастроек установка перемещается в складскую зону.

И здесь наше путешествие по производству AM.TECH практически заканчивается.

Перед нами уже не корпус в сборочном цехе и не экспериментальная машина на настройке.

Это готовое оборудование, которое ожидает отправки потребителю.

Дальше начинается уже другой маршрут.

Принтер отправится на промышленное предприятие, в производственный центр, конструкторское бюро или исследовательское подразделение.

Там он станет частью реальной технологической цепочки.

SLM применяется в машиностроении, энергетике, авиационной отрасли, высокотехнологичном производстве, медицине, научно-исследовательских и опытно-конструкторских задачах — там, где особенно востребованы сложная геометрия, внутренние каналы, снижение массы конструкции и возможность изготовления металлических деталей непосредственно по цифровой модели.

И именно в этот момент интересно мысленно вернуться туда, откуда мы

начали экскурсию.

В кабинет конструкторов.

Несколько помещений назад будущая машина была набором цифровых моделей, расчетов и инженерных решений.

Потом появились металлическая рама и рабочая камера.

К ним добавились оптика, лазеры, датчики, механика, газооборот, фильтрация, автоматика и программное обеспечение.

Затем установка должна была показать, что все эти системы способны работать одновременно.

Потом — напечатать металл.

Следующий этап — доказать качество этого металла в лаборатории.

После этого — повторить результат.

И только затем машина

На производстве

получает право покинуть производство.

Что остается за кадром фотографии металлической 3D-печати

Когда в следующий раз вы увидите фотографию сложной детали, напечатанной из титана, стали или никелевого сплава, обратите внимание: на этом снимке почти всегда остается за кадром огромная часть процесса.

За готовой деталью стоит значительно больше, чем вспышка лазера внутри рабочей камеры.

Сначала кто-то проектирует саму установку.

Кто-то рассчитывает механику.

Кто-то проектирует газовый контур.

Кто-то занимается лазерно-оптической системой.

Кто-то собирает шкаф автоматики.

Кто-то прокладывает коммуникации.

Инженеры собирают все узлы в единую машину.

Технологи запускают тестовые построения.

Специалисты лаборатории исследуют полученный материал.

Режимы корректируются.

Печать запускается снова.

Детали проходят постобработку.

Оборудование проверяется еще раз.

И только после этого промышленная SLM-система отправляется к заказчику.

И, пожалуй, именно здесь возникает лучшая аналогия с самой аддитивной технологией. SLM создает металлическое изделие постепенно — **слой за слоем**. Примерно так же создается и сам промышленный 3D-принтер.

Только вместо слоев металлического порошка здесь складываются инженерные компетенции: конструирование, механика, лазерная оптика, электроника, программное обеспечение, материаловедение, производство, технология и контроль качества.

Именно из этих «слоев» в конечном итоге и получается промышленная аддитивная установка AM.TECH. 



Готовая SLM-установка AM.TECH перед отправкой заказчику — финальная точка производственного маршрута и начало ее работы уже на промышленном предприятии.

АМТ-16 И АМТ-32 ВНЕСЕНЫ В РЕЕСТР

российской промышленной продукции

Две установки АМ.ТЕCH включены в государственный реестр российской промышленной продукции.



АМТ-16

Реестровая запись № 4954159
10 июля 2026

АМТ-32

Реестровая запись № 4963993
19 августа 2026



Прочти
меня на
сайте

Оригинал:

doi.org/10.1038/s41598-026-46686-5

Прямая печать с джоулевым нагревом: электрический метод аддитивного производства для изготовления конструкций в космосе

Suli Li¹, Zhuang Gao¹, Jie Xiong¹, Heng Zhang¹, Laixia Yang¹ и Bingheng Lu²

¹Колледж машиностроения, Сианьский университет науки и технологий, Сиань 710054, Китай.

²Национальный институт инноваций в области аддитивного производства, Сиань 710300, Китай.

Для переписки: Lsl15802949318@xust.edu.cn

Потребность в производстве непосредственно в космосе стимулирует разработку компактных и энергоэффективных технологий аддитивного производства (АП) металлов.

В этой работе предложен и исследован новый процесс аддитивного производства с джоулевым нагревом (Joule-Heating Additive Manufacturing, JHAM), основанный на эффекте Джоуля-Ленца и предназначенный для прямого формирования металлических конструкций.

Для моделирования многослойного осаждения проволоки из нержавеющей стали 304 разработана полностью связанная термоэлектромеханическая

конечно-элементная модель.

Она раскрывает эволюцию характерного температурного поля в форме бивня, а также влияние силы тока, скорости и ширины контакта.

Экспериментально изготовлены односторонние пятислойные стенки; систематически изучено влияние параметров процесса на макроструктуру, геометрию (ширину, высоту и коэффициент перекрытия), шероховатость поверхности (Ra, Rz) и твердость поперечного сечения. Наилучшее макроскопическое качество получено при токе 120 А, скорости 200 мм/мин и ширине контакта 1,0 мм. С увеличением тока ширина формируемого

валика и коэффициент перекрытия возрастают, а высота уменьшается.

Увеличение скорости, напротив, снижает ширину и перекрытие, но увеличивает высоту. Шероховатость поверхности и твердость изменяются немонотонно; минимальное значение Ra составило 0,142 мкм. Расчетные и экспериментальные измерения хорошо согласуются, подтверждая корректность мультифизической модели: расхождение не превышает 10%. Благодаря низкому энергопотреблению (менее 1 кВт) и простой архитектуре JHAM представляет интерес для орбитального изготовления металлических компонентов.



Инженерия аддитивного производства

Развитие длительных космических экспедиций и создание внеземных поселений требуют перехода от наземного производства к изготовлению изделий на орбите и по мере необходимости [1-4]. Такой переход необходим из-за жестких ограничений на массу и объем полезной нагрузки, а также связанных с запуском затрат. Аддитивное производство широко рассматривается как одна из ключевых технологий этого перехода, поскольку позволяет ремонтировать, перерабатывать и изготавливать критически важные компоненты непосредственно на месте [5-9].

Космические агентства, включая NASA, ESA и Китайское агентство пилотируемых космических полетов, ведут программы по адаптации АП к условиям космоса [10, 11]. Общая цель состоит в переходе от принципа «доставить все необходимое» к принципу «изготовить необходимое на месте» [12, 13]. В исследованиях уже рассматривались разные космические применения АП - от электронно-лучевого свободного формообразования и микрокапельной струйной печати до формирования полимеров при переменной гравитации и изготовления космических ферм [14-20].

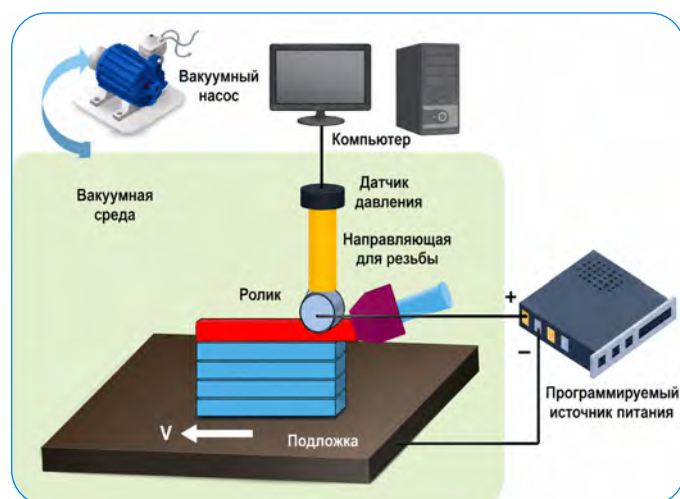
Распространенные наземные источники тепла для металлического АП - лазеры [21-26], электрические

дуги [27-32], электронные пучки [33-38] и плазменные дуги [39, 40] - создают трудности при использовании в космосе, включая высокое энергопотребление, сложную оптику и требования к вакууму. Для устранения этих ограничений мы предлагаем технологию аддитивного производства с джоулевым нагревом (JHAM). В соответствии с законом Джоуля-Ленца электрическое сопротивление самой металлической проволоки используется как источник тепла для плавления. Такой подход отличается простотой, низким энергопотреблением, компактностью и независимостью от силы тяжести.

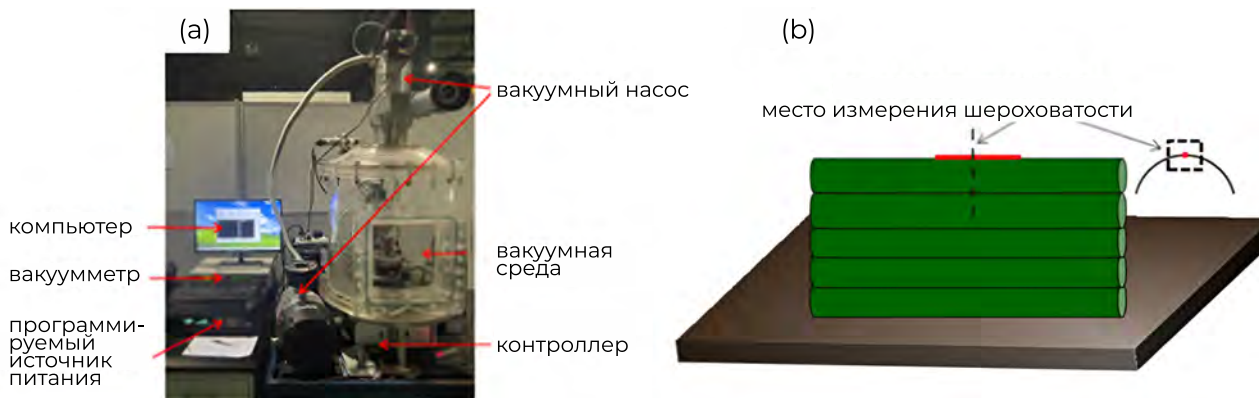
Предыдущие исследования аддитивного производства на основе резистивного нагрева были посвящены механизмам плавления проволоки, переноса капель и формирования одиночного слоя. Однако мультифизические явления, определяющие многослой-

ное осаждение, включая динамическое тепловыделение, сложную тепловую историю и их влияние на геометрию, качество поверхности и механические свойства, остаются изученными недостаточно. Численное моделирование процесса осложняется движущейся зоной контакта и сильной связью электрического, теплового и механического полей.

В нашей предыдущей работе [41] была показана возможность переноса капель одного слоя за счет джоулева нагрева, но не рассматривались накопительные тепловые эффекты и устойчивость конструкции, необходимые для трехмерного производства. Настоящее исследование развивает этот подход: основное внимание уделено многослойному осаждению, а в качестве инструмента горячего накатывания непосредственно в процессе используется непрерывно движущийся ролик.



Принцип работы JHAM



Экспериментальная установка и метод измерения: (а) схема экспериментальной установки; (б) положение участка измерения шероховатости.

Экспериментальная установка

Однопроходные пяти-слойные стенки изготавливали из проволоки нержавеющей стали 304 диаметром 0,3 мм. Верхним электродом служил ролик из медного сплава с наружным диаметром 12 мм, внутренним диаметром 6 мм и толщиной 8 мм. Пружинная система натяжения поддерживала постоянное механическое контактное усилие 0,3 Н в течение всего осаждения. Это обеспечивало стабильную электропроводность и одновременно описанный выше эффект выглаживания непосредственно в процессе.

В таблице приведены дискретные значения параметров, использованные в первоначальном конечно-элементном моделировании для определения технологического окна. При экспериментальной проверке исследовали более широкий непрерывный диапазон параметров, чтобы систематически

проследить изменение морфологии. Установка включала вакуумную камеру, механизм подачи проволоки и источник питания. Шероховатость поверхности измеряли конфокальным лазерным сканирующим микроскопом Keyence VK-X200 (Япония) в точках, обозначенных на рисунке.

Численное моделирование

Для моделирования послойного осаждения пяти слоев металлической проволоки разработана нестационарная трехмерная конечно-элементная модель. Процесс разбит на семь этапов анализа: приложение давления, выдержка, подача тока, движение ролика (осаждение), отключение тока, охлаждение и снятие давления. Модель учитывает температурную зависимость свойств материалов (табл. 1-3) и контактное сопротивление. Параметры процесса приведены в табл. 4.

Для корректного описания плавления и затверде-

вания проволоки из стали 304 фазовый переход и соответствующая скрытая теплота учитывались методом эквивалентной теплоемкости. Скрытая теплота плавления $L = 260$ кДж/кг распределена по температурному интервалу между солидусом и ликвидусом - от $T_s = 1400$ °C до $T_l = 1450$ °C. Это обеспечивает сохранение энергетического баланса при переходе из твердого состояния в жидкое в расчетах температурного поля.

Контактное сопротивление на границах ролик-проволока и проволока-подложка играет ключевую роль в джоулевом тепловыделении. Как показано в табл. 3, электрическое контактное сопротивление задано как температурно-зависимая величина. По мере роста локальной температуры оно постепенно уменьшается, что физически соответствует размягчению материала, увеличению фактической площади контакта при постоянном давлении и последующему

Инженерия аддитивного производства

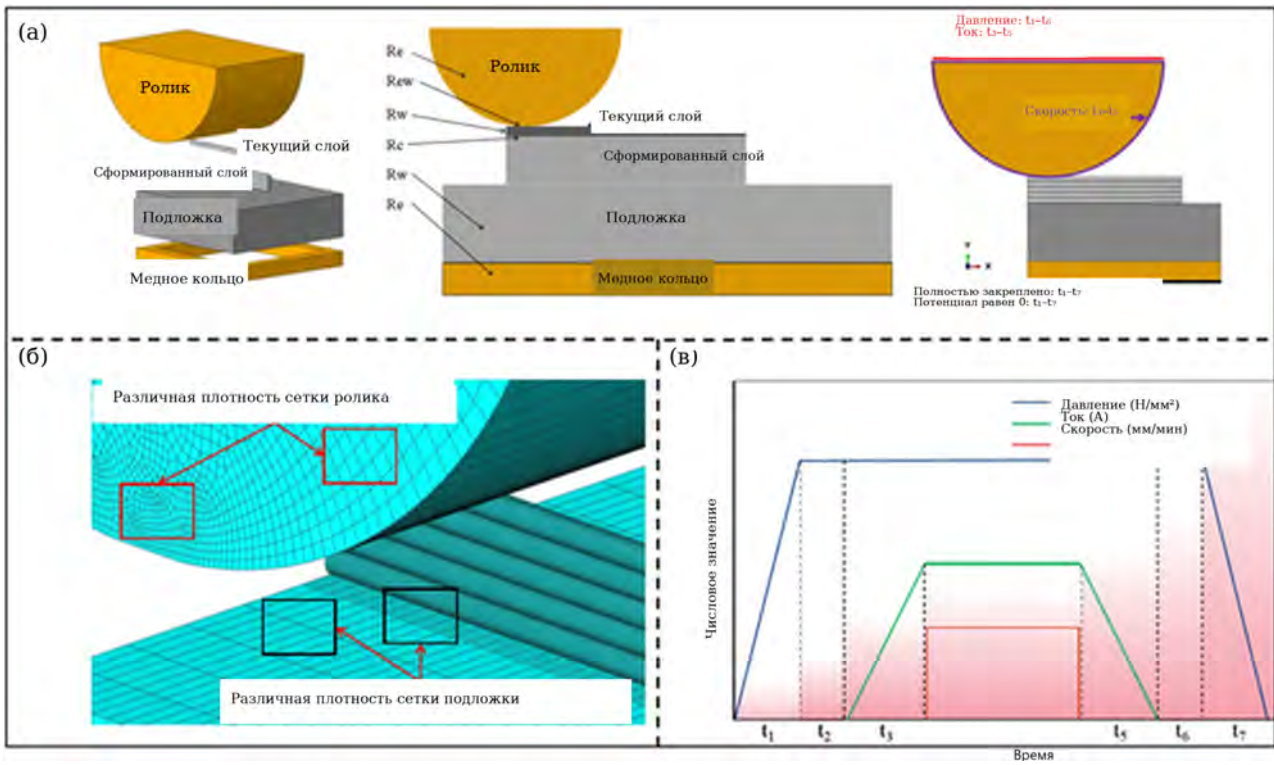
плавлению на границе раздела.

Поскольку моделировалась космическая вакуумная среда, конвективный теплообмен полностью исключен. Отвод тепла происходит только за счет теплопроводности в твердых телах и теплового излучения в окружающую среду. Граничное условие излучения по закону Стефана-Больцмана задано на всех свободных поверхностях при темпера-

туре окружающей среды 20 °С. Коэффициент излучения ϵ принят равным 0,4 для нержавеющей стали и 0,6 для медного ролика. В механической постановке нижняя поверхность подложки полностью закреплена, а верхний ролик создает динамическое механическое давление.

Перед основными расчетами для обеспечения точности при приемлемых вычислительных затратах

проведена проверка сходимости сетки. Для зоны осаждения оценили три плотности сетки. Уменьшение минимального размера элемента ниже 0,1 мм изменяло максимальную температуру менее чем на 5%. Поэтому в зоне осаждения использовали сетку с минимальным размером элемента 0,1 мм, достаточную для точного описания локальных крутых температурных градиентов.



Построение трехмерной модели: (а) трехмерная модель JHAM; (б) плотность сетки для разных элементов конструкции; (с) этапы анализа процесса JHAM.

Таблица 1. Механические свойства материалов.

Материал	Предел текучести, МПа	Модуль сдвига, ГПа	Модуль Юнга, ГПа	Плотность, кг/м³	Коэффициент Пуассона
Нержавеющая сталь	290	75,0	195	7800	0,3
Медный сплав	235	42,6	115	8900	0,35

Таблица 2. Теплофизические параметры материалов.

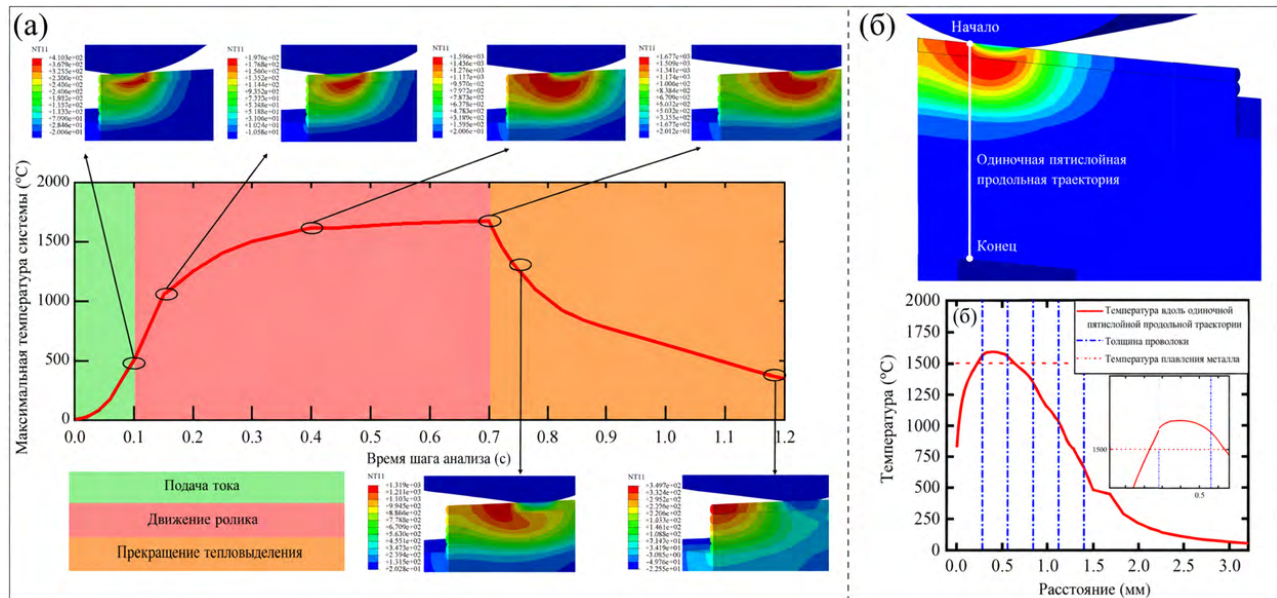
Темпера- тура, °C	Нержавеющая сталь: удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C)	Нержавеющая сталь: теплопроводнос- ть, Вт/(м·°C)	Нержавеющая сталь: удельное сопротивление, Ω·м × 10-8	Медный сплав: удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C)	Медный сплав: теплопроводнос- ть, Вт/(м·°C)	Медный сплав: удельное сопротивление, Ω·м × 10-8
21	412	20	72	397,8	390	2,64
93	445	20,1	77	401,9	380,6	3
204	502	20,2	85	418,7	370	4
316	551	20,4	93	431,2	355	5,05
427	622	20,6	101	439,6	345,4	5,63
538	858	20,7	107	452,2	334,7	6,06
649	876	21	113	464,7	320	8,31
760	889	21,5	119	471,5	315,5	19,14
871	657	22	124	477,3	310,3	22,03
982	643	21	135	485,4	305	26,03
1093	690	20	150	497,8	300,1	31,69
1200	711	19,7	164	502,4	-	34,87
1500	1082	38,19	197	-	-	38,24

Таблица 3. Контактные коэффициенты для пар нержавеющая сталь-нержавеющая сталь и нержавеющая сталь-медный сплав.

Температура, °C	Сталь-сталь: теплопроводность, мВт/(мм²·K)	Сталь-сталь: электрическая проводимость контакта, 1/(мΩ·мм²)	Сталь-медный сплав: теплопроводность, мВт/(мм²·K)	Сталь-медный сплав: электрическая проводимость контакта, 1/(мΩ·мм²)
20	140	6,4	560	12,7
205	150	6,4	640	14,9
425	-	6,5	-	20,4
650	160	6,7	1300	53,2
870	160	8,5	4800	-
1093	-	14,3	-	-

Таблица 4. Параметры, выбранные для моделирования ЖНАМ.

Изменяемый параметр	Ток, А	Ширина контакта, мм	Скорость, мм/мин
Ток	110	1	200
	120	1	200
	130	1	200
Ширина контакта	120	0,8	200
	120	1	200
	120	1,2	200
Скорость	120	1	100
	120	1	200
	120	1	300



Температурное поле на разных этапах анализа одиночной многослойной стенки: (а) распределение температуры и изменение максимальной температуры в пятислойной стенке; (б) последовательность этапов анализа и распределение температуры в середине этапа движения ролика.

Результаты и обсуждение Эволюция температурного поля

Рассчитанная эволюция температурного поля показывает характерный профиль в форме бивня. Во время движения ролика зона максимальной температуры не остается неподвижной: сначала она возникает на границе контакта нового, пятого, и предыдущего, четвертого, слоя, а затем смещается назад относительно движения ролика. Асимметричный профиль формируется под действием конкурирующих механизмов теплопереноса. Медный ролик служит мощным теплоотводом и вызывает быстрое охлаждение в передней части контакта. В вакууме отсутствие конвективного теплообмена принципиально меняет характер отвода тепла.

Спереди основным теплоотводом остается медный ролик, а сзади тепло удаляется только излучением и теплопроводностью через выращенную стенку. Из-за этого за движущимся роликом локально накапливается тепло, что и формирует асимметричное бивнеобразное поле. Направленный тепловой поток стабилизирует осаждение, препятствуя повторному расплавлению ранее затвердевших слоев. Под роликом изотермические поверхности расположены плотно из-за быстрого отвода тепла, а позади него - реже из-за остаточного тепла, что создает вытянутый асимметричный профиль.

Бивнеобразное температурное поле связано с увеличением числа слоев проволоки. Если теплоперенос и излучение не учиты-

вать, тепло выделяется только в зоне контакта под роликом и перемещается вместе с ним. Если учесть теплоперенос и излучение, но исключить теплообмен между роликом и подложкой, температурное поле отстает от движения ролика. При учете теплообмена ролик-подложка большой объем ролика приводит к тому, что зона А отдает ему большую часть тепла и оказывается холоднее зоны тепловыделения. Зона С теплее зоны А благодаря суммарному воздействию ранее накопленного и текущего тепла. Зона В, несмотря на аналогичное комбинированное нагревание, отдает ролику больше тепла, чем передает вниз, поэтому она холоднее зоны С. Зона D расположена ближе к источнику тепла и немного теплее зоны С.

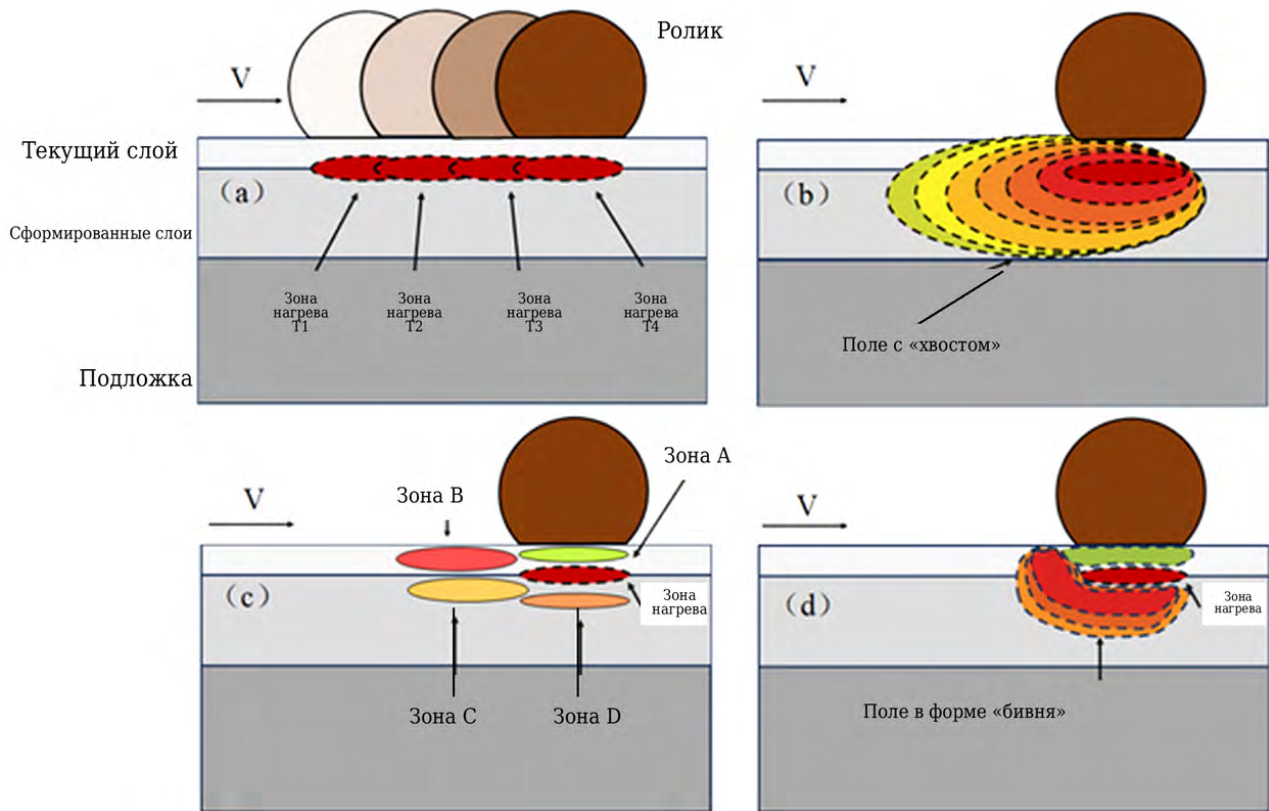
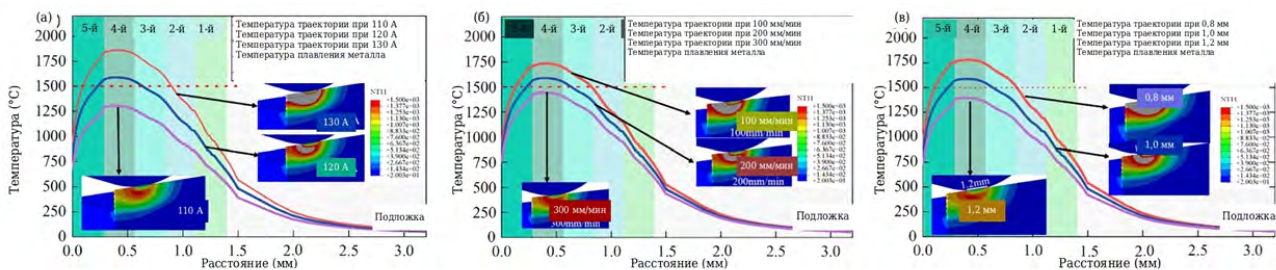


Схема теплопереноса в одиночной многослойной стенке: (a) температурное поле без учета теплопереноса и теплоотдачи; (b) с учетом теплопереноса и теплоотдачи, но без учета теплообмена с роликом; (c) с учетом теплопереноса, теплоотдачи и теплообмена с роликом; (d) итоговое температурное поле при учете всех перечисленных механизмов.



Влияние параметров процесса на протяженность температурного поля при моделировании JHAM: (a) ток; (b) скорость; (c) ширина контакта.

В результате температуры располагаются в порядке $A < B < C < D$, образуя поле.

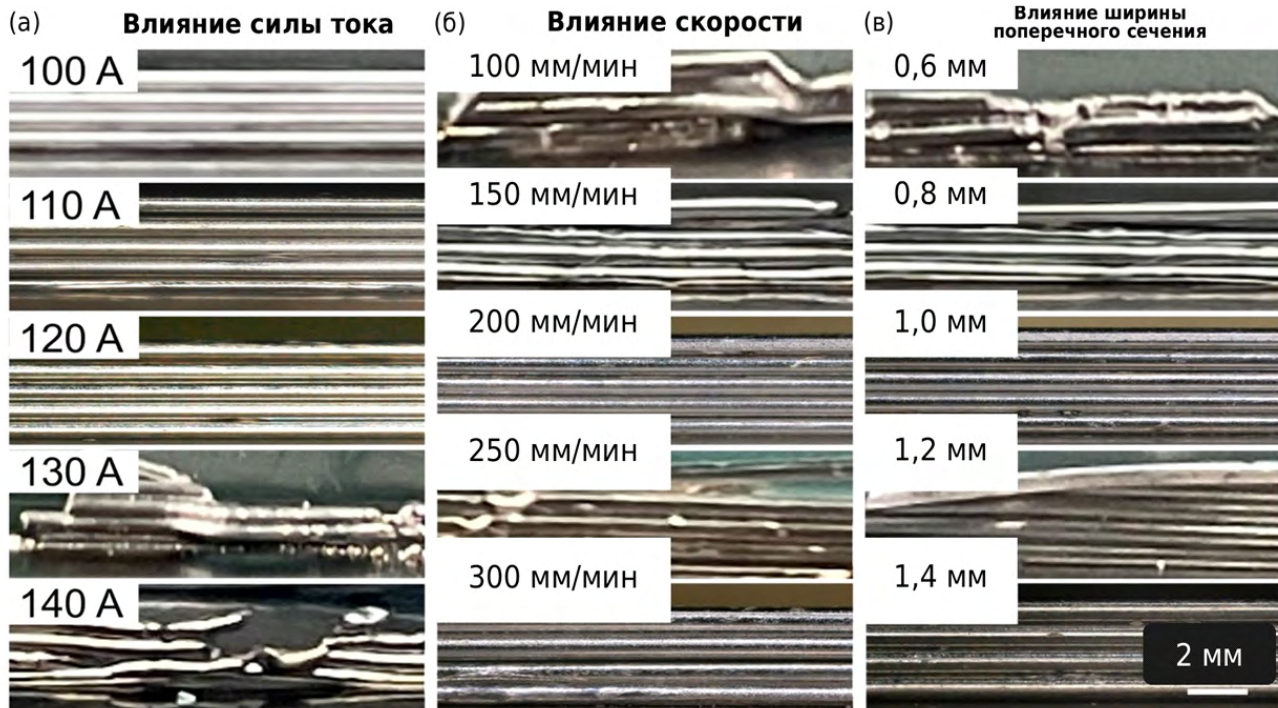
Параметрическое исследование количественно определило влияние тока I , скорости V и ширины контакта W на максимальную температуру и протяженность зоны расплава. В исследованном диапазоне увеличение тока на

каждые 10 А повышало максимальную температуру примерно на 300 °С. Увеличение скорости на 100 мм/мин снижало ее примерно на 150 °С, поскольку уменьшалось время нагрева единицы длины. Увеличение ширины контакта на 0,2 мм снижало максимальную температуру приблизительно на 200 °С из-за уменьше-

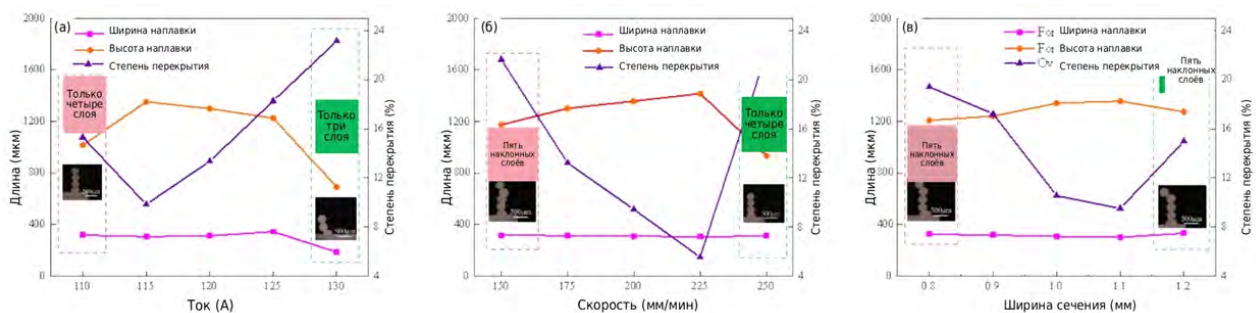
ния плотности тока при неизменной силе тока.

Моделирование позволило определить технологические окна, в которых нагрев достаточен для расплавления и соединения слоев, но не настолько велик, чтобы вызвать обрушение конструкции или чрезмерное повторное плавление нижних слоев.

Инженерия аддитивного производства



Макроскопическая морфология однопроводных многослойных стенок при разных параметрах процесса: (а) изменение тока; (б) изменение скорости; (с) изменение ширины контакта.



Влияние (а) тока, (б) скорости и (с) ширины контакта на морфологию поперечного сечения, размеры и коэффициент перекрытия однопроводной многослойной стенки.

Анализ макроструктуры и геометрии

На рисунке показан макроскопический вид сверху однопроводных пятислойных стенок, изготовленных при разных параметрах: токе 100-140 А, скорости 100-300 мм/мин и ширине контакта 0,6-1,4 мм. Наилучшее макроскопическое качество - плоская поверхность без деформаций и зазоров - получено при токе 120 А, скорости 200

мм/мин и ширине контакта 1,0 мм. Отклонения от этих значений заметно ухудшали качество формирования. Изменение тока или ширины контакта влияло на степень расплавления проволоки: при недостаточном расплавлении ухудшалось сцепление, а при чрезмерном происходило обрушение. Изменение скорости осаждения нарушало стабильность формирования слоев и приводило

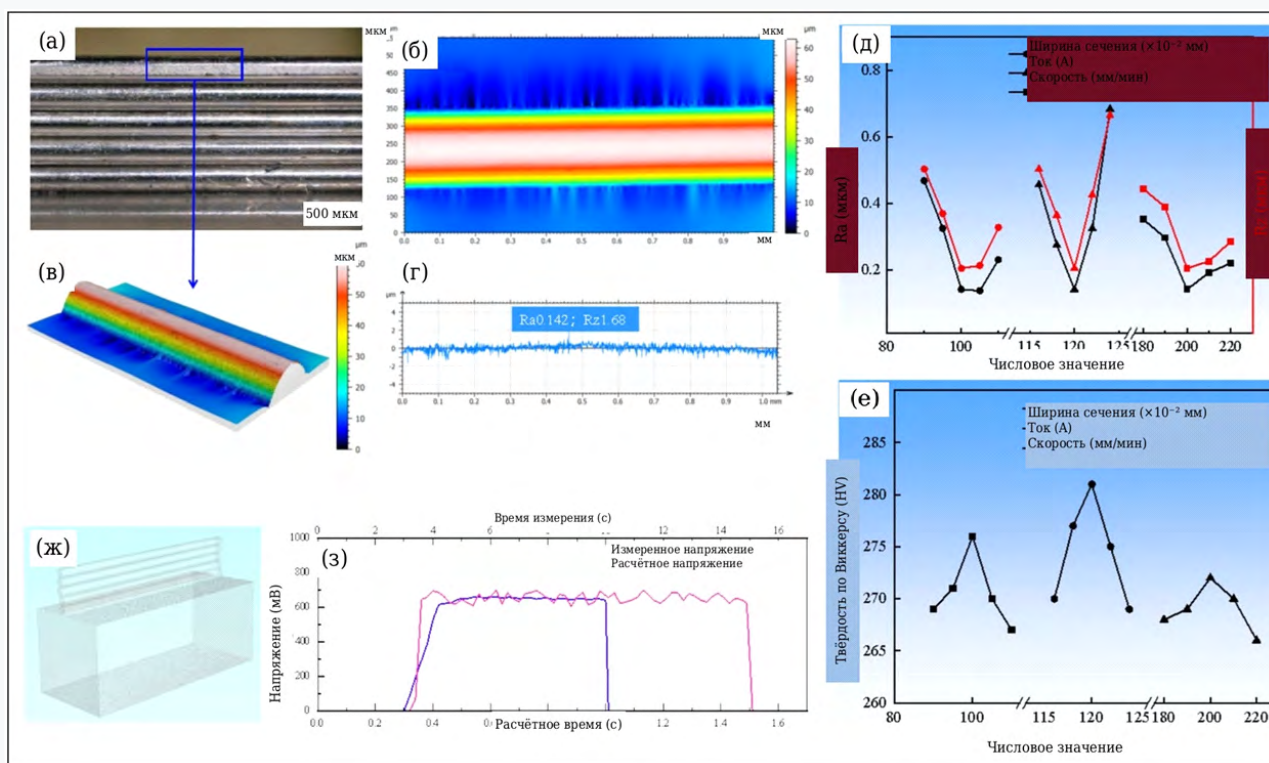
к неоднородному качеству поверхности.

Влияние тока, скорости и ширины контакта на морфологию поперечного сечения, размеры и коэффициент перекрытия однопроводных многослойных стенок показано на рис. 8а-с. В определенном диапазоне постепенное увеличение тока увеличивает ширину стенки и одновременно уменьшает ее высоту. Изменение ширины выражено

значительно слабее изменения высоты, а коэффициент перекрытия постепенно растет из-за усиления тепловыделения при большем токе. Физически увеличение тока повышает джоулево тепловыделение $Q = I^2 R t$ и температуру ванны расплава. При этом уменьшаются вязкость и поверхностное натяжение жидкого металла, улучшаются его текучесть и смачиваемость. Расплав легче растекается по подложке, формируя более широкий валик меньшей высоты.

Увеличение скорости заметно снижает степень соединения слоев: ширина уменьшается, а высота возрастает. Причиной служит снижение погонной энергии, то есть числа джоулей на миллиметр. При меньшей тепловой энергии на единицу длины объем ванны расплава сокращается, а затвердевание ускоряется. Металл затвердевает до того, как успеваешь полностью растечься в стороны, поэтому формируется более узкий и высокий валик. Увеличение ширины кон-

такта повышает только высоту; ширина стенки и коэффициент перекрытия при этом уменьшаются. Особенно заметный эффект наблюдался при переходе от 0,9 к 1,0 мм: коэффициент перекрытия снизился на 38,71% относительно предыдущего значения. Это связано с увеличением площади контакта и снижением плотности тока, из-за чего тепловыделение распределяется по большей площади, а степень расплавления проволоки уменьшается.



Шероховатость поверхности, твердость и экспериментальная проверка однократной многослойной стенки: (а) фактическое место измерения шероховатости; (б) стереомодель результатов; (в) длина и результат измерения; (д) распределение шероховатости; влияние параметров процесса на (е) шероховатость поверхности и (ф) твердость поперечного сечения; (г) трехмерное перспективное сканирование стенки; (х) сопоставление расчетного и измеренного напряжения.

Проверка модели

Ключевой этап проверки мультифизической модели - сопоставление электрического отклика. Расчетное и экспериментально измеренное напряжения между роликом и подложкой при осаждении с током $I = 120$ А и скоростью $V = 200$ мм/мин. Расчетное напряжение остается стабильным и составляет около 600 мВ, что отражает стационарное контактное сопротивление в модели. Экспериментальное напряжение колеблется вокруг этого уровня, приблизительно в диапазоне 550-650 мВ, что ожидаемо из-за небольших изменений контактного давления и состояния поверхности в реальном времени.

Корректность мультифизической модели подтверждается как электрическими, так и геометрическими характеристиками. Средняя ошибка напряжения остается ниже 10%, а сопоставление расчетных размеров ванны расплава с экспериментальными поперечными сечениями валиков показывает хорошее соответствие геометрических тенденций. Модель правильно предсказывает расширение зоны сплавления с ростом тока и ее сужение с увеличением скорости. Это подтверждает способность модели описывать термомеханическую связь во время осаждения и прогнозировать процесс ЖНАМ.

Заключение

В работе комплексно исследован процесс аддитивного производства с джоулевым нагревом (ЖНАМ) на основе связанного мультифизического моделирования и экспериментальной проверки.

Основные выводы:

1. Численная модель успешно предсказывает образование характерного бивнеобразного температурного поля при многослойном осаждении. Оно возникает в результате динамического баланса между локальным джоулевым нагревом, отводом тепла в ролик и накоплением тепла в формируемом валике.
2. Параметры процесса - ток, скорость и ширина контакта - определяют максимальную температуру, размер ванны расплава и, следовательно, геометрическую точность стенки. Для нержавеющей стали 304 оптимальная макроскопическая морфология получена при 120 А, 200 мм/мин и ширине 1,0 мм.
3. Увеличение тока повышает ширину и степень межслойного сплавления, то есть перекрытие, но уменьшает высоту. Увеличение скорости снижает ширину и перекрытие, но может увеличить высоту. Увеличение ширины контакта повышает высоту, одновременно уменьшая ширину и перекрытие.
4. Шероховатость поверхности R_a и R_z и микротвердость поперечного сечения немонотонно зависят от параметров процесса, что указывает на наличие оптимальных технологических окон для качества поверхности и механических свойств. Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных сигналов напряжения подтверждает достоверность связанной электротепловой модели.
5. ЖНАМ сочетает низкую мощность - менее 1 кВт, простоту и независимость от силы тяжести, что делает процесс перспективным для производства в космосе. Дальнейшая работа будет посвящена многоматериальной печати, управлению микроструктурой и изготовлению более сложных трехмерных деталей.

Литература

1. N.Werkheiser, Overview of NASA initiatives in 3D printing and additive manufacturing. DOD Maintenance Symposium. (M15-4252) (2014).
2. Liu, Y., Zhou, J. & Zhang, X. Application and prospect of additive manufacturing technology in manned space engineering. J. Beijing Univ. Aeronaut. Astronaut. 49(1), 83–91 (2023) ((in Chinese)).
3. Chinese Society of Astronautics. Scientific and technical problems in the field of astronautics in 2020 were published 2020-09-18.
4. 2022 China's Space Program: A 2021 Perspective. The State Council Information Office of the People's Republic of China.
5. M. Johnston, M. Werkheiser, K. Cooper, M. Snyder, J. Edmunson, 3D printing in Zero-G ISS technology demonstration. AIAA SPACE 2014 Conference and Exposition, San Diego 4470 (2014).
6. T. Prater, Q. Bean, N. Werkheiser, 3D printing in Zero G technology demonstration mission: summary of on-orbit operations, material testing and future work. NASA Technical Reports Server M16-559 (2016).
7. Prater, T., Werkheiser, N. & Ledbetter, F. Summary Report on Phase I and Phase II Results from the 3D Printing in Zero-G Technology Demonstration Mission (NASA Technical Reports Server, 2018).
8. Prater, T. et al. Analysis of specimens from phase I of the 3D printing in Zero G technology demonstration mission. Rapid Prototyp. J. 23(6), 1212–1225 (2017).
9. Prater, T. et al. 3D printing in Zero G technology demonstration mission: complete experimental results and summary of related material modeling efforts. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 101(1), 391–417 (2019).
10. G. Musso, G. Lentini, L. Enrietti, C. Volpe, E. P. Ambrosio, M. Lorusso, G. Mascetti, G. Valentini, Portable on orbit printer 3D: 1st European additive manufacturing machine on international space station 643-655 (2016).
11. Chen, Y. et al. Research progress of spatial 3D printing of composites. Compos. Sci. Eng. 6, 122–128 (2022) ((in Chinese)).
12. H. Robert, C. Jesse, J. Greg, S. Jeffrey, D. Robert, A. Steve, SpiderFab: Process for on-orbit construction of kilometer-scale apertures: HQ-E-DAA-TN62833, NASA Technical Reports Server (2018).
13. S. Patane, E. R. Joyce, M. P. Snyder, P. Shestopole, Archinaut: In-space manufacturing and assembly for next-generation space habitats 522 (2017).
14. R. Hafley, K. Taminger, R. Bird, Electron beam freeform fabrication in the space environment 1154 (2007).
15. Zocca, A. et al. Enabling the 3D printing of metal components in μ -gravity. Adv. Mater. Technol. 4(10), 1900506 (2019).
16. J. Haung, J. Luo, K. Zhang, J. Cui, H. Yi, L. Qi, Development of a metal micro-droplet ejecting equipment for manipulation jetting trajectory, IEEE 101-104 (2018).
17. Wang Zhen, Z., Li, X., Gong, W. & Qi, J. Experimental study on FDM variable gravity forming. New Technol. New Process. 12, 33–36 (2018) ((in Chinese)).
18. Chen, J., Ding, N., Li, Z. & Wang, W. Organic polymer materials in the space environment. Prog. Aerosp. Sci. 83, 37–56 (2016).
19. Yang, J., Li, J., Wu Wenjie, W. & Yu, N. Research status and prospect of on-orbit additive manufacturing technology for large space truss. Mater. Rev. 35(03), 3159–3167 (2019).
20. Yan, J. et al. Research of materials and manufacturing technology system for on-orbit manufacturing, E3S web of conferences. EDP Sci. 385, 01015 (2023).
21. Li, E., Zhou, Z., Wang, L., Zou, R. & Yu, A. Particle scale modelling of powder recoating and melt pool dynamics in laser powder bed fusion additive manufacturing: A review. Powder Technol. 409, 117789 (2022).
22. Talignani, A. et al. A review on additive manufacturing of refractory tungsten and tungsten alloys. Addit. Manuf. 58, 103009 (2022).
23. Sames, W., List, F., Pannala, S., Dehoff, R. & Babu, S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. Int. Mater. Rev. 61, 315–360 (2016).
24. Galati, M. & Iuliano, L. A literature review of powder-based electron beam melting focusing on numerical simulations. Addit. Manuf. 19, 1–20 (2018).
25. Chen, H. et al. Powder-spreading mechanisms in powder-bed-based additive manufacturing: experiments and computational modeling. Acta Mater. 179, 158–171 (2019).
26. Gu, D. et al. Material-structure. Performance integrated laser-metal additive manufacturing. Science 372, 1487 (2021).
27. Wu, B. et al. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. Manuf. Process. 35, 127–139 (2018).
28. Cunningham, C. R., Flynn, J. M., Shokrani, A., Dhokia, V. & Newman, S. T. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. Addit. Manuf. 22, 672–686 (2018).
29. Li, R., Zhang, H., Dai, F., Huang, C. & Wang, G. End lateral extension path strategy for intersection in wire and arc additive manufactured 2319 aluminum alloy. Rapid Prototyp. 26(2), 360–369 (2020).
30. Li, R. et al. Optimization of the geometry for the end lateral extension path strategy to fabricate intersections using laser and cold metal transfer hybrid additive manufacturing. Addit. Man. 36, 101546 (2020).
31. Li, R. et al. Effect of path strategy on residual stress and distortion in laser and cold metal transfer hybrid additive manufacturing. Addit. Manuf. 46, 102203 (2021).
32. Taşdemir, A. & Nohut, S. An overview of wire arc additive manufacturing (WAAM) in shipbuilding industry. Ships Offshore Structures. <https://doi.org/10.1080/17445302.2020.1786232> (2020).
33. Shahedi Asl, M. et al. Formation of Al–Al₂O₃ core-shell nanosphere chains during electron beam melting of γ -TiAl. Intermetallics 136, 107261 (2021).
34. Gao, R., Peng, H., Guo, H. & Chen, B. An innovative way to fabricate γ -TiAl blades and their failure mechanisms under thermal shock. Scr. Mater. 203, 114092 (2021).
35. Gao, B., Peng, H., Liang, Y., Lin, J. & Chen, B. Electron beam melted TiC/high Nb-TiAl nanocomposite: microstructure and mechanical property. Mater. Sci. Eng. A 811, 141059 (2021).
36. Yue, H. et al. Microstructure and mechanical properties of Y203-bearing Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy prepared by selective electron beam melting. Mater. Sci. Eng. A 840, 142960 (2022).
37. Kim, Y. K., Hong, J. K. & Lee, K. A. Enhancing the creep resistance of electron beam melted gamma Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy by using two-step heat treatment. Intermetallics 121, 106771 (2020).
38. Kan, W., Chen, B., Jin, C., Peng, H. & Lin, J. Microstructure and mechanical properties of a high Nb-TiAl alloy fabricated by electron beam melting. Mater. Des. 160, 611–623 (2018).
39. Jhavar, S., Jain, N. K. & Paul, C. P. Development of micro-plasma transferred arc (IPTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications. J. Mater. Process. Technol. 214(5), 1102–1110 (2014).
40. Wang, C., Suder, W., Ding, J. & Williams, S. The effect of wire size on high deposition rate wire and plasma arc additive manufacture of Ti-6Al-4V. J. Mater. Process. Technol. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116842> (2021).
41. Ma, K. et al. Study on the process characteristics based on Joule heat of sliding-pressure additive manufacturing. Materials 16(5), 2017 (2023).



Екатеринбург

**16–19
марта
2027**

МЕТАЛЛУРГИЯ. ЛИТМАШ. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

выставка технологий, оборудования
для металлургии и литейной
промышленности, а также
готовой металлопродукции



г. Екатеринбург,
Экспо-бульвар, 2.
МВЦ «Екатеринбург-
Экспо»

35 000 м²

общая площадь

12 000

посетителей

300+

экспонентов

7

стран

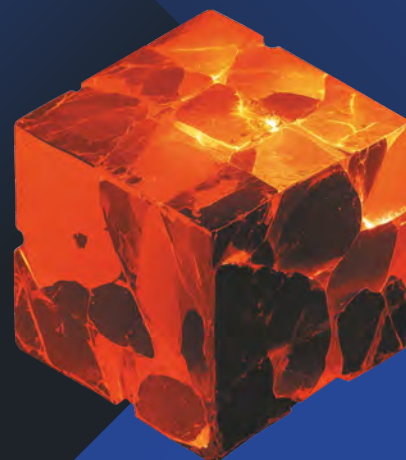
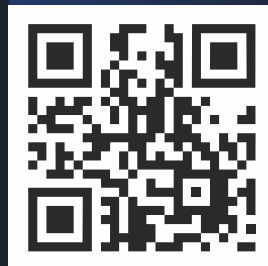
Успевайте
забронировать стенд
в лучшей локации!

Узнайте, есть ли для вашей
компании специальные
условия участия

Подписывайтесь
на наш канал
в MAX:



MAX



metalmash.proexpo.ru

НЕ ЗАРЖАВЕЕТ. ЖЕЛЕЗНО.



Построение карт печатаемости Inconel 718 при лазерном сплавлении в слое порошка на основе данных с использованием AIMPOD

Аннотация

Построение карт печатаемости при лазерном сплавлении в слое порошка (LPBF) сплава Inconel 718 остается сложной задачей, поскольку относительная плотность определяется совместным влиянием мощности лазера, скорости сканирования, шага штриховки, толщины слоя, размера лазерного пятна, характеристик порошка, атмосферы и геометрии печатаемого образца. Традиционная разработка процесса методом проб и ошибок и однофакторные правила, основанные на плотности энергии, зачастую недостаточны для выявления устойчивых технологических окон в неоднородных наборах данных LPBF. В настоящем исследовании разработана основанная на данных схема построения карт печатаемости, ориентированная исключительно на относительную плотность и использующая рабочий процесс

Artificial Intelligence-based Manufacturing Process Optimization and Design (AIMPOD). Проанализирован набор данных из 241 режима LPBF, где откликом служила относительная плотность. Исследуемое окно включало мощность лазера 90–400 Вт, скорость сканирования 100–2000 мм/с, шаг штриховки 0,05–0,25 мм и относительную плотность 81,44–99,94%. Среди оцененных моделей машинного обучения наилучшие индивидуальные результаты на тестовой выборке показал градиентный бустинг: $R^2 \approx 0,69$, $RMSE \approx 0,84$ процентного пункта и $MAE \approx 0,61$ процентного пункта. Оптимизированный ансамбль повысил качество на тестовой выборке до $R^2 = 0,72$ и $RMSE = 0,79$ процентного пункта. Анализ интерпретируемости показал, что доминирующими предикторами являются скорость сканирования, мощность лазера и шаг штриховки. Разработанная схема AIMPOD обеспечива-

ет интерпретируемый способ построения карт печатаемости Inconel 718 при LPBF и масштабируется на задачи производства, основанного на данных.

Введение

Лазерное сплавление в слое порошка (LPBF) стало одним из основных методов металлического аддитивного производства для непосредственного изготовления по цифровым моделям геометрически сложных и дорогостоящих компонентов. В этом процессе сфокусированный лазер выборочно расплавляет тонкие слои металлического порошка, а итоговое качество детали зависит от тесно связанных тепловых, геометрических, порошковых и атмосферных условий. Процесс привлекателен возможностью изготовления деталей, близких к окончательной форме, снижением отходов материала и свободой проектирования, труднодостижимой при традиционной механической обработке. Современные исследования металлического аддитивного производства подчеркивают его потенциал для распределенного производства и изготовления деталей по требованию. Sames и соавт. [1] рассмотрели металлургию металлического АП и отметили важность теплопередачи, затвердевания, образования дефектов и постобработки для формирования конечных свойств [1, 2]. DebRoy и соавт. показали, что характеристики металлических АМ-компонентов определяются взаимосвязями «процесс–структура–свойства», а Lewandowski и Seifi рассмотрели влияние дефектов АМ, анизотропии и истории процесса на механические свойства различных металлических сплавов [3, 4].

Inconel 718 является одним из важнейших сплавов для LPBF благодаря высокой прочности при повышенных температурах, коррозионной стойкости и широкому применению в аэрокосмической технике, турбинах, атомной энергетике и энергетическом машиностроении. Вместе с тем квалификация этого сплава сложна,

поскольку его поведение при LPBF зависит от уплотнения, пористости, устойчивости ванны расплава, остаточных напряжений, микроструктуры и режима термообработки. Jia и Gu [5] исследовали селективное лазерное плавление Inconel 718 и показали, что режимы обработки определяют уплотнение, микроструктуру, микротвердость, износ и окисление. Amato и соавт. [6] изготовили Inconel 718 в атмосферах аргона и азота и обнаружили столбчатые зерна, выраженную текстуру и микроструктурные особенности, связанные с выделением фаз в состоянии после построения. Chlebus и соавт. [7] изготовили методом SLM образцы Inconel 718 высокой плотности и изучили влияние ориентации построения и термообработки на микроструктуру и механическое поведение. Moussaoui и соавт. [8] оценили параметры SLM для Inconel 718 и показали, что пористость, микроструктура и механические свойства изменяются в зависимости от условий изготовления. Эти работы показывают, что поведение Inconel 718 при LPBF определяется не одним параметром, а их совместным технологическим окном.

Среди показателей качества LPBF относительная плотность особенно важна, поскольку она непосредственно отражает степень консолидации материала и наличие режимов, склонных к образованию дефектов. Низкая относительная плотность обычно связана с порами несплавления, нестабильными треками, образованием шариков, газовой пористостью или порами, возникающими в кейхольном режиме, тогда как высокая относительная плотность указывает на более устойчивую область печати. Kumar и соавт. [9] исследовали влияние мощности лазера и скорости сканирования на пористость Inconel 718 и установили, что с увеличением мощности лазера пористость быстро снижается и меняется со скоростью сканирования; подходящие сочетания мощности и скорости позволяют получать плотные детали.

Balbaa и соавт. [10] разработали карты процесса для Inconel 718 с одновременным учетом плотности, шероховатости поверхности и остаточных напряжений, показав, что одной высокой плотности недостаточно для выполнения всех требований к характеристикам. Liu и соавт. [11] исследовали Inconel 718, изготовленный LPBF при различных параметрах, и показали, что морфология пор изменяется с подводом энергии, включая поры несплавления, газовые поры и кейхольные поры. Shao и соавт. [12] исследовали шаг штриховки и повторное лазерное переплавление и показали влияние тепловой истории, связанной с шагом штриховки, на микроструктуру и кристаллографическую текстуру LPBF IN718. Mao и соавт. [13] изучили влияние шага штриховки и сообщили об изменениях пористости, микротвердости и износостойкости деталей Inconel 718. Jiang и соавт. [14] исследовали изготовление инструментальной оснастки из Inconel 718 методом LPBF и определили сочетание мощности лазера, скорости сканирования, шага штриховки и толщины слоя, обеспечивающее улучшенное качество печати. Следовательно, для прогнозирования плотности необходима модель, способная одновременно учитывать мощность, скорость, шаг штриховки, толщину слоя, геометрию и характеристики порошка.

Физическая сложность построения карт печатаемости LPBF связана с сосуществованием нескольких механизмов образования дефектов. При низком эффективном подводе энергии ванна расплава может быть слишком мелкой или прерывистой, что приводит к пористости из-за несплавления. При чрезмерном подводе энергии испарение, давление отдачи, образование кейхольного углубления и брызги могут дестабилизировать ванну расплава. King и соавт. [15] экспериментально наблюдали кейхольный режим лазерного плавления и показали, что схлопывание кейхола может образовывать пустоты позади лазерного

луча. Khairallah и соавт. [16] использовали высокоточную модель в масштабе частиц порошка для демонстрации роли давления отдачи, конвекции Марангони, течения расплава, пор, брызг и зон денудации в LPBF. Matthews и соавт. [17] изучили денудацию слоев металлического порошка и показали, что параметры лазера и давление окружающего газа влияют на удаление порошка вблизи трека сканирования. Bidare и соавт. [18] совместили съемку процесса и моделирование для исследования динамики жидкости и частиц, подтвердив сильную взаимосвязь движения порошка, поведения парогазового факела и динамики ванны расплава. Tang и соавт. [19] предложили геометрическую модель пористости вследствие несплавления и показали, что шаг штриховки, толщина слоя и поперечное сечение ванны расплава влияют на дефекты, возникающие из-за недостаточного перекрытия. Эти исследования механизмов объясняют, почему простой показатель объемной плотности энергии или однофакторные карты процесса могут быть недостаточны для надежной оценки печатаемости.

Из-за высокой стоимости экспериментальной квалификации и сложности физических моделей методы, основанные на данных, приобретают все большее значение для LPBF. Машинное обучение (ML) позволяет выявлять нелинейные связи «процесс-отклик» в экспериментальных данных, сравнивать влияние конкурирующих параметров и быстро интерполировать в пределах исследованных областей процесса. Gobert и соавт. [20] применили обучение с учителем к изображениям высокого разрешения для обнаружения дефектов при сплавлении в порошковом слое, продемонстрировав потенциал ML для контроля качества *in situ*. Scime и Beuth [21] разработали основанную на компьютерном зрении систему обнаружения и классификации аномалий в процессе лазерного аддитивного производства в

порошковом слое. Baumgartl и соавт. [22] использовали термографию и глубокое обучение для обнаружения дефектов LPBF и получили высокую способность распознавания дефектов. Li и соавт. [23] рассмотрели применение машинного обучения в LPBF и подчеркнули, что ML может поддерживать предварительную обработку, мониторинг *in situ* и постобработку за счет выявления скрытых зависимостей в сложных наборах данных. Theeda и соавт. [24] разработали модель искусственной нейронной сети для оптимизации LPBF, использующую мощность лазера, скорость сканирования и шаг штриховки для прогнозирования относительной плотности и других показателей качества. Barrionuevo и соавт. [25] опубликовали крупный набор данных LPBF по относительной плотности, содержащий 1579 записей и такие переменные, как тип материала, метод измерения плотности, атмосфера и геометрия печатаемого образца. Khalad и соавт. предложили обобщенную ML-схему прогнозирования относительной плотности деталей LPBF, тогда как Roy и соавт. разработали ML-модель на основе химического состава для прогнозирования дефектов и сообщили о точности 92,3% при прогнозировании дефекта образования шариков [26, 27]. Lu и Shi [28] специально исследовали прогнозирование относительной плотности аддитивно изготовленного Inconel 718 с помощью нейронных сетей, оптимизированных генетическим алгоритмом.

Несмотря на достигнутый прогресс, литература по-прежнему разделена между экспериментальным построением карт процесса LPBF, физическим анализом механизмов дефектов, мониторингом *in situ* и общими исследованиями прогнозирования с помощью ML. Существующие исследования Inconel 718 дают ценные зависимости «процесс–свойства», однако часто ограничены узкими диапазонами параметров конкретных экспериментов, отдельными семействами моделей или слабо интер-

претируемыми процедурами прогнозирования. Настоящая работа устраняет этот пробел за счет применения схемы Artificial Intelligence-based Manufacturing Process Optimization and Design (AIMPOD) к собранному из литературы набору данных LPBF для Inconel 718. Объединение экспериментальных режимов из нескольких исследований обеспечивает более широкое окно процесса, чем обычно доступно в одной экспериментальной кампании. Относительная плотность используется как рабочий показатель печатаемости, основанной на степени уплотнения, а рабочий процесс объединяет разведочный анализ, сравнительное тестирование моделей, ансамблевое обучение, интерпретацию с помощью SHAP и перестановочных методов и построение карт параметрической чувствительности. Полученная модель предназначена для интерполяции и интерпретации технологического окна в пределах экспериментально представленной области. Она не предназначена для неограниченной экстраполяции за пределы наблюдавшихся диапазонов параметров; кроме того, одна относительная плотность не отражает такие важные показатели качества, как растрескивание, шероховатость поверхности, остаточные напряжения, микроструктура и механические свойства. Поэтому предложенную схему следует рассматривать как интерпретируемый, основанный на данных инструмент поддержки принятия решений для прогнозирования относительной плотности, а не как полноценную квалификационную модель LPBF Inconel 718.

1. Материалы и методы

Лазерное сплавление в слое порошка (LPBF) представляет собой послойный аддитивный процесс, в котором сфокусированный лазер выборочно расплавляет участки тонкого слоя металлического порошка в соответствии с послойным представлением геометрии цифровой детали. Возникающий тепловой отклик

определяется совместным влиянием мощности лазера, скорости сканирования, шага штриховки, толщины слоя, размера лазерного пятна, характеристик порошка и атмосферы построения. Для Inconel 718 неподходящие сочетания этих параметров могут способствовать возникновению пор несплавления, кейхольных дефектов, нестабильных треков расплава и снижению целостности детали.

В качестве основной выходной переменной была выбрана относительная плотность, поскольку она представляет собой практический количественный показатель консолидации материала и устойчивости процесса с точки зрения пористости. Высокая относительная плотность обычно свидетельствует об эффективном уплотнении порошка, тогда как более низкие значения связаны с большей вероятностью режимов, склонных к образованию дефектов. Таким образом, прогнозирование относительной плотности по дескрипторам LPBF дает полезную основу для выявления экспериментально подтвержденных окон уплотнения и построения основанных на данных карт печатаемости Inconel 718.

1.1 Описание набора данных и переменные процесса LPBF

В исследовании используется подготовленный набор данных по лазерному сплавлению Inconel 718 в слое порошка, собранный из ранее опубликованных экспериментальных работ. В нем параметры процесса, характеристики порошка, среда построения, геометрия печатаемого образ-

ца и измеренная относительная плотность связаны на уровне каждого отдельного режима обработки [25]. Inconel 718 выбран потому, что это широко применяемый высокоэффективный никелевый суперсплав для аэрокосмической техники, турбин, атомной энергетики и энергетического оборудования, при этом его поведение при LPBF сильно зависит от совместных режимов, определяющих пористость, устойчивость ванны расплава и целостность детали. Объединение данных из нескольких исследований дает более широкое экспериментально подтвержденное технологическое окно, чем обычно доступно в рамках одной экспериментальной кампании, хотя одновременно неизбежно вносит неоднородность, связанную с различиями в оборудовании, состоянии порошка, конфигурации образцов и методах измерений. Относительная плотность была выбрана рабочим показателем печатаемости по степени уплотнения, поскольку количественно характеризует консолидацию материала и устойчивость процесса по пористости; однако сама по себе она не характеризует растрескивание, шероховатость поверхности, остаточные напряжения, микроструктуру и механические свойства. После очистки и согласования данных итоговый набор включал 241 режим LPBF, использованный для построения регрессионных моделей с обучением с учителем для прогнозирования относительной плотности образцов Inconel 718 (табл. 1).

Таблица 1. Репрезентативные атмосферы и геометрии образцов в модели LPBF

Признак	Количество	Число уникальных значений	Мода
Атмосфера	241	2	Азот, аргон
Геометрия образца	241	3	Призматическая, NI, образцы на растяжение

Таблица 2. Параметрическое окно проектирования модели LPBF для различных атмосфер

Режим атмосферы	Мощность лазера, Вт	Скорость сканирования, мм/с	Шаг штриховки, мм
Аргон	90–400	100–2000	0,06–0,25
Азот	150–370	500–1500	0,05–0,14
Рабочее окно LPBF	90–400	100–2000	0,05–0,25

Для i-го режима обработки входной вектор задавался как

$$x_i=[P_i, v_i, h_i, t_i, d_i, G_i, D_{50,i}, A_i, Q_i]$$

где P — мощность лазера, v — скорость сканирования, h — шаг штриховки, t — толщина слоя, d — размер лазерного пятна, G — геометрический фактор, D₅₀ — медианный размер частиц порошка, A — атмосфера процесса, Q — категория геометрии печатаемого образца. Выходом модели была измеренная относительная плотность: $y_i=RD_i$.

Таблица 3. Сводная статистика непрерывных параметров процесса и показателей модели LPBF. Для читабельности полный набор столбцов исходной таблицы представлен в трех частях.

Таблица 3а. Центральные характеристики и границы

Параметр	Среднее	Медиана	Мода	Мин.	Макс.
Мощность лазера, Вт	240,2199	220	170	90	400
Скорость сканирования, мм/с	898,6307	800	800	100	2000
Шаг штриховки, мм	0,101328	0,1	0,08	0,05	0,25
Толщина слоя, мм	0,039402	0,04	0,04	0,02	0,062
Размер пятна, мм	0,20739	0,1	0,1	0,07	0,4
Геометрический фактор	49,74328	41,99793	89,99468	1	89,99468
D ₅₀ , мкм	30,41942	30	30	22,5	39,98
Относительная плотность, %	97,62199	98,24	98,19	81,44	99,94

Таблица 3б. Квартили и размах

Параметр	Q1	Q3	IQR	Размах
Мощность лазера, Вт	175	300	125	310
Скорость сканирования, мм/с	680	1050	370	1900
Шаг штриховки, мм	0,08	0,12	0,04	0,2
Толщина слоя, мм	0,038	0,04	0,002	0,042
Размер пятна, мм	0,1	0,4	0,3	0,33
Геометрический фактор	24,83333	89,99468	65,16135	88,99468
D ₅₀ , мкм	30	32	2	17,48
Относительная плотность, %	97,47	98,82	1,35	18,5

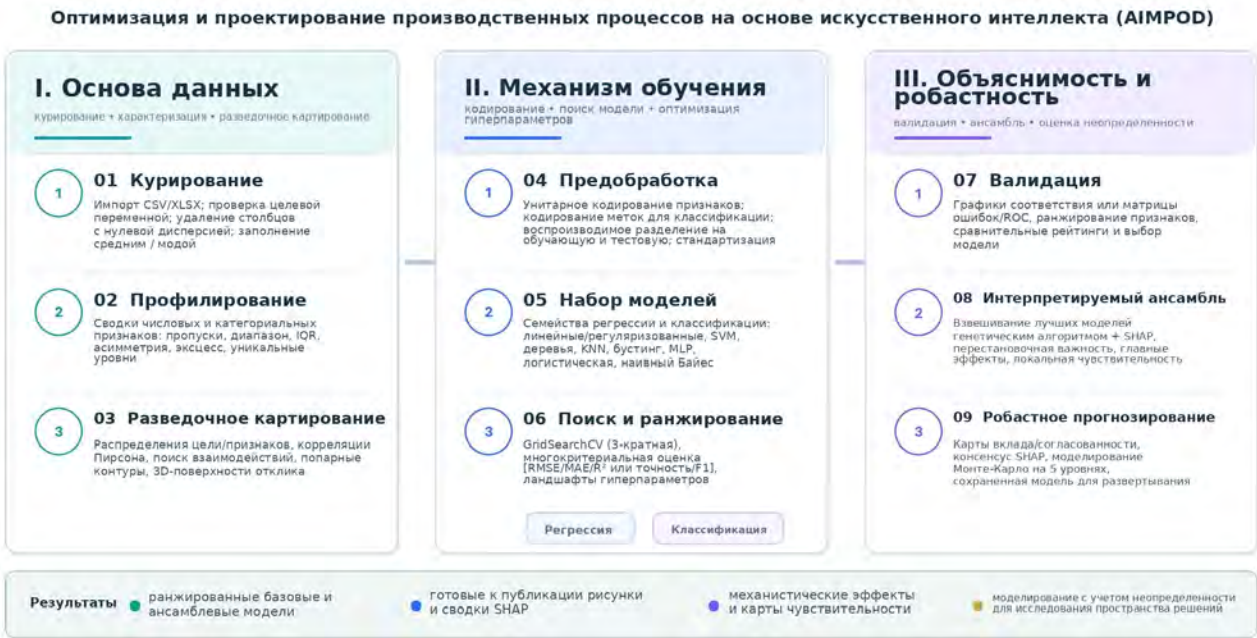
Таблица 3в. Разброс и форма распределения

Параметр	Ст. откл.	Дисперсия	Асимметрия	Экссесс
Мощность лазера, Вт	76,23831	5812,281	0,238715	-0,8442
Скорость сканирования, мм/с	349,2507	121976	1,083921	1,676023
Шаг штриховки, мм	0,026769	0,000717	1,272278	4,303031
Толщина слоя, мм	0,008309	6,90×10 ⁻⁵	0,462765	0,699577
Размер пятна, мм	0,149549	0,022365	0,505268	-1,7321
Геометрический фактор	32,74427	1072,187	0,235177	-1,61394
D ₅₀ , мкм	2,557048	6,538495	-0,90523	5,087364
Относительная плотность, %	2,490841	6,204287	-3,52399	15,59336

1.2 Построение карт печатаемости на основе AIMPOD

Система Artificial Intelligence-based Manufacturing Process Optimization and Design (AIMPOD) была адаптирована в качестве основанной на данных схемы построения карт печатаемости для LPBF Inconel 718. Рабочий процесс реализован в

три связанных этапа: подготовка данных, предиктивное обучение и интерпретация модели. Такая организация позволила преобразовать измеренные данные LPBF в регрессионные модели, ранжирование важности признаков и карты «параметры–отклик».



Artificial Intelligence-based Manufacturing Process Optimization and Design (AIMPOD). Исходная система использует несколько механизмов обучения, метрики интерпретируемости и методы оптимизации для моделирования и оптимизации производственных процессов. В настоящей работе из полного пакета AIMPOD используется выбранный набор методов и инструментов. Подробности приведены в документации пакета.

На этапе подготовки набор данных проверялся на пропущенные значения, несогласованные форматы переменных, повторяющиеся записи и неинформативные дескрипторы. Числовые переменные сохранялись в согласованных инженерных единицах, а категориальные кодировались в машиночитаемые индикаторные переменные. Столбец относительной плотности рассматривался как целевой отклик и проверялся, чтобы все образцы соответствовали физически осмысленным значениям плотности.

Затем выполнялось разведочное картирование распределений переменных LPBF и отклика относительной плотности. Гистограммы и графики числа наблюдений по категориям использовались для оценки плотности выборки в пространстве параметров. Корреляционный анализ Пирсона применялся как начальная диагностика линейных связей первого порядка между дескрипторами и относительной плотностью. При этом корреляция не рассматривалась как полное объяснение печатаемости LPBF, поскольку уплотнение зависит от совместного влияния мощности лазера, скорости сканирования, шага штриховки, толщины слоя, размера луча и характеристик порошка.

Перед обучением модели непрерывные дескрипторы стандартизировали по выражению

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu_j}{\sigma_j}.$$

где x_{ij} — исходное значение признака j в образце i , а μ_j и σ_j — соответственно среднее значение и стандартное отклонение этого признака. Стандартизация использовалась для приведения переменных с различными единицами измерения и масштабами к сопоставимым числовым диапазонам.

1.3 Разработка регрессионных моделей

Задача обучения с учителем была сформулирована как регрессия, в которой дес-

крипторы LPBF использовались для прогнозирования относительной плотности. Набор данных разделили на 192 обучающих и 49 тестовых образцов. Обучающая часть применялась для подгонки моделей и выбора гиперпараметров, а тестовая была зарезервирована для независимой оценки качества.

Чтобы не предполагать заранее определенную форму зависимости между параметрами LPBF и относительной плотностью, рассматривался широкий набор алгоритмов регрессии: обычная линейная регрессия, Ridge, Lasso, регрессия опорных векторов (SVR), дерево решений, случайный лес, градиентный бустинг, AdaBoost, регрессия К ближайших соседей (KNN) и многослойный перцептрон (MLP). Эти модели представляли линейные, регуляризованные, ядерные, дистанционные, древовидные, ансамблевые, бустинговые и нейросетевые семейства обучения.

Оптимизация гиперпараметров выполнялась с помощью перебора по сетке с перекрестной проверкой. Целью было не только минимизировать ошибку прогнозирования, но и установить, лучше ли относительная плотность описывается простыми аддитивными зависимостями или нелинейными взаимодействиями переменных LPBF. Это важно, поскольку печатаемость LPBF может резко изменяться при переходе от недостаточного плавления к устойчивой консолидации или к чрезмерному тепловложению.

1.4 Оценка моделей

Предиктивное качество каждой модели оценивали по коэффициенту детерминации, среднеквадратичной ошибке и средней абсолютной ошибке. Эти метрики рассчитывали как

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}.$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}.$$

и

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|.$$

где y_i — измеренная относительная плотность, $\hat{y}_i$ — прогнозируемая относительная плотность, $\bar{y}$ — средняя измеренная относительная плотность, n — число образцов.

Для сравнения регрессионных моделей совместно использовались графики соответствия, метрики ошибок и рейтинги моделей. Графики соответствия визуально показывали смещение и разброс прогнозов, тогда как численные метрики количественно характеризовали точность. Окончательный выбор модели основывался главным образом на результатах тестовой выборки, поскольку целью было получить модель, способную обобщать в исследуемом пространстве LPBF, а не просто воспроизводить обучающие данные.

1.5 Ансамблевая стратегия прогнозирования

После ранжирования отдельных регрессоров наиболее сильные модели объединили во взвешенный ансамбль. Ансамбль использовался для проверки того, улавливают ли разные алгоритмы обучения взаимодополняющие особенности отклика относительной плотности LPBF. Прогноз ансамбля для образца i выражался как

$$\hat{y}_i^{ens} = \sum_{m=1}^M w_m \hat{y}_i^{(m)}.$$

при ограничениях

$$w_m \geq 0, \quad \sum_{m=1}^M w_m = 1.$$

где $\hat{y}_i^{(m)}$ — прогноз m -й базовой модели, а w_m — ее оптимизированный вклад в ансамбль. Веса ансамбля определялись минимизацией ошибки совокупного прогноза:

$$\min_w \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{m=1}^M w_m \hat{y}_i^{(m)} \right)^2}.$$

Такая взвешенная формулировка позволяет итоговому предиктору сохранять наиболее полезный вклад каждой выбранной модели и одновременно подавлять модели, дающие избыточную или слабую предиктивную информацию.

1.6 Интерпретация модели и построение карт печатаемости

Обученные модели интерпретировали с помощью инструментов атрибуции признаков и картирования отклика. Анализ SHAP использовался для количественной оценки влияния каждой входной переменной на прогнозируемую относительную плотность. Для отдельного образца прогноз модели разлагался как

$$f(\mathbf{x}_i) = \phi_0 + \sum_{j=1}^p \phi_{ij}.$$

где ϕ_0 — базовый прогноз, а ϕ_{ij} — вклад SHAP признака j для образца i . Глобальная важность каждого признака рассчитывалась как среднее абсолютное значение SHAP:

$$I_j^{SHAP} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\phi_{ij}|.$$

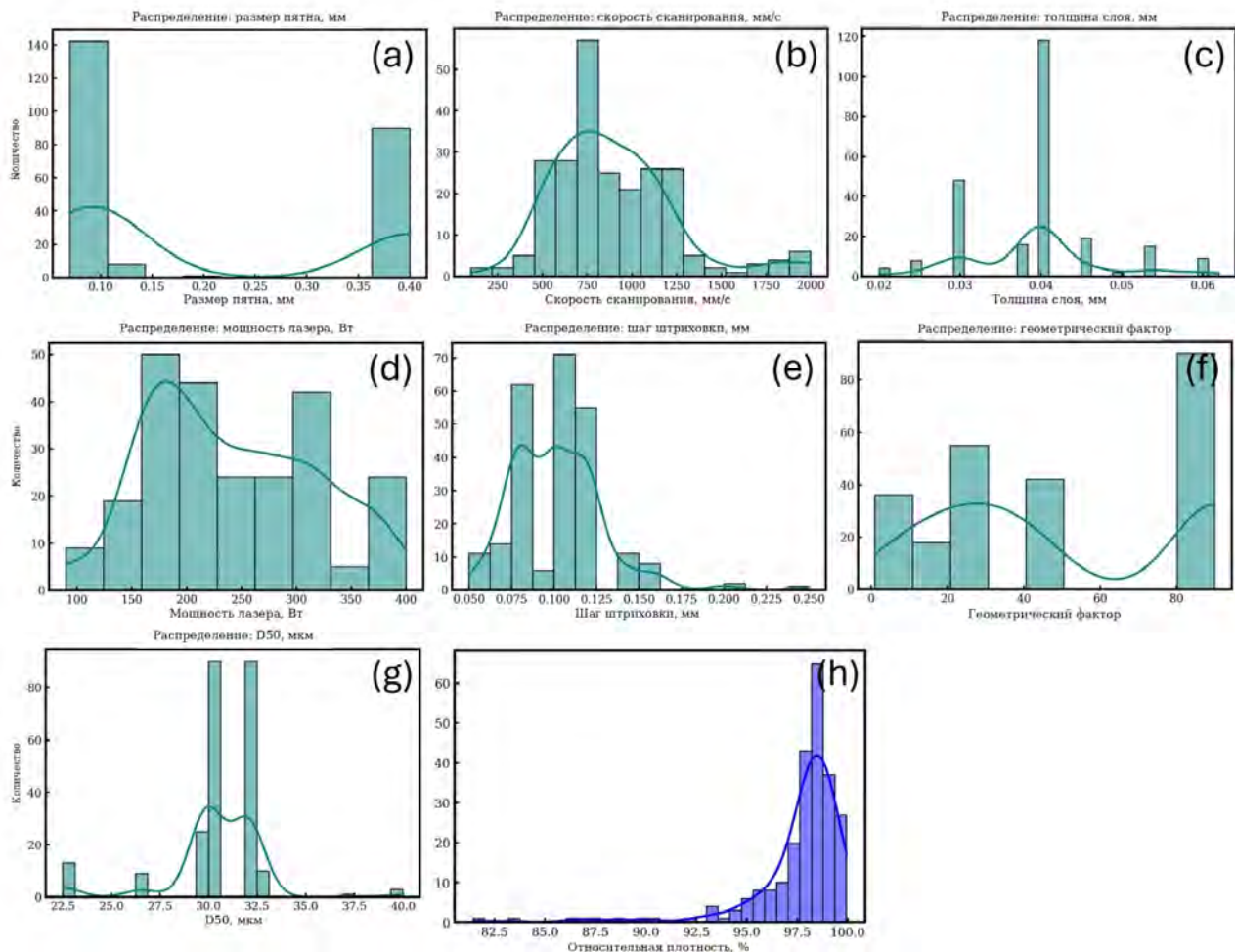
Для ансамблевой модели согласованную атрибуцию признаков рассчитывали путем взвешивания вклада SHAP каждой выбранной базовой модели:

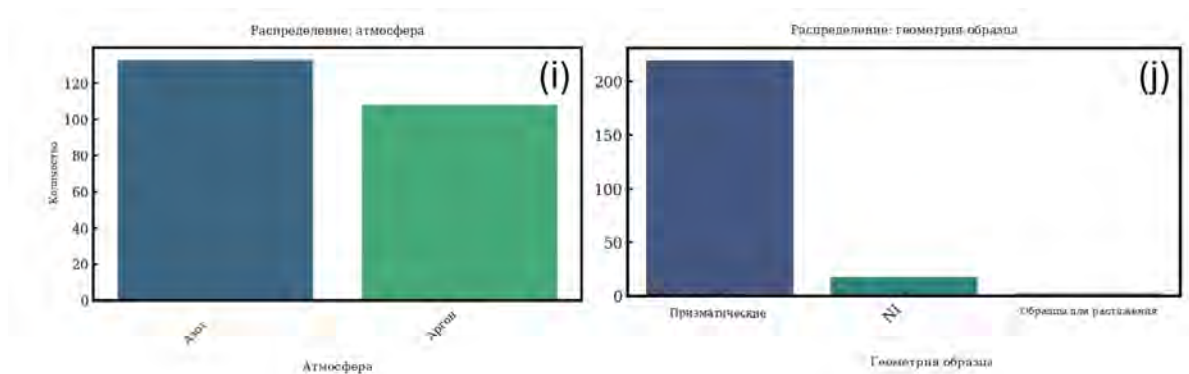
$$\Phi_{ij}^{ens} = \sum_{m=1}^M w_m \phi_{ij}^{(m)}.$$

Этап интерпретации использовался для выявления переменных процесса, наиболее сильно влияющих на уплотнение.

Кроме того, строились двухфакторные карты отклика: обученная модель оценивалась для выбранных пар переменных LPBF при сохранении остальных дескрипторов в структуре наблюдавшихся данных. Эти карты преобразуют регрессионную модель в практическое представление печатаемости. Области с высокой прогнозируемой относительной плотностью интерпретировались как благоприятные технологические зоны, а области низкой плотности связывались с режимами LPBF, склонными к дефектам вследствие недостаточного плавления, слабого перекрытия треков или нестабильного тепловложения.

Таким образом, рабочий процесс AIMPOD объединяет дескрипторы процесса LPBF, предиктивные регрессионные модели, ансамблевое обучение и анализ интерпретируемости в единую схему построения карт печатаемости Inconel 718.





Распределение дескрипторов процесса LPBF и переменных отклика: (a) размер пятна, (b) скорость сканирования, (c) толщина слоя, (d) мощность лазера, (e) шаг штриховки, (f) геометрический фактор, (g) D50 порошка, (h) относительная плотность, (i) атмосфера и (j) геометрия печатаемого образца.

2. Результаты и обсуждение

2.1 Разведочный анализ пространства параметров LPBF и отклика относительной плотности

Описательная статистика в табл. 3 вместе с распределениями на рисунке показывает, что набор данных LPBF охватывает широкое, но структурированное технологическое окно для Inconel 718. Мощность лазера изменяется от 90 до 400 Вт, то есть общий диапазон составляет 310 Вт. Таким образом, максимальная мощность примерно в 4,44 раза выше минимальной, что указывает на наличие в наборе данных как режимов с низким, так и с высоким подводом энергии. Средняя мощность лазера составляет 240,22 Вт, что на 9,19% выше медианного значения 220 Вт. Это умеренное различие между средним и медианой в сочетании с положительной асимметрией 0,239 указывает на небольшую правостороннюю асимметрию распределения мощности, а не на выраженное смещение выборки. Межквартильный размах мощности лазера составляет 125 Вт: от 175 Вт в первом квартиле до 300 Вт в третьем, что соответствует увеличению на 71,4% в пределах центральной половины набора данных. Следовательно, диапазон мощности лазера достаточно широк для регрессионного моделирования и при этом в основном сосредоточен вокруг практически значимых для LPBF режимов.

Скорость сканирования демонстрирует наибольший абсолютный разброс среди основных технологических переменных. Она изменяется от 100 до 2000 мм/с, что дает диапазон 1900 мм/с и отношение максимального значения к минимальному, равное 20. Средняя скорость сканирования составляет 898,63 мм/с, что на 12,3% выше медианного значения 800 мм/с. Стандартное отклонение равно 349,25 мм/с, или приблизительно 38,9% среднего значения, подтверждая, что скорость сканирования является одним из наиболее широко варьируемых дескрипторов в наборе данных. Положительная асимметрия 1,084 и эксцесс 1,676 показывают, что большинство наблюдений сосредоточено в области умеренных скоростей, тогда как меньшее число высокоскоростных режимов формирует верхний хвост распределения. Это также видно на рис. 2: большинство значений скорости сканирования находится приблизительно между 600 и 1200 мм/с, а случаев, приближающихся к пределу 2000 мм/с, заметно меньше.

Шаг штриховки изменяется от 0,05 до 0,25 мм при среднем значении 0,101 мм и медиане 0,100 мм. Близость среднего и медианы показывает устойчивость центральной тенденции, однако положительная асимметрия 1,272 и высокий эксцесс 4,303 указывают на узкий центральный кластер и небольшое число случаев с увеличенным

шагом штриховки. Первый и третий квартили равны соответственно 0,08 и 0,12 мм, поэтому в центральных 50% данных шаг штриховки увеличивается на 50%. Максимальное значение 0,25 мм более чем вдвое превышает значение третьего квартиля, то есть набор данных включает режимы с относительно большим шагом штриховки, способным уменьшать перекрытие дорожек расплава и способствовать несплавлению. Толщина слоя распределена уже, чем скорость сканирования, мощность лазера и шаг штриховки. Среднее значение составляет 0,0394 мм и очень близко к медиане и моде 0,040 мм. Межквартильный размах равен всего 0,002 мм, то есть большая часть наблюдений сосредоточена около широко применяемой для LPBF толщины слоя 40 мкм. При этом полный диапазон простирается от 0,02 до 0,062 мм, поэтому максимальная толщина слоя в 3,1 раза выше минимальной. Это означает, что, несмотря на концентрацию основной части данных около стандартной толщины слоя, модель получает информацию и о более тонких, и о более толстых слоях порошка.

Распределение размера пятна имеет выраженную структуру. Размер пятна изменяется от 0,07 до 0,40 мм, среднее значение составляет 0,207 мм, а медиана — 0,100 мм. Таким образом, среднее приблизительно на 107% выше медианы, что связано с большим числом режимов с крупным пятном. Первый квартиль равен 0,10 мм, третий — 0,40 мм, то есть верхний квартиль в четыре раза превышает нижний. Такой большой межквартильный разброс показывает, что размер пятна не является лишь второстепенной константой, а выступает существенным дескриптором условий взаимодействия лазера с материалом в собранном наборе данных. Геометрический фактор имеет столь же широкое распределение: от 1 до 89,99 при среднем 49,74 и медиане 41,99. Стандартное отклонение 32,74 составляет приблизительно 65,8% среднего, подтверждая значительную

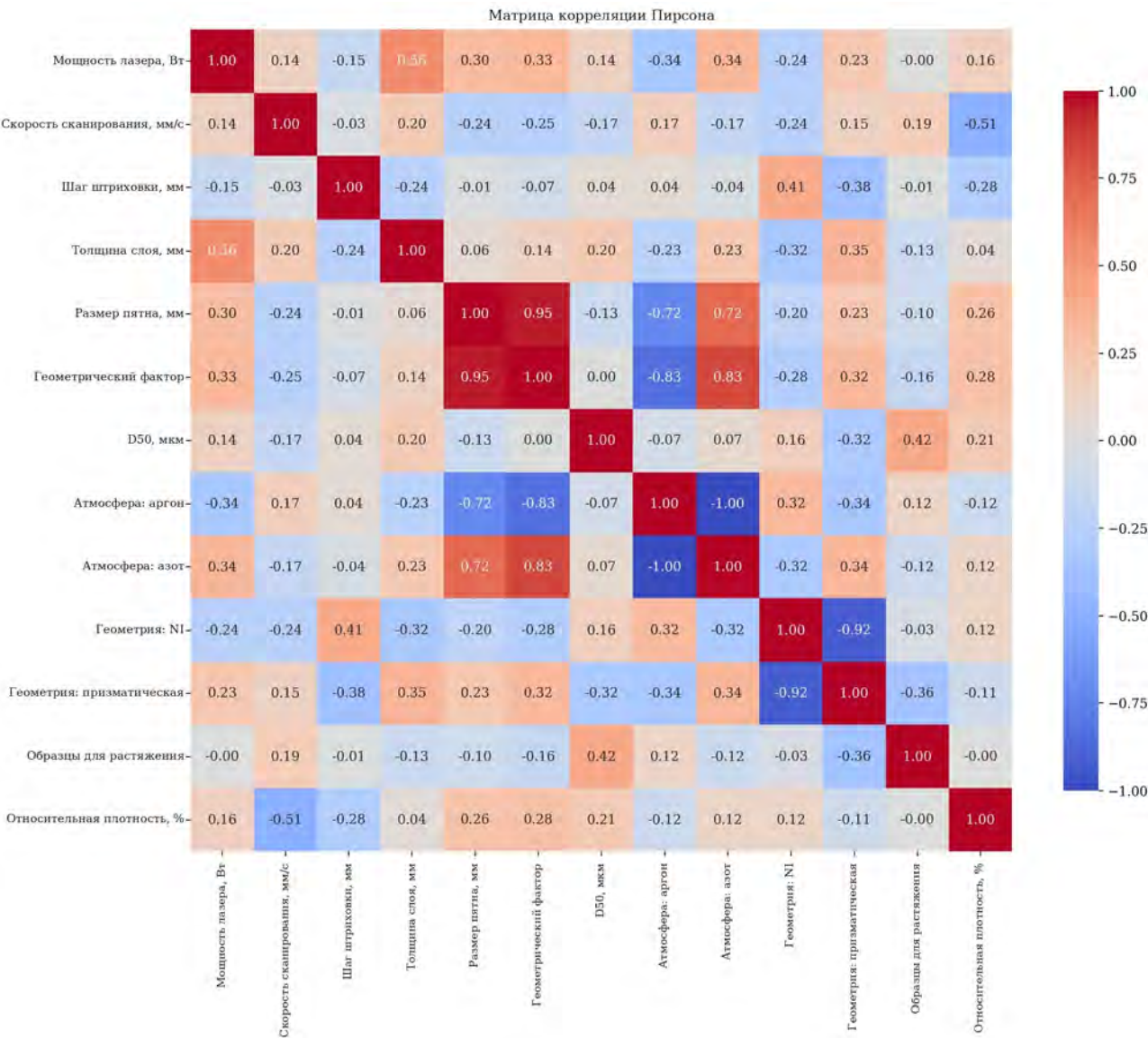
геометрическую вариабельность данных.

Дескриптор размера порошка D_{50} , напротив, более концентрирован. Он изменяется от 22,5 до 39,98 мкм при среднем 30,42 мкм и медиане 30 мкм. Межквартильный размах составляет всего 2 мкм — от 30 до 32 мкм, что соответствует увеличению на 6,67% в центральной половине данных. Следовательно, большинство порошков сосредоточено в сравнительно узком диапазоне размеров частиц. Однако отрицательная асимметрия -0,905 и эксцесс 5,087 указывают на наличие отдельных значений меньшего размера и резко выраженную концентрацию около центра распределения.

Целевая переменная — относительная плотность — изменяется от 81,44 до 99,94%, то есть общий разброс составляет 18,5 процентного пункта. Это существенно, поскольку набор данных не ограничивается почти полностью плотными образцами, а включает и сильно дефектные режимы LPBF. Средняя относительная плотность составляет 97,62%, медианная — 98,24%, поэтому среднее приблизительно на 0,63% ниже медианы. В абсолютном выражении разница невелика, однако для LPBF она важна, поскольку значения плотности сгруппированы у верхней границы, а несколько низкоплотных образцов смещают среднее вниз. Первый и третий квартили составляют 97,47 и 98,82% соответственно, то есть межквартильный размах равен лишь 1,35 процентного пункта. В то же время минимальное значение находится на 16,03 процентного пункта ниже первого квартиля и на 17,1% ниже медианы. Сильная отрицательная асимметрия -3,524 и высокий эксцесс 15,59 подтверждают, что распределение плотности преимущественно состоит из высокоплотных построений с выраженным низкоплотным хвостом. С точки зрения печатаемости это полезно: модель должна отделять устойчивые высокоплотные режимы от меньшей, но критически важной группы режимов, склонных к дефектам.

Категориальные распределения на рисунке показывают, что в наборе присутствуют как аргоновая, так и азотная атмосферы, причем азот встречается немного чаще. Разница умеренная, поэтому атмосферу можно сохранять как категориальный дескриптор без полного доминирования одного класса. Распределение геометрии образцов более несбалансированно. Призматические образцы составляют

большинство, тогда как геометрии «NI» и образцы для испытаний на растяжение встречаются существенно реже. Следовательно, тенденции, связанные с геометрией, следует интерпретировать осторожнее, чем тенденции основных технологических переменных, поскольку именно призматический класс обеспечивает основную статистическую поддержку.



Матрица корреляции Пирсона для дескрипторов процесса LPBF, категориальных индикаторов и отклика относительной плотности.

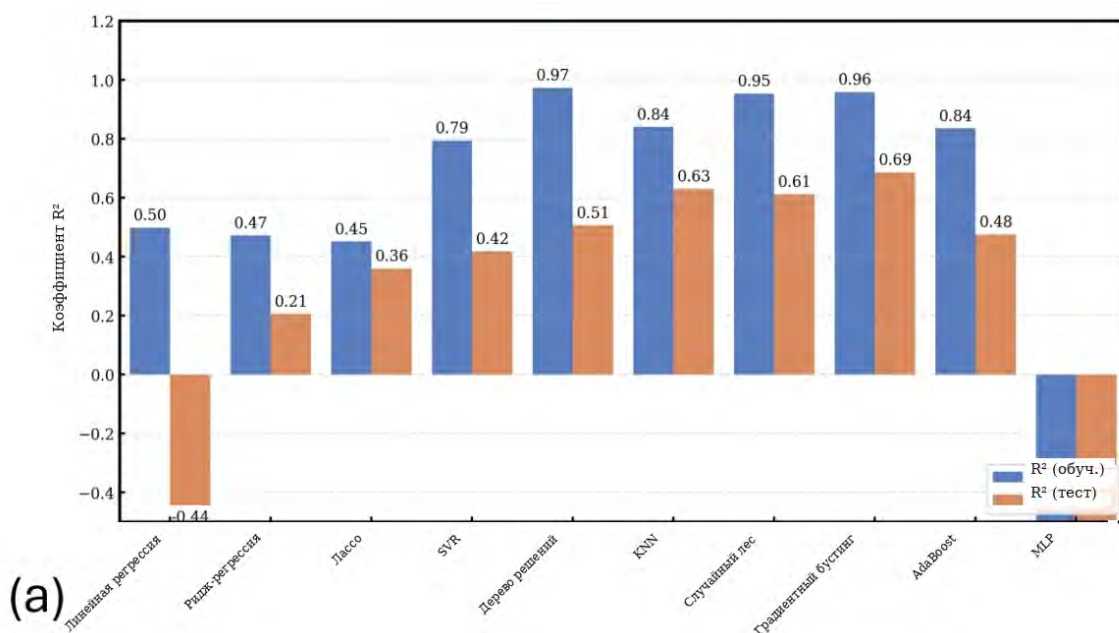
Матрица корреляции Пирсона дает первичную оценку попарных линейных связей между входными дескрипторами и

относительной плотностью. Скорость сканирования показывает наиболее сильную связь с относительной плотностью,

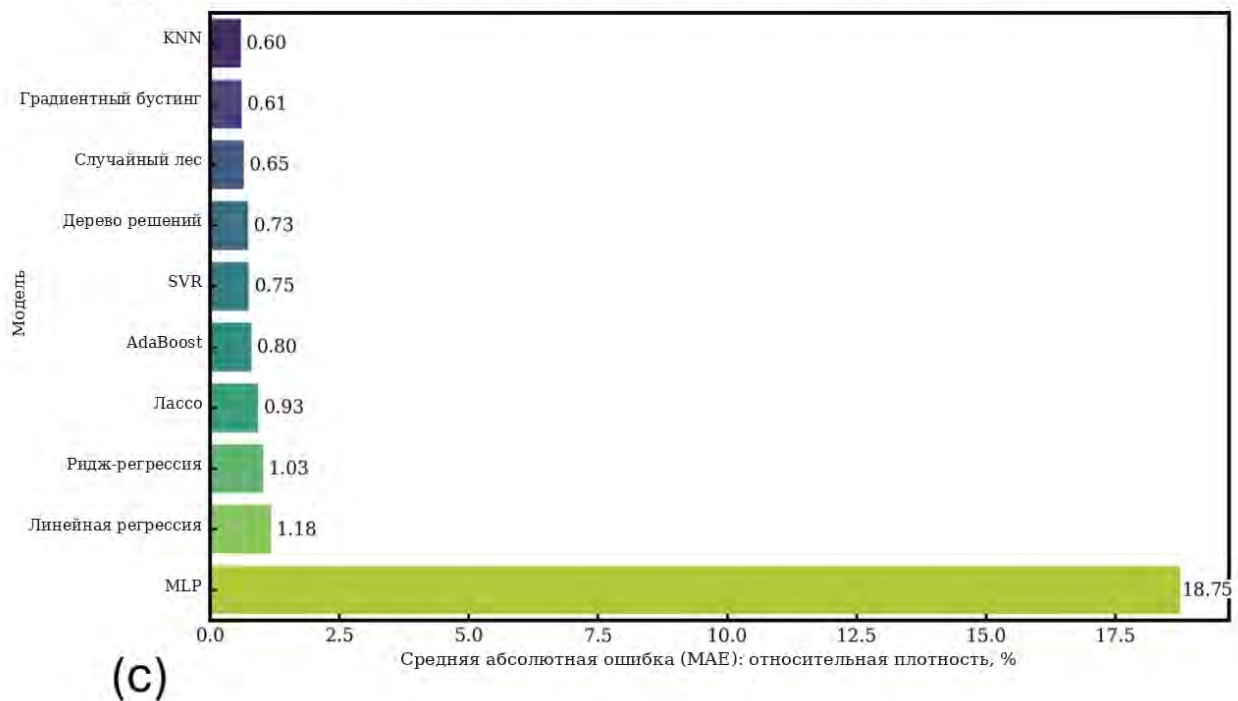
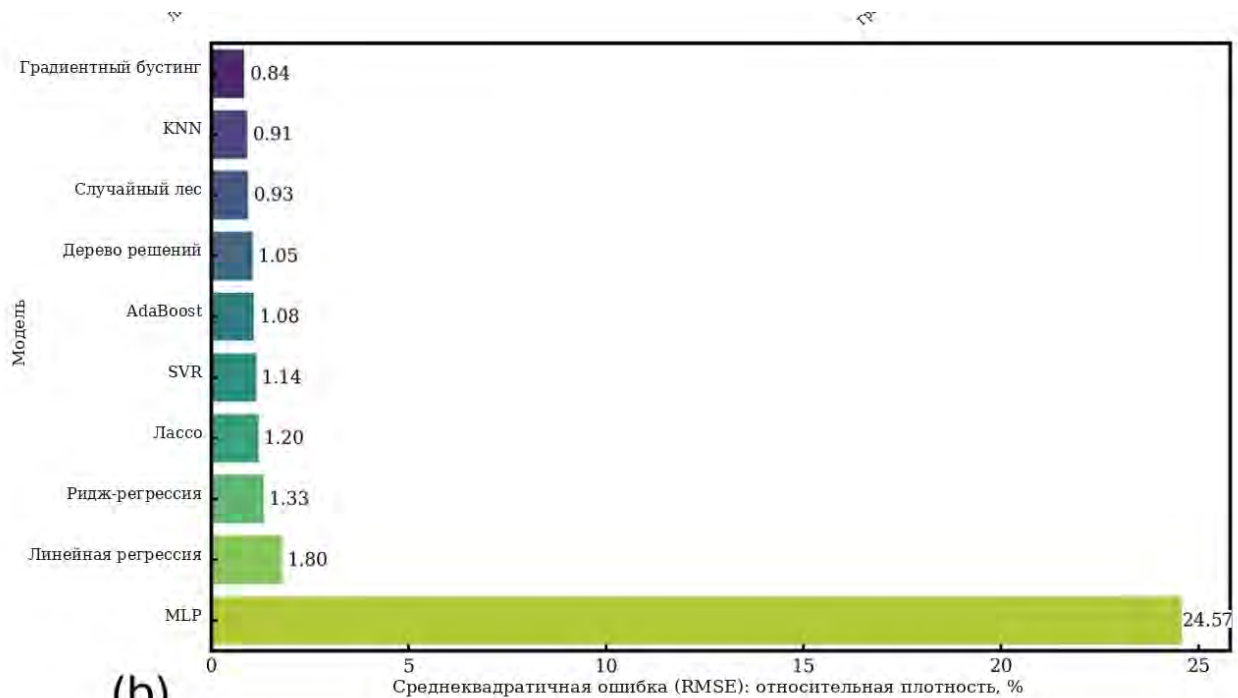
Несколько дескрипторов демонстрируют слабые или умеренные положительные связи с относительной плотностью. Для геометрического фактора $r \approx 0,28$, для размера пятна $r \approx 0,26$, для D_{50} $r \approx 0,21$, а для мощности лазера $r \approx 0,16$. Относительно слабая линейная связь мощности лазера не означает, что мощность незначительна. Напротив, ее влияние зависит от других технологических переменных, включая скорость сканирования, шаг штриховки, толщину слоя и размер луча. Одна и та же мощность лазера при различных сочетаниях времени воздействия, перекрытия треков и условий слоя порошка может приводить к разным результатам уплотнения. Толщина слоя почти не показывает попарной линейной связи с относительной плотностью, $r \approx 0,04$, что предполагает, что ее вклад может проявляться прежде всего через нелинейные взаимодействия с мощностью лазера и скоростью сканирования.

Корреляционная матрица также выявляет сильные зависимости между несколькими предикторами. Размер пятна и гео-

метрический фактор сильно коррелируют, $r \approx 0,95$, то есть содержат в значительной степени перекрывающуюся информацию. Индикаторные переменные аргона и азота идеально отрицательно коррелируют, $r = -1,00$, поскольку представляют взаимоисключающие уровни одной категориальной переменной. Аналогично сильная отрицательная связь между индикаторами призматической и NI-геометрии, $r \approx -0,92$, отражает структуру и дисбаланс кодированных категорий, а не самостоятельную физическую зависимость. Эти взаимосвязи указывают на мультиколлинеарность и должны учитываться при интерпретации важности признаков. Поэтому корреляция Пирсона здесь используется только как разведочный инструмент. Последующие методы машинного обучения и интерпретируемости характеризуют нелинейные и зависящие от взаимодействий связи модели, но не устанавливают причинность и не позволяют полностью разделить вклады сильно коррелированных предикторов.



Сравнительная эффективность моделей машинного обучения при прогнозировании относительной плотности: (a) R^2 на обучающей и тестовой выборках, (b) RMSE и (c) MAE.



Сравнительная эффективность моделей машинного обучения при прогнозировании относительной плотности: (a) R^2 на обучающей и тестовой выборках, (b) RMSE и (c) MAE.

2.2 Сравнительная эффективность моделей машинного обучения

Сравнительная эффективность регрессионных моделей представлена на рис. Результаты показывают, что отклик относительной плотности при LPBF лучше описывается нелинейными моделями и моделями локальной интерполяции, чем чисто линейными регрессорами. Среди отдель-

ных моделей наибольший коэффициент детерминации на тестовой выборке показал Gradient Boosting: тестовый $R^2=0,69$. Далее следуют KNN с 0,63 и Random Forest с 0,61. Для Decision Tree, AdaBoost, SVR, Lasso, Ridge и Linear Regression обобщающая способность была ниже: тестовые значения R^2 составили соответственно 0,51; 0,48; 0,42; 0,36; 0,21 и -0,44. Отрицательное тестовое

вое значение R^2 для Linear Regression показывает, что простая глобальная линейная зависимость недостаточна для описания изменения относительной плотности во всем исследованном пространстве LPBF.

Преимущество Gradient Boosting подтверждается и метриками ошибки. Его RMSE равна 0,84 процентного пункта — это наименьшее значение среди всех отдельных моделей. По сравнению с Linear Regression, для которой RMSE составляет 1,80 процентного пункта, Gradient Boosting снижает RMSE приблизительно на 53,3%. Улучшение существенно и относительно регуляризованных линейных моделей: примерно на 36,8% по сравнению с Ridge и на 30,0% по сравнению с Lasso. Даже относительно более сильных нелинейных моделей Gradient Boosting остается предпочтительным: RMSE ниже приблизительно на 7,7% по сравнению с KNN и на 9,7% по сравнению с Random Forest. Эти различия значимы, поскольку относительная плотность уже сосредоточена в высокоплотной области; следовательно, снижение ошибки даже на несколько десятых процентного пункта помогает лучше разделять почти полностью плотные и пограничные либо дефектные режимы LPBF.

Ранжирование по MAE дает немного иную, но дополняющую картину. Наименьшее значение MAE, 0,60 процентного пункта, показывает KNN, а Gradient Boosting следует почти вплотную с 0,61 процентного пункта. Разница между ними составляет всего около 1,7%, что означает сходные средние абсолютные отклонения (рис. 5). Однако Gradient Boosting имеет более высокий тестовый R^2 и более низкий RMSE, то есть лучше воспроизводит общую дисперсию отклика плотности и эффективнее уменьшает крупные ошибки. Для Random Forest MAE равна 0,65 процентного пункта, что на 8,3% выше, чем у KNN, и на 6,6% выше, чем у Gradient Boosting. Для Linear Regression MAE составляет 1,18 процентного

пункта, поэтому Gradient Boosting снижает среднюю абсолютную ошибку приблизительно на 48,3% относительно нерегуляризованной линейной базовой модели.

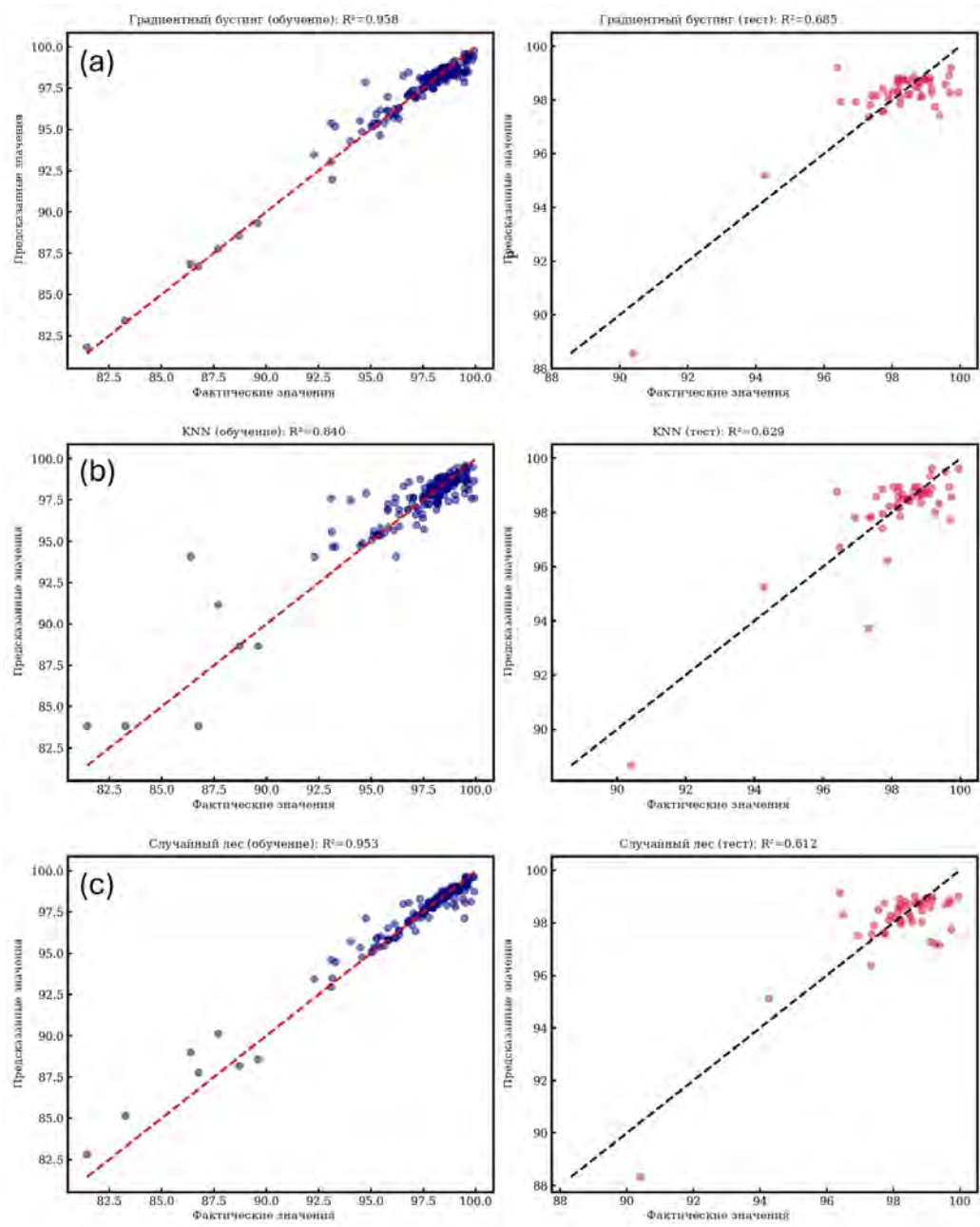
Результаты также показывают различную степень переобучения. Decision Tree достигает $R^2=0,97$ на обучающей выборке, но снижается до 0,51 на тестовой, то есть разрыв «обучение–тест» равен 0,46. Random Forest также демонстрирует большой разрыв: от 0,95 на обучении до 0,61 на тесте. Gradient Boosting снижается с 0,96 до 0,69, разрыв — 0,27, а KNN — с 0,84 до 0,63, разрыв — 0,21. Таким образом, KNN ведет себя более консервативно, однако Gradient Boosting обеспечивает лучший баланс между способностью к подгонке и точностью прогноза. Древовидные модели способны изучать детализированную локальную структуру обучающего набора, но чрезмерная гибкость может ухудшать обобщение, если тестовые данные содержат комбинации параметров, представленные менее плотно.

Слабые результаты Linear Regression, Ridge и Lasso показывают, что отклик плотности LPBF не определяется простой аддитивной линейной зависимостью во всем наборе данных. Это физически обоснованно, поскольку относительная плотность зависит от связанных тепловых и геометрических эффектов. Например, мощность лазера нельзя рассматривать отдельно от скорости сканирования, шага штриховки, толщины слоя и размера пятна. Одна и та же номинальная мощность способна формировать разные условия ванны расплава в зависимости от времени пребывания луча и перекрытия треков. Аналогично скорость сканирования может сильно снижать плотность при недостаточном энерговложении, но ее влияние модифицируется доступной мощностью лазера и шагом штриховки. Поэтому более высокое качество Gradient Boosting, KNN и Random Forest указывает на то, что печатаемость LPBF контролируется нелинейными

взаимодействиями параметров, а не изолированными эффектами первого порядка.

Графики соответствия для трех сильнейших отдельных моделей представлены на рис. Gradient Boosting демонстрирует наилучшее общее совпадение измеренных и прогнозируемых значений плотности. Его прогнозы на обучающей выборке плотно расположены вдоль диагонали при $R^2=0,96$, а на тестовой выборке сохраняется удовлетворительное соответствие при $R^2=0,685$.

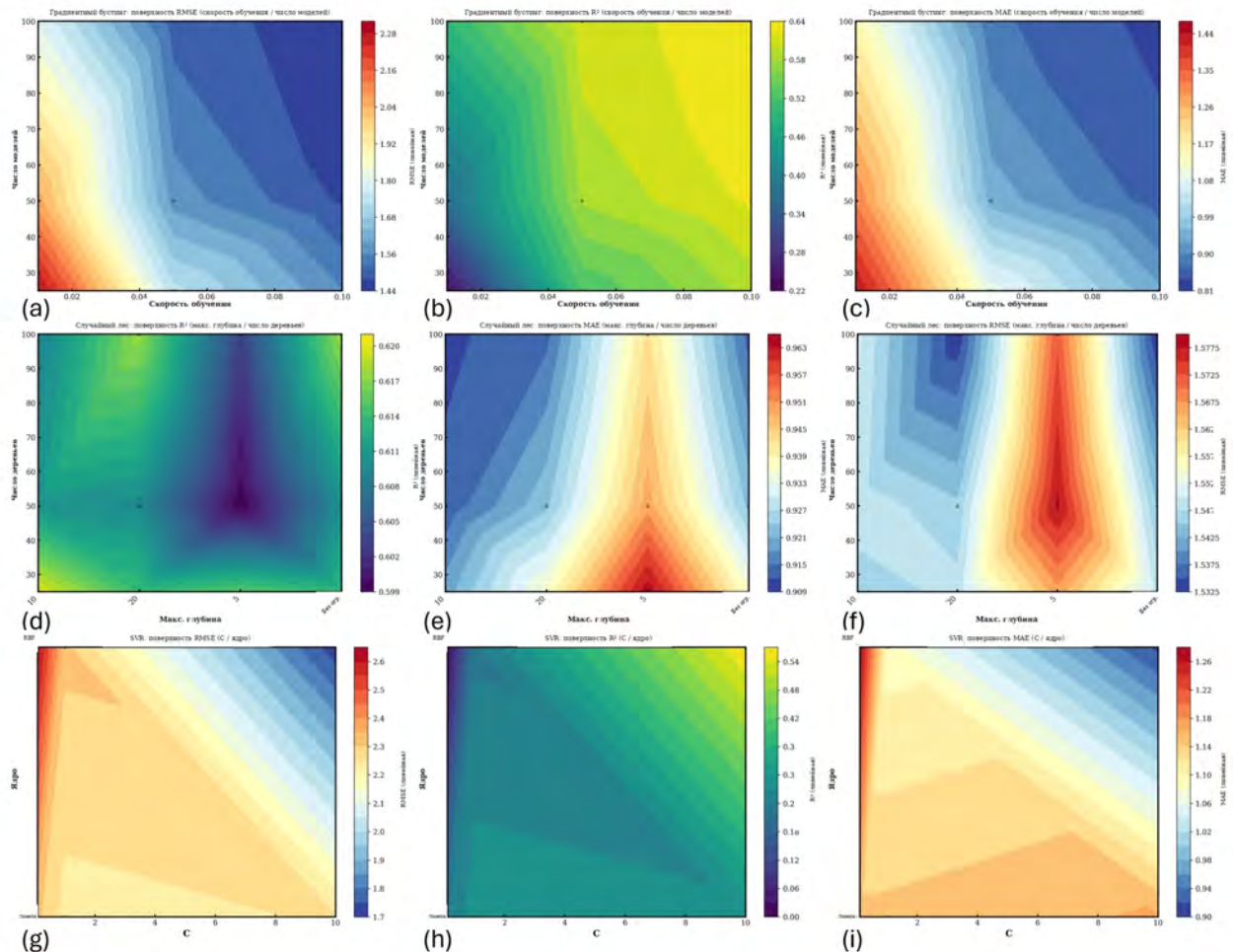
Для KNN R^2 равен 0,840 на обучении и 0,629 на тесте, что указывает на менее агрессивную подгонку, но и немного меньшую разрешающую способность прогноза. Для Random Forest обучающий $R^2=0,953$, близкий к Gradient Boosting, однако на тесте он снижается до 0,612. Это подтверждает, что Random Forest хорошо подгоняет обучающие данные, но хуже переносит найденные зависимости на невидимые ранее образцы.



Графики соответствия для трех наиболее сильных отдельных моделей: (a) Gradient Boosting, (b) KNN и (c) Random Forest. Левый столбец – обучающие данные, правый – тестовые.

На графиках также видно, что большинство тестовых образцов сосредоточено в диапазоне высокой плотности, особенно приблизительно между 97 и 100%. Это соответствует ранее рассмотренному распределению отклика, где большая часть режимов LPBF давала почти полностью плотный материал. Модели достаточно хорошо воспроизводят этот высокоплотный кластер, однако низкоплотные

случаи прогнозируются сложнее. Это ожидаемо, поскольку низкоплотный хвост представлен намного реже, чем высокоплотная область. Практически это означает, что модель наиболее надежна для интерполяции внутри высокоплотного технологического окна, тогда как прогнозы для редких дефектных режимов требуют дополнительной осторожности.



Ландшафты оптимизации гиперпараметров для выбранных семейств моделей: (a–c) Gradient Boosting, (d–f) Random Forest и (g–i) SVR.

Поверхности гиперпараметров на рис. дополнительно объясняют, почему Gradient Boosting превосходит другие семейства моделей. Для Gradient Boosting поверхности RMSE и MAE улучшаются по мере выхода скорости обучения и числа оценщиков из области малой мощности модели. Сочетания низкой скорости обучения и малого числа оценщиков дают худшее качество, тогда как более высокие скорости обучения

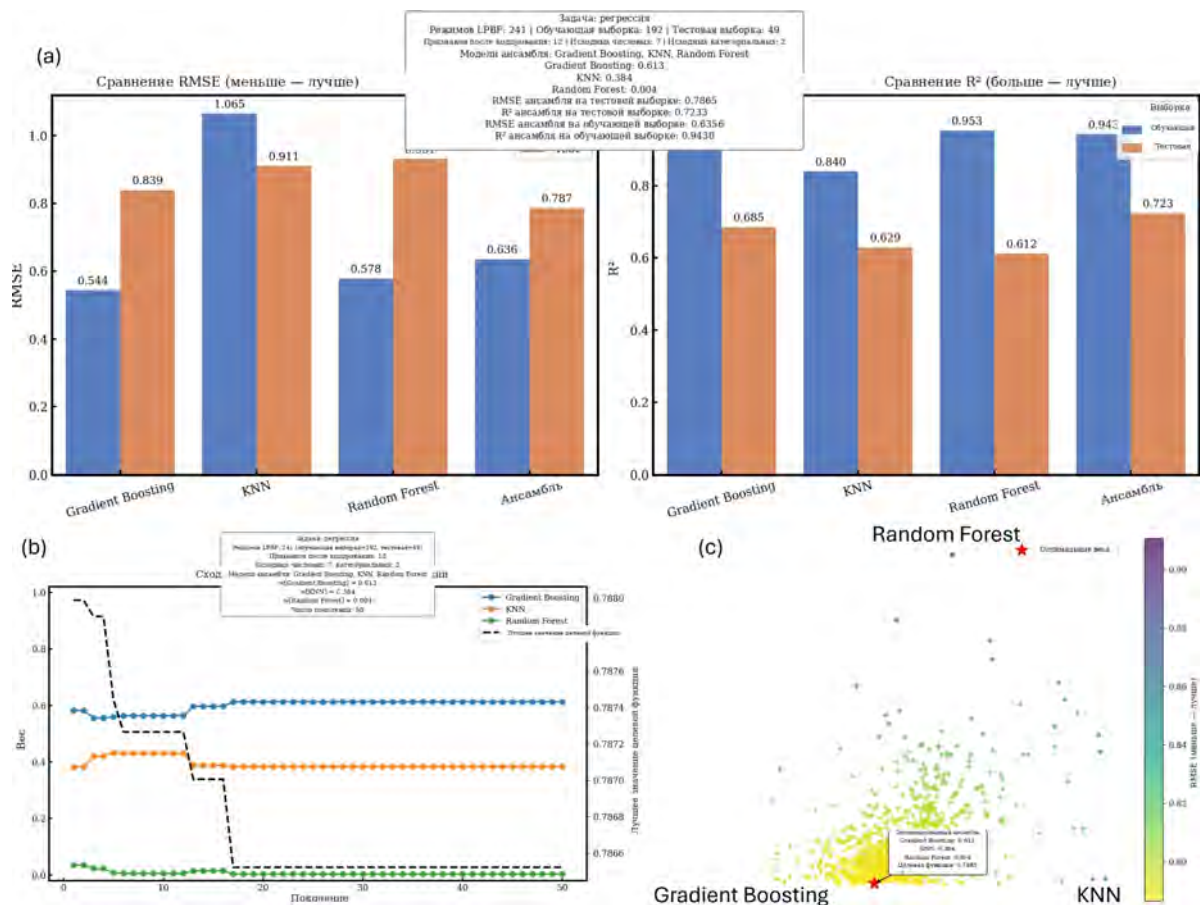
и большее число оценщиков обеспечивают меньшие ошибки и более высокий R^2 . Такое поведение показывает, что отклик плотности содержит структурированную нелинейную информацию, которую можно извлекать последовательным бустингом. Модель выигрывает от постепенной коррекции остаточных ошибок, что согласуется с пороговым характером поведения LPBF при переходах между недостаточным

плавлением, устойчивой консолидацией и менее благоприятными режимами обработки.

Контурные гиперпараметры Random Forest значительно более плоские. Значения R^2 остаются в узком диапазоне приблизительно 0,599–0,620 при исследованных сочетаниях максимальной глубины и числа оценщиков. Это показывает, что качество Random Forest менее чувствительно к проверенным изменениям гиперпараметров и одной настройкой существенно повысить его обобщающую способность не удастся. Контурные SVR показывают, что выбранные сочетания ядра и регуляризации менее эффективны для данного набора данных. Хотя по тестовому R^2 SVR превосходит линейные модели, его RMSE 1,14 процентного пункта все еще примерно на 35,7% выше, чем у Gradient Boosting. Следовательно, представление SVR менее эффективно

описывает структуру «процесс–отклик» LPBF, чем бустинг или обучение на локальном соседстве.

В целом сравнение моделей показывает, что отклик относительной плотности Inconel 718 при LPBF нелинеен, зависит от взаимодействий и чувствителен к локальным областям пространства параметров. Gradient Boosting является лучшей отдельной моделью, поскольку обеспечивает наибольший тестовый R^2 , наименьший RMSE и конкурентоспособный MAE. KNN дает минимальный MAE и полезную способность к локальной интерполяции, а Random Forest показывает высокое качество на обучающей выборке, но слабее переносится на тестовую. Эти результаты обосновывают выбор наиболее эффективных нелинейных моделей в качестве кандидатов для построения ансамбля на следующем этапе AIMPOD.



Ансамблевая устойчивая модель прогнозирования относительной плотности LPBF: (a) сравнение RMSE и R^2 выбранных базовых моделей и оптимизированного ансамбля, (b) сходимость весов ансамбля и целевой функции и (c) оптимизированное решение по весам ансамбля.

2.3 Ансамблевая устойчивая модель для практического применения

После сравнения отдельных регрессоров для построения ансамбля были выбраны три сильнейшие модели: Gradient Boosting, KNN и Random Forest. Они представляли наиболее эффективные нелинейные алгоритмы предыдущего этапа и описывали разные аспекты отклика относительно плотности LPBF. Gradient Boosting показал лучшее индивидуальное качество на тесте, KNN обеспечил сильную локальную интерполяцию, а Random Forest служил дополнительной древовидной опорной моделью. Поэтому анализ ансамбля на рис. был направлен на проверку того, может ли объединение этих моделей повысить устойчивость прогноза относительно лучшего отдельного регрессора.

Ансамбль достиг тестового RMSE 0,7865 процентного пункта и тестового $R^2=0,7233$. Это заметное улучшение относительно лучшей отдельной модели Gradient Boosting, у которой тестовый RMSE равен 0,839, а $R^2=0,685$. В относительном выражении ансамбль уменьшил тестовый RMSE приблизительно на 6,3% по сравнению с Gradient Boosting. По сравнению с KNN и Random Forest улучшение еще больше: RMSE снизился приблизительно на 13,7 и 15,5% соответственно. Эти различия важны, поскольку целевой отклик — относительная плотность, а отклонения менее одного процентного пункта могут отделять почти полностью плотные условия от пограничных или склонных к дефектам режимов LPBF.

Сравнение R^2 также подтверждает преимущество ансамбля. Его тестовое значение 0,7233 выше соответствующих значений Gradient Boosting, KNN и Random Forest — 0,685; 0,629 и 0,612. Абсолютное улучшение R^2 составляет 0,038 относительно Gradient Boosting, 0,094 относительно KNN и 0,111 относительно Random Forest. В относительном выражении тестовый R^2 повышается примерно на 5,6% по сравнению с Gradient

Boosting, на 15,0% по сравнению с KNN и на 18,2% по сравнению с Random Forest. Следовательно, ансамбль не просто воспроизводит результат лучшей одиночной модели, а измеримо улучшает обобщающую способность.

Метрики на обучающей выборке показывают, что ансамбль жертвует частью качества подгонки ради лучшей работы на тесте. Для Gradient Boosting и Random Forest обучающие RMSE ниже — 0,544 и 0,578 соответственно, тогда как у ансамбля обучающий RMSE равен 0,6356. Однако это увеличение ошибки на обучении полезно, поскольку уменьшает тенденцию к переобучению. То же видно по R^2 : у Gradient Boosting обучающий $R^2=0,958$, у Random Forest — 0,953, но на тесте они снижаются до 0,685 и 0,612. У ансамбля обучающий R^2 несколько ниже — 0,943, зато тестовый $R^2=0,7233$ является наибольшим. Это показывает, что ансамбль лучше балансирует изучение доступной структуры «процесс-отклик» и устойчивость прогнозов на невидимых ранее режимах LPBF.

Оптимизированные веса дополнительно характеризуют взаимодополняемость моделей. Итоговый ансамбль, полученный с помощью внутренней генетически-алгоритмической парето-оптимизации AIMPOD, назначает вес 0,613 модели Gradient Boosting, 0,384 — KNN и лишь 0,004 — Random Forest. Следовательно, приблизительно 61,3% прогноза определяет Gradient Boosting, еще 38,4% вносит KNN. Вклад Random Forest составляет менее 1%, что показывает: после включения Gradient Boosting и KNN он добавляет очень мало независимой предиктивной информации. Это не означает, что Random Forest является слабой моделью; скорее, его полезная информация сильно перекрывается с информацией двух других моделей.

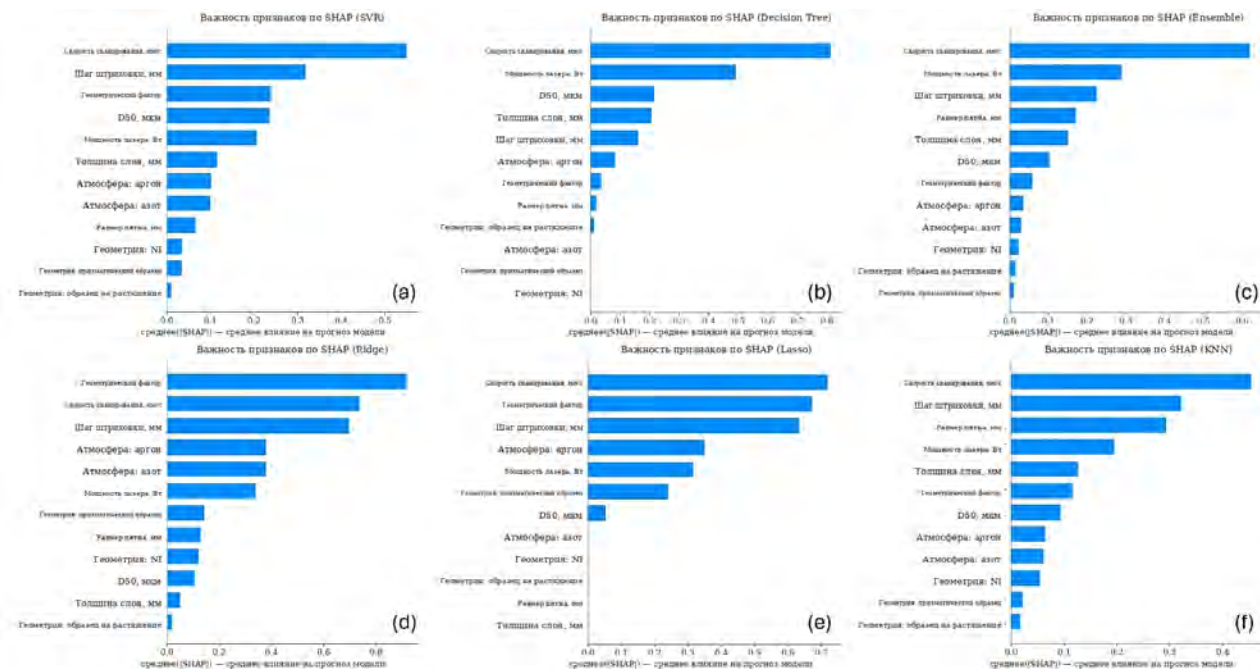
Такое распределение весов физически разумно для прогнозирования относительной плотности LPBF. Gradient Boosting способен улавливать нелинейное поро-

вое поведение — например, снижение плотности при чрезмерно высокой скорости сканирования или слишком большом шаге штриховки. KNN дополняет его учетом локального сходства между режимами, что полезно, когда соседние комбинации параметров дают близкое поведение уплотнения. Практически нулевой вес Random Forest показывает, что усредненные прогнозы деревьев не дают существенной дополнительной коррекции сверх бустингового и локально-соседского компонентов.

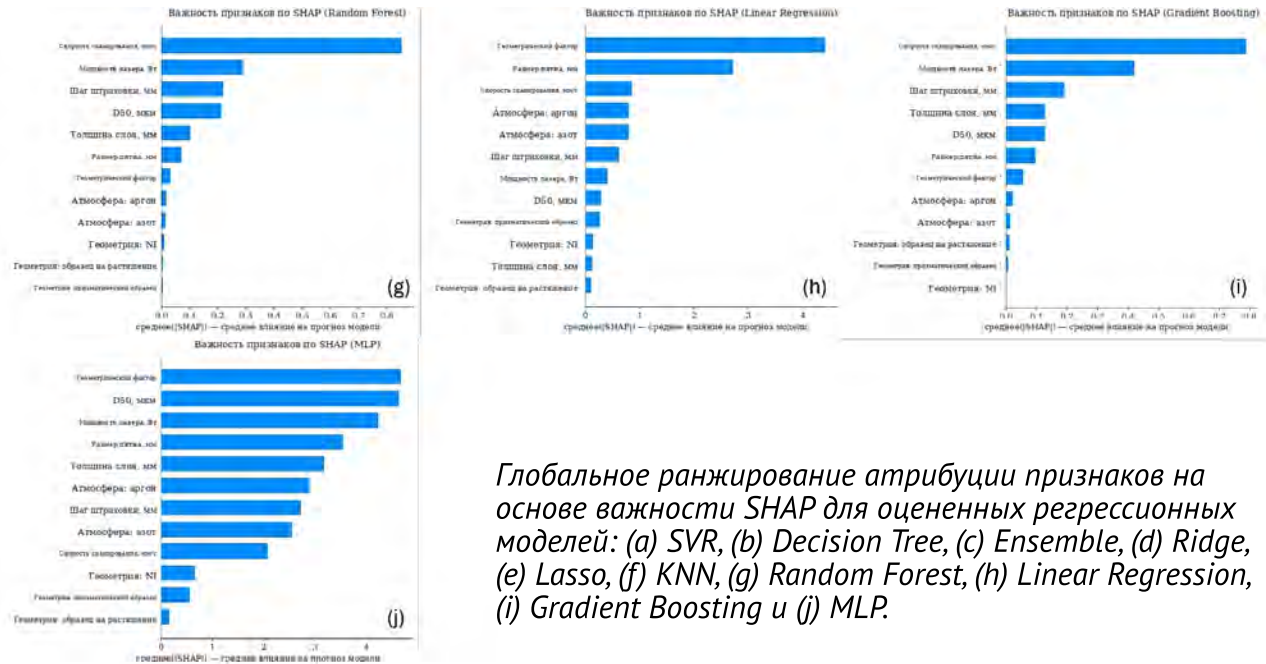
График сходимости на рис. (b) показывает, что оптимизация ансамбля быстро стабилизируется. Значение целевой функции уменьшается в ранних поколениях и достигает наилучшего уровня после смещения весов к доминирующему вкладу Gradient Boosting и вторичному вкладу KNN. Примерно после середины процесса оптимизации лучшее значение почти не меняется, что указывает на сходимость

решения и пренебрежимо малую пользу дополнительных поколений. Итоговая область пространства поиска на рис. (c) подтверждает, что оптимум расположен близко к ребру Gradient Boosting–KNN, а Random Forest вносит лишь незначительный вклад.

С точки зрения практического применения ансамбль предпочтительнее отдельной модели, поскольку объединяет два взаимодополняющих механизма прогнозирования. Gradient Boosting задает основную нелинейную структуру «процесс–отклик», а KNN обеспечивает локальную коррекцию по сходству внутри исследованного пространства LPBF. Это особенно важно при построении карт печатаемости, где требуется не только низкая глобальная ошибка, но и отсутствие нестабильных прогнозов в областях, где плотность резко изменяется при изменении параметров процесса.



Глобальное ранжирование атрибуции признаков на основе важности SHAP для оцененных регрессионных моделей: (a) SVR, (b) Decision Tree, (c) Ensemble, (d) Ridge, (e) Lasso, (f) KNN, (g) Random Forest, (h) Linear Regression, (i) Gradient Boosting и (j) MLP.



Глобальное ранжирование атрибуции признаков на основе важности SHAP для оцененных регрессионных моделей: (a) SVR, (b) Decision Tree, (c) Ensemble, (d) Ridge, (e) Lasso, (f) KNN, (g) Random Forest, (h) Linear Regression, (i) Gradient Boosting и (j) MLP.

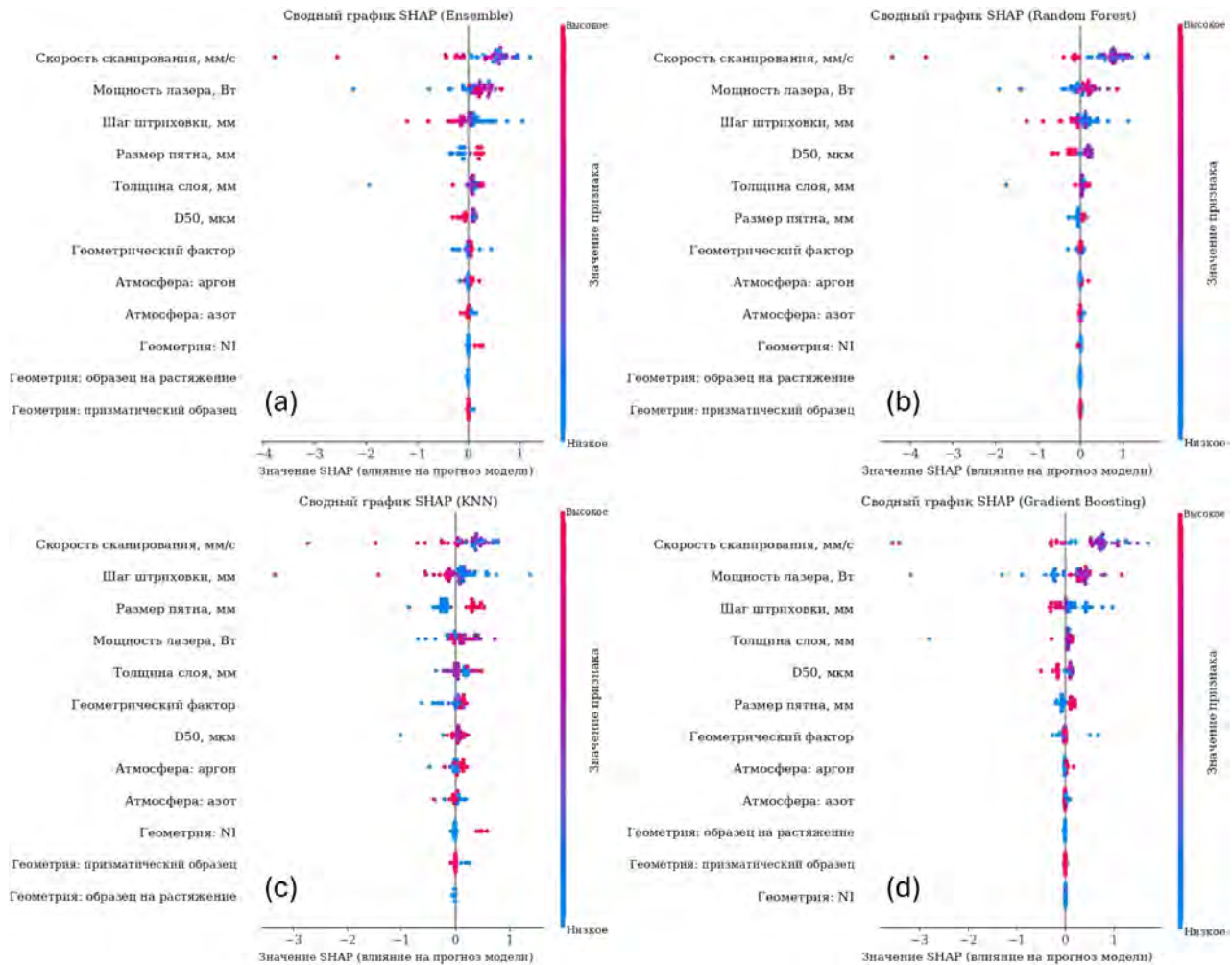
2.4 Анализ интерпретируемости моделей печатаемости LPBF

Анализ интерпретируемости выполнялся для проверки того, опираются ли обученные модели на физически значимые дескрипторы LPBF, а не только на численные корреляции. Глобальные результаты атрибуции признаков представлены на рис. В наиболее эффективных моделях скорость сканирования последовательно относится к числу наиболее влиятельных переменных. В ансамблевой модели она имеет наибольшее среднее абсолютное значение SHAP; далее следуют мощность лазера, шаг штриховки, размер пятна, толщина слоя, D_{50} и геометрический фактор. Такое ранжирование согласуется с предшествующими корреляционным анализом и анализом чувствительности, где скорость сканирования и шаг штриховки были наиболее сильными переменными, связанными со снижением плотности.

Такое ранжирование физически обосновано для LPBF Inconel 718. Скорость сканирования непосредственно определяет время воздействия лазера и, следовательно, количество энергии, передаваемой на единицу длины трека. Повышенная скорость может уменьшать глубину ванны расплава и непрерывность дорожки, что

объясняет доминирующую роль этого дескриптора в Gradient Boosting, Random Forest, KNN, SVR и итоговом ансамбле. Мощность лазера также занимает высокое место, поскольку определяет доступный тепловой поток, но ее влияние менее однозначно, чем влияние скорости сканирования: одинаковый уровень мощности способен давать различное уплотнение в зависимости от скорости сканирования, шага штриховки, толщины слоя и размера луча. Шаг штриховки важен, поскольку определяет перекрытие соседних треков расплава; увеличение шага повышает вероятность межтрековых дефектов несплавления. Более низкое место индикаторов атмосферы и геометрии образца показывает, что эти категориальные переменные влияют на относительную плотность преимущественно через взаимодействия с непрерывными технологическими переменными, а не посредством равномерного глобального сдвига.

Сводные графики SHAP на рис. показывают одновременно важность признаков и направление их влияния. В ансамблевой модели высокие значения скорости сканирования обычно смещают прогноз в сторону меньшей относительной плотности, тогда как более низкие скорости связаны с



Сводные графики SHAP для итогового ансамбля и выбранных базовых моделей: (a) Ensemble, (b) Random Forest, (c) KNN и (d) Gradient Boosting.

положительным или близким к нейтральному вкладом. Аналогичную тенденцию показывает шаг штриховки: более крупный шаг обычно снижает прогнозируемую плотность из-за уменьшения перекрытия треков расплава. Во многих случаях мощность лазера действует в противоположном направлении: большая мощность способствует повышению прогнозируемой плотности за счет увеличения доступной энергии плавления. При этом разброс значений SHAP для мощности показывает, что ее влияние является условным, а не строго монотонным.

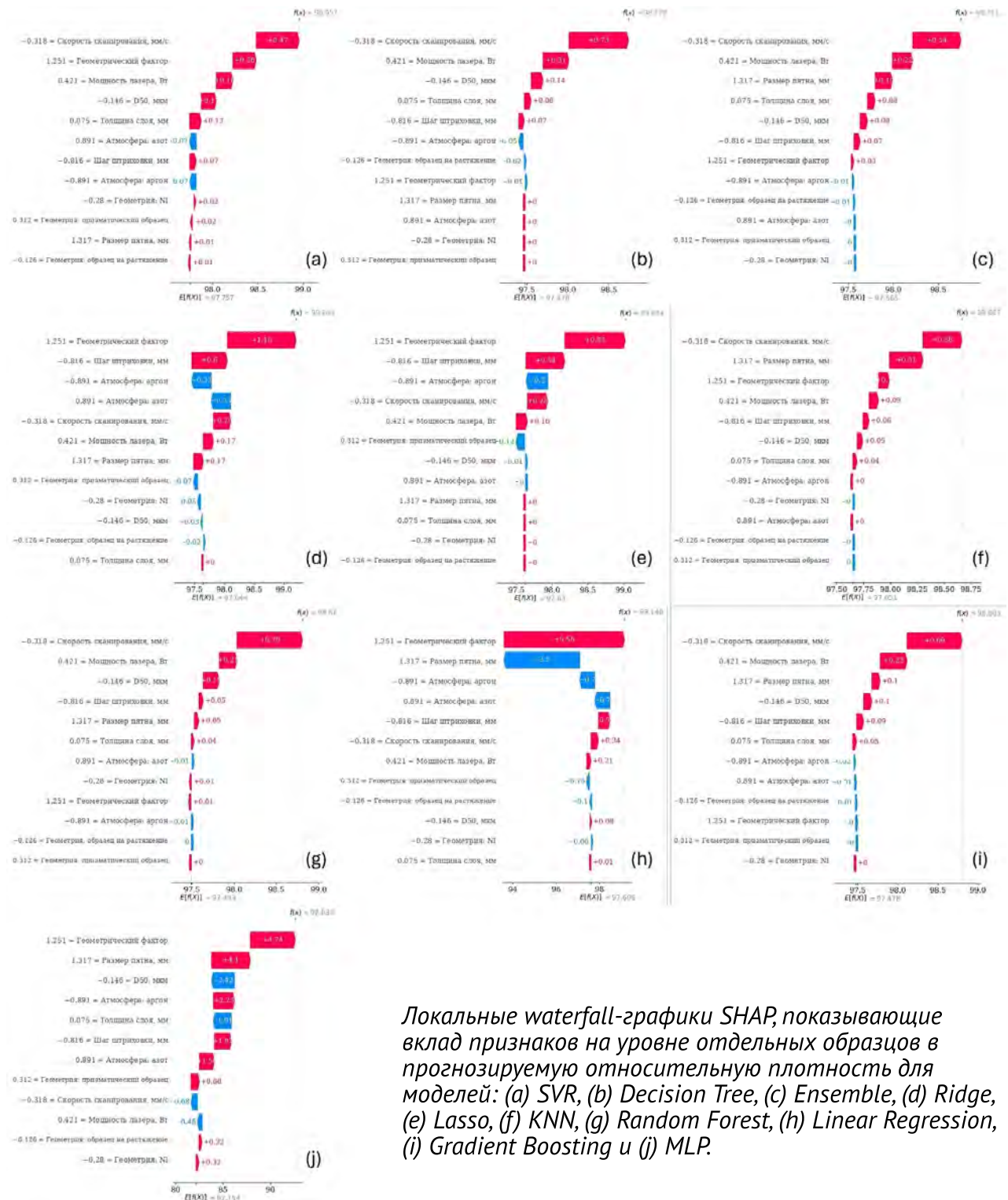
Сравнение ансамбля, Random Forest, KNN и Gradient Boosting показывает, что общая иерархия процесса в основном сохраняется. Все четыре модели выделяют скорость сканирования как главный фактор

изменения прогноза. Gradient Boosting и ансамбль также придают высокую важность мощности лазера и шагу штриховки, то есть итоговый предиктор учитывает и эффекты энергозатрат, и перекрытие треков. KNN придает относительно большее значение шагу штриховки и размеру пятна, что согласуется с характером локального соседства: близкие комбинации параметров с похожими геометрическими и лучевыми дескрипторами могут давать схожие значения плотности. Согласие между разными представлениями интерпретируемости повышает уверенность в том, что модель изучает технологически значимую структуру.

Локальные объяснения SHAP представлены на рис. 10. Они показывают, как отдельные прогнозы складываются из положи-

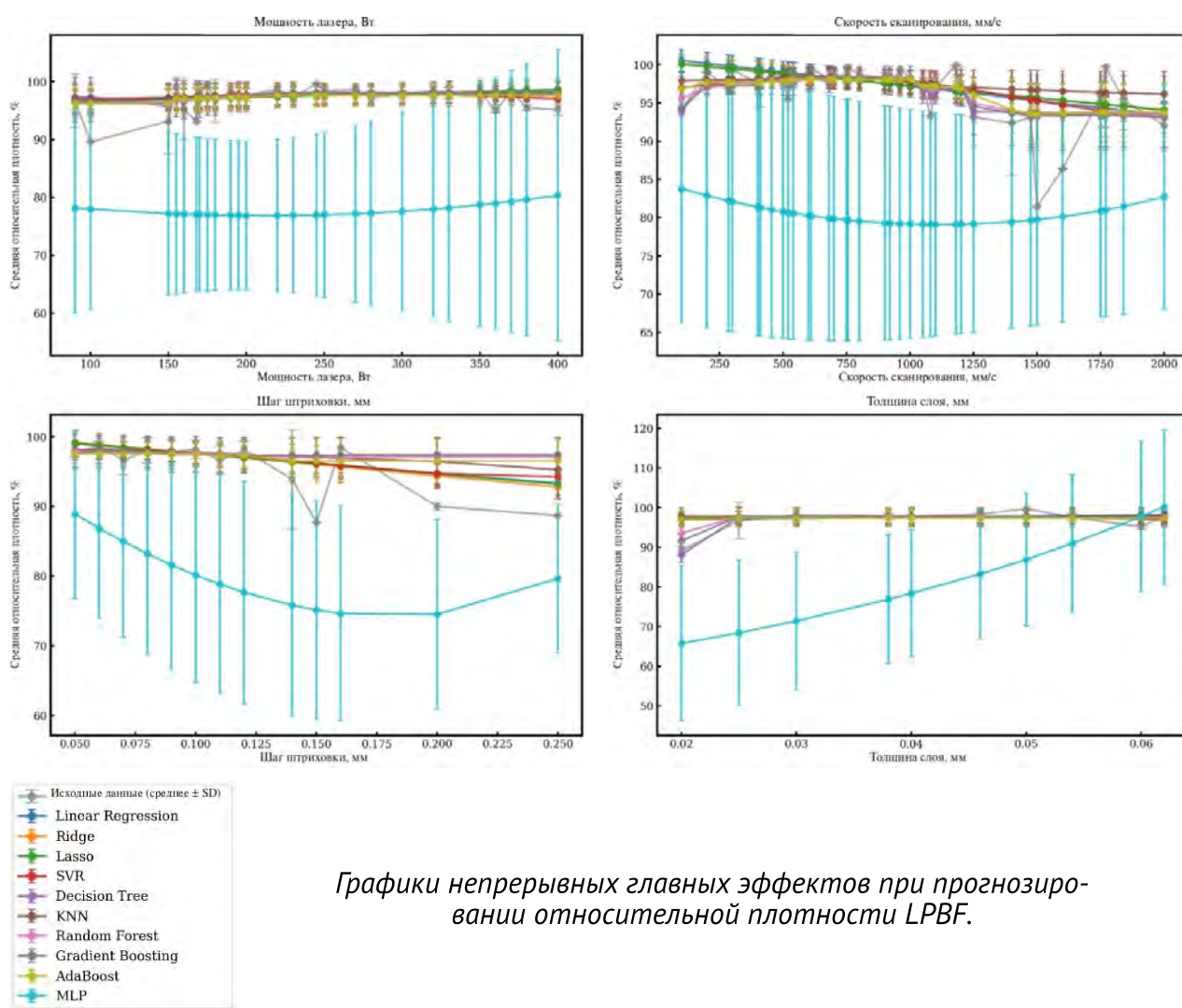
тельных и отрицательных вкладов признаков. Для прогнозов высокой плотности около 98–99% благоприятные сочетания скорости сканирования, мощности лазера, геометрического фактора, шага штриховки и размера пятна обычно повышают прогноз относительно базового уровня.

В нескольких случаях одна только скорость сканирования вносит примерно от +0,47 до +0,78 процентного пункта, а мощность лазера — примерно от +0,16 до +0,31 процентного пункта. Такие положительные вклады соответствуют режимам, поддерживающим устойчивое формирование ванны расплава и высокую степень уплотнения.

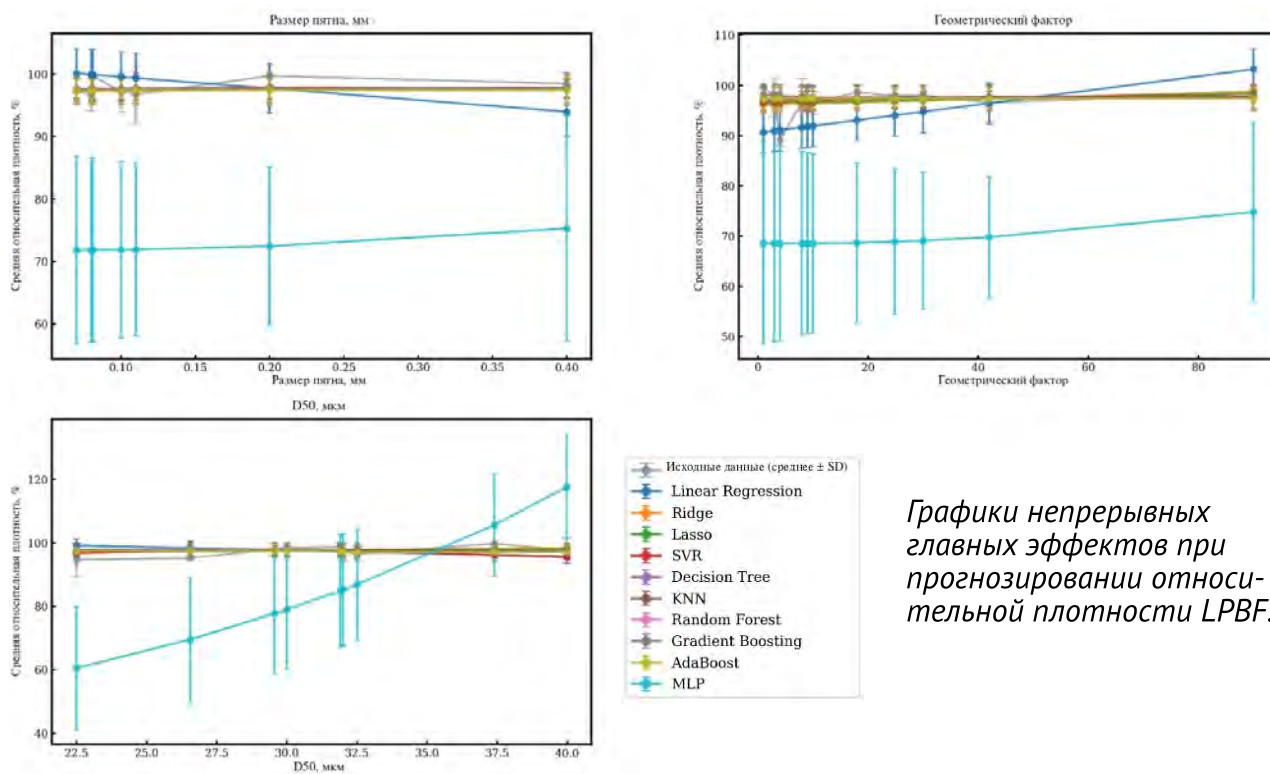


Локальные графики также показывают, что некоторые переменные могут снижать плотность в зависимости от конкретного образца. Например, индикатор атмосферы, шаг штриховки, скорость сканирования или дескриптор размера порошка могут давать отрицательный вклад, если их значения соответствуют менее благоприятным комбинациям параметров. Наиболее сильные локальные сдвиги наблюдаются в объяснении MLP, однако их не следует использовать для физической интерпретации процесса, поскольку в предыдущем сравнении MLP продемонстрировал слабую предиктивную устойчивость. Более надежны объяснения ансамбля и наиболее эффективных нелинейных моделей, где локальные значения SHAP остаются согласованными с физической картиной уплотнения при LPBF.

В целом анализ интерпретируемости подтверждает, что модель AIMPOD основывает прогноз прежде всего на технологических переменных, управляющих взаимодействием лазера с материалом, энергетическим воздействием и перекрытием треков. Скорость сканирования является доминирующим признаком, мощность лазера и шаг штриховки обеспечивают следующие по значимости поправки, а размер пятна, толщина слоя, размер порошка, атмосфера и геометрия образца выступают вторичными модификаторами. Согласование важности SHAP, направления вкладов, локальных объяснений и ранее построенных карт отклика поддерживает надежность итоговой ансамблевой модели как интерпретируемого инструмента построения карт печатаемости LPBF Inconel 718.



Графики непрерывных главных эффектов при прогнозировании относительной плотности LPBF.



2.5 Параметрическая чувствительность и анализ тенденций

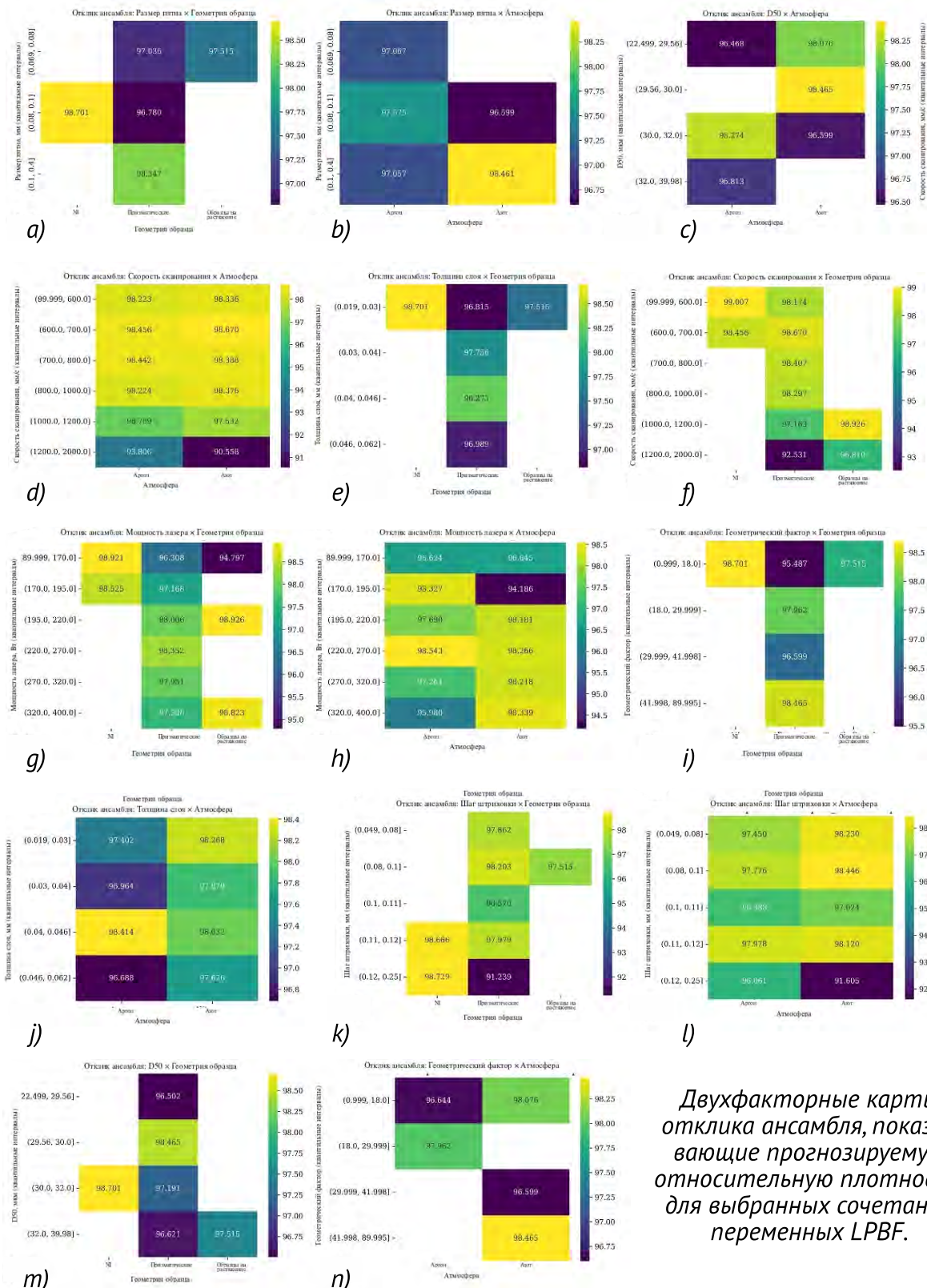
Графики главных эффектов на рис. показывают, как прогнозируемая относительная плотность меняется с каждым дескриптором LPBF при усреднении влияния остальных переменных. Это удобный способ упростить многомерную модель и выявить основные технологические тенденции, однако такие зависимости не следует трактовать как изолированные причинные эффекты, поскольку параметры LPBF действуют совместно, а некоторые дескрипторы коррелируют между собой. В наиболее надежных моделях скорость сканирования и шаг штриховки демонстрируют наиболее явную отрицательную связь с относительной плотностью, тогда как мощность лазера, толщина слоя, размер пятна, геометрический фактор и D_{50} порошка имеют более слабые или условные тенденции. Кривые MLP на ряде графиков заметно нестабильны и потому не использовались для физической интерпретации, что согласуется с относительно низким качеством этой модели. Ансамбль

достиг внутренне оцененного $R_2=0,7233$ и RMSE 0,7865 процентного пункта. Эти результаты показывают, что модель описывает основную вариативность относительной плотности, хотя часть разброса остается необъясненной. Поэтому карты следует рассматривать прежде всего как инструменты выявления технологических тенденций, а не как точные прогнозы для каждого отдельного режима.

Мощность лазера в наиболее эффективных моделях демонстрирует слабую положительную тенденцию. Большинство прогнозов находится примерно в диапазоне 96–98% во всем наблюдаемом диапазоне мощности, с постепенным ростом от низких к промежуточным и более высоким уровням. Это согласуется с увеличением тепловложения, доступного для плавления порошка и межтрекового соединения при росте мощности лазера. При этом эффект слабее, чем для скорости сканирования и шага штриховки, подтверждая, что одна мощность лазера не определяет печатаемость по критерию уплотнения. Ее влияние зависит от сопутствующих скорости скани-

рования, шага штриховки, толщины слоя, размера луча и других условий. Поэтому умеренный главный эффект согласуется с ранее полученной слабой положительной корреляцией Пирсона между мощностью лазера и относительной плотностью.

Поскольку набор данных собран из нескольких экспериментальных источников, эти кривые отражают общую тенденцию для различных машин и условий построения, а не отклик одной экспериментальной установки.



Двухфакторные карты отклика ансамбля, показывающие прогнозируемую относительную плотность для выбранных сочетаний переменных LPBF.

(a, b) размер пятна, (c, d) атмосфера, (e–g) геометрия образца, (h–n) остальные параметрические взаимодействия.

Скорость сканирования показывает наиболее последовательное снижение относительной плотности. Во всех эффективных моделях прогнозируемая плотность уменьшается с ростом скорости сканирования, причем наиболее резкое падение происходит выше приблизительно 1000–1200 мм/с. Ансамблевые карты отклика на рис. 12 дают более количественное представление этого поведения внутри экспериментально представленного диапазона. Для азота прогнозируемая относительная плотность остается около 98,3–98,7% при скорости 100–1000 мм/с, снижается до 97,532% в интервале 1000–1200 мм/с и падает до 90,558% при 1200–2000 мм/с. Это соответствует абсолютному уменьшению на 8,112 процентного пункта относительно максимальной прогнозируемой плотности в азоте 98,670%. Для аргона наблюдается та же общая тенденция: снижение примерно с 98,456% при 600–700 мм/с до 93,806% при 1200–2000 мм/с. Таким образом, высокая скорость сканирования является условием, наиболее сильно связанным со снижением плотности в собранном наборе. При этом в самой высокоскоростной области наблюдений меньше, особенно при низких плотностях, поэтому прогнозы здесь следует трактовать с повышенной осторожностью.

Шаг штриховки также демонстрирует отчетливую отрицательную связь с относительной плотностью. На непрерывных графиках главных эффектов наиболее надежные модели прогнозируют снижение плотности по мере приближения шага штриховки к верхней границе наблюдаемого диапазона. Ансамблевые карты дополнительно показывают, что величина этого эффекта зависит от атмосферы и геометрии образца. Для призматических образцов прогнозируемая плотность снижается с 98,203% при шаге 0,08–0,10 мм до 91,239% при 0,12–0,25 мм, то есть на 6,964 процентного пункта. Аналогичная тенденция наблюдается для азота: снижение с

98,230% при 0,049–0,08 мм до 91,605% при 0,12–0,25 мм. Это соответствует уменьшению перекрытия соседних треков расплава и повышению вероятности межтрековой пористости вследствие несплавления при крупном шаге. Эти численные значения следует рассматривать совместно с RMSE модели, локальной плотностью экспериментальных данных и вариабельностью, вызванной объединением нескольких исследований. За пределами собранных диапазонов параметры не интерпретируются, поскольку данных недостаточно для оценки точности прогноза и технологической реализуемости.

Толщина слоя оказывает более слабое и условное влияние. Графики главных эффектов надежных моделей остаются близки к области высокой плотности на большей части диапазона толщин, обычно между 96 и 99%. На карте «толщина слоя–атмосфера» прогнозируемая плотность меняется от 96,688 до 98,414%, то есть общий разброс составляет лишь 1,726 процентного пункта. Это значительно меньше эффектов скорости сканирования и шага штриховки. Максимальная плотность на этой карте достигается для аргона в интервале 0,04–0,0461 мм, минимальная — также для аргона в интервале 0,046–0,062 мм. Следовательно, в данном наборе данных толщину слоя следует рассматривать как вторичную технологическую переменную. Вероятно, ее влияние усиливается во взаимодействии с мощностью лазера и скоростью сканирования, поскольку для полного плавления более толстых слоев требуется больше энергии.

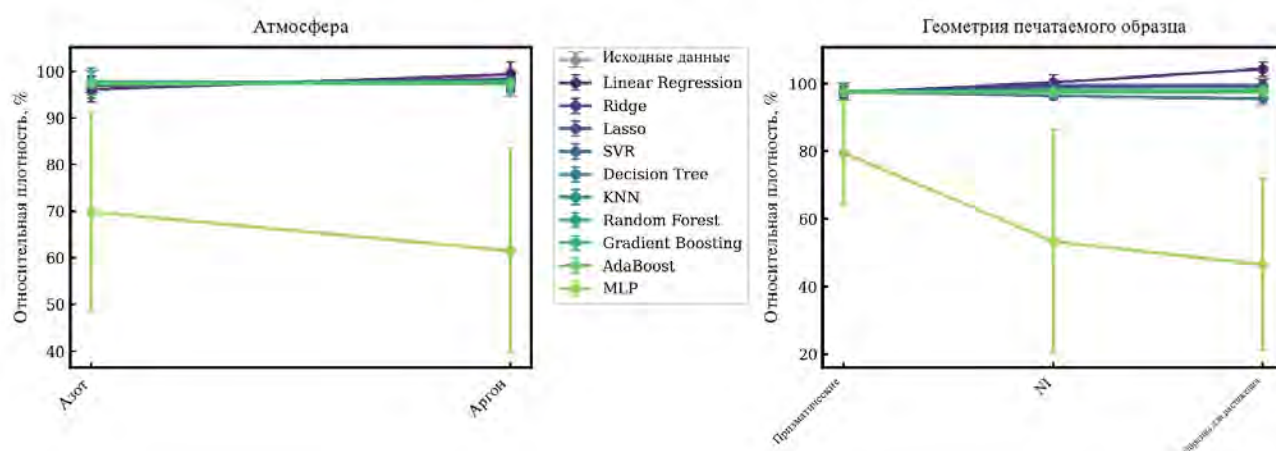
Размер пятна и геометрический фактор также имеют преимущественно вторичное влияние в графиках главных эффектов. Размер пятна определяет площадь взаимодействия луча с материалом и может изменять ширину и глубину ванны расплава, но его одномерная тенденция слабее, чем у скорости сканирования и шага штриховки. На карте «размер пятна–атмосфера»

общий диапазон прогнозируемой плотности составляет 96,599–98,461%, то есть 1,862 процентного пункта. На карте «размер пятна–геометрия образца» — 96,780–98,701%, или 1,921 процентного пункта. Эти величины показывают, что размер пятна вносит вклад в изменение плотности, но сам по себе не доминирует. Геометрический фактор ведет себя сходным образом. На карте «геометрический фактор–геометрия образца» плотность изменяется от 95,487 до 98,701%, диапазон — 3,214 процентного пункта. Это указывает на наличие геометрических эффектов, но они менее прямые, чем эффекты энергоснабжения и перекрытия треков, связанные со скоростью сканирования и шагом штриховки.

Дескриптор размера порошка D_{50} дает сравнительно ограниченную глобальную

тенденцию. Большинство надежных моделей прогнозирует относительную плотность в узкой высокоплотной полосе в центральной области D_{50} . На карте « D_{50} –атмосфера» прогнозируемая плотность варьируется от 96,468 до 98,465%, то есть на 1,997 процентного пункта. На карте « D_{50} –геометрия образца» диапазон составляет 96,502–98,701%, или 2,199 процентного пункта. Эти результаты показывают, что размер порошка влияет на отклик, но слабее скорости сканирования и шага штриховки. Это логично, поскольку для многих наблюдений размер порошка сосредоточен в относительно узком диапазоне около 30–32 мкм, тогда как скорость сканирования и шаг штриховки охватывают более широкие технологически значимые диапазоны.

Главные эффекты категориальных параметров



Категориальные графики главных эффектов для атмосферы и геометрии печатаемого образца.

Категориальные графики главных эффектов на рис. показывают, что атмосфера и геометрия образца влияют на отклик, однако их влияние слабее и сильнее зависит от модели, чем влияние основных непрерывных переменных. Для атмосферы большинство надежных моделей прогнозирует близкие уровни относительной плотности в азоте и аргоне, обычно в высокоплотном диапазоне около 96–99%. Следо-

вательно, категориальный эффект нельзя свести к простому глобальному смещению от одной атмосферы к другой. Карты отклика показывают, что атмосфера взаимодействует с технологическими переменными. Например, в самом высоком интервале скорости 1200–2000 мм/с прогнозируемая плотность для азота составляет 90,558%, а для аргона — 93,806%. Значение в аргоне выше на 3,248 процентного пункта, что

соответствует примерно 3,6% улучшения относительно азота. Однако при умеренных скоростях обе атмосферы сохраняют плотность около 98%, показывая, что влияние атмосферы становится более заметным в жестких режимах обработки.

Геометрия образца также дает условный отклик. На категориальном графике главных эффектов большинство надежных моделей остается в высокоплотной области для призматических, NI- и растяжных образцов. Однако карты отклика показывают взаимодействие геометрии со скоростью сканирования, шагом штриховки, мощностью лазера и толщиной слоя. Например, на карте «скорость сканирования–геометрия образца» плотность призматических образцов снижается с

98,670% при 600–700 мм/с до 92,531% при 1200–2000 мм/с — на 6,139 процентного пункта, или примерно на 6,2%. В то же время для растяжных образцов в высокоскоростном интервале прогнозируется 96,810%, что на 4,279 процентного пункта выше, чем для призматических образцов при той же скорости. Аналогично на карте «шаг штриховки–геометрия образца» призматические образцы при наибольшем шаге снижаются до 91,239%, тогда как случаи NI в том же диапазоне шага сохраняют 98,729%. Такая большая разница подтверждает, что категориальные переменные нельзя интерпретировать только по их усредненным главным эффектам; их значение проявляется главным образом через взаимодействия с непрерывными дескрипторами процесса.

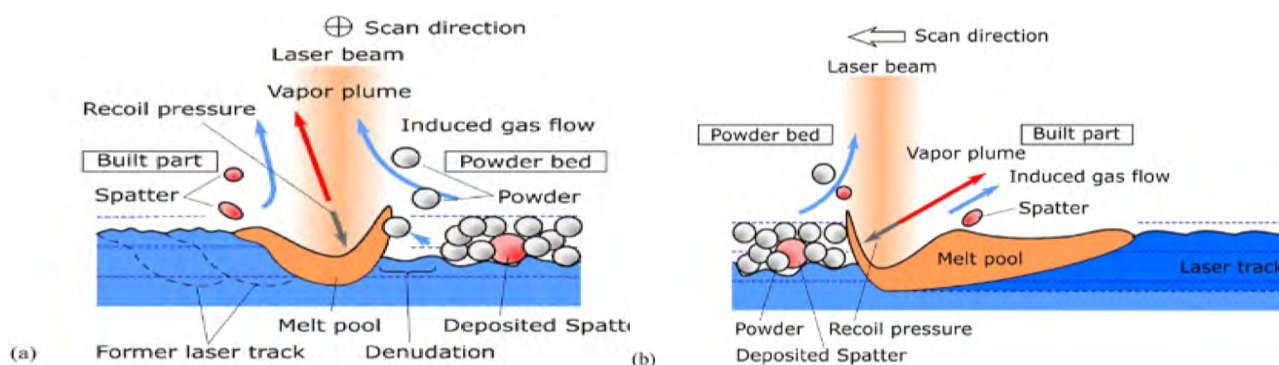


Схема формирования ванны расплава, индуцированного испарением газового потока, денудации порошка и переноса брызг при LPBF: (a) поперечный вид, перпендикулярный пути лазерного сканирования, и (b) продольный вид, параллельный ему. Направление сканирования показывает движение лазерного пятна относительно неподвижного слоя порошка и построенной детали. Выброшенные брызги могут повторно осаждаться на затвердевшем треке или окружающем слое порошка. Адаптировано/воспроизведено из [29] с разрешения.

2.6 Механизмы лазерного сплавления

Inconel 718 в слое порошка

Тенденции печатаемости, выявленные анализом AIMPOD, можно интерпретировать через механизмы ванны расплава, действующие во время лазерного сплавления в слое порошка. Как показано на рис., лазерный луч локально расплавляет слой порошка и вызывает образование ванны расплава, парового факела, давления

отдачи, индуцированного газового потока, брызг, денудации и осаждения брызг вокруг траектории сканирования. Эти взаимосвязанные явления определяют конечное уплотнение, поскольку от них зависит, будет ли порошок полностью консолидирован в непрерывную дорожку или между треками и слоями останутся дефекты.

При чрезмерной скорости сканирования или большом шаге штриховки уменьшаются время взаимодействия лазера с материалом и перекрытие треков.

В этих условиях ванна расплава может становиться мелкой или прерывистой, что повышает вероятность пористости вследствие несплавления и уменьшает относительную плотность. Это согласуется с результатами модели, где скорость сканирования и шаг штриховки оказались наиболее сильными переменными, связанными со снижением плотности. Напротив, достаточная энергия лазера и надлежащее перекрытие способствуют устойчивой непрерывности ванны расплава и лучшей консолидации порошка.

Однако увеличение энергозатрат полезно не во всех случаях. При чрезмерной локальной энергии испарение, давление отдачи и поток, вызванный паровым факелом, могут дестабилизировать ванну расплава и способствовать образованию брызг или кейхольных дефектов.

Следовательно, окно печатаемости LPBF Inconel 718 определяется балансом между недостаточным плавлением при низком эффективном энергозатрате и нестабильностью ванны расплава при чрезмерном энергозатрате. Поэтому карты отклика на основе AIMPOD следует интерпретировать как основанные на данных представление этих фундаментальных механизмов процесса, а не как чисто статистические поверхности.

3. Выводы

В настоящем исследовании разработана схема на основе AIMPOD для построения карт печатаемости LPBF Inconel 718 по относительной плотности. Рабочий процесс объединяет профилирование набора данных, сравнительное машинное обучение, ансамблевое прогнозирование, интерпретируемость модели и картирование параметрических откликов для выявления основных технологических тенденций, связанных с уплотнением.

Собранный набор данных охватывал широкое экспериментально представленное технологическое окно: мощность лазера 90–400 Вт, скорость сканирования 100–2000 мм/с, шаг штриховки 0,05–0,25 мм, толщину слоя 0,02–0,062 мм и относительную плотность 81,44–99,94%. Хотя данные были в основном сосредоточены около высокоплотных условий, низкоплотный хвост содержал информацию о менее благоприятных режимах обработки.

Скорость сканирования показала наиболее сильную связь первого порядка с относительной плотностью, $r \approx -0,51$, далее следовал шаг штриховки с $r \approx -0,28$. Эти тенденции согласуются соответственно с уменьшением времени взаимодействия лазера с материалом и уменьшением перекрытия треков расплава, но должны рассматриваться как связи на уровне набора данных, а не как независимые причинные эффекты.

Среди отдельных моделей Gradient Boosting показал лучшее внутренне оцененное качество: $R^2 \approx 0,69$, $RMSE \approx 0,84$ процентного пункта и $MAE \approx 0,61$ процентного пункта. Более низкая ошибка относительно линейных моделей показывает, что отклик плотности LPBF лучше описывается нелинейными и чувствительными к взаимодействиям зависимостями.

Оптимизированный ансамбль объединил Gradient Boosting, KNN и Random Forest с весами 0,613; 0,384 и 0,004 соответственно. Он достиг внутренне оцененного $R^2 = 0,7233$ и $RMSE$ 0,7865 процентного пункта. Анализ SHAP присвоил наибольшую важность скорости сканирования, мощности лазера и шагу штриховки, тогда как остальные дескрипторы проявлялись преимущественно как вторичные или зависящие от взаимодействий переменные.

Основные ограничения связаны с неоднородной природой набора данных, собранного из литературы, сильной концентрацией наблюдений около высокой относительной плотности и отсутствием независимой внешней валидации. Модель предназначена для интерполяции внутри экспериментально представленной области параметров и не должна использоваться для неограниченной экстраполяции за пределы этих диапазонов. Кроме того, относительная плотность характеризует степень уплотнения, но не описывает полностью растрескивание, качество поверхности, остаточные напряжения, микроструктуру и механические характеристики. В будущих исследованиях следует рассмотреть прямую микроскопию, SEM-характеризацию дефектов, анализ ванны расплава, фазовый анализ, количественную оценку неопределенности и валидацию на новых кампаниях построения. Обученный ансамбль, объекты предварительной обработки, веса модели и процедура прогнозирования будут предоставлены как дополнительные материалы для поддержки воспроизводимости и дальнейшей оценки.

Литература

1. Sames WJ, List FA, Pannala S, Dehoff RR, Babu SS (2016) The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *Intern Mater Rev* 61(5):315–360.
2. Frazier WE (2014) Metal additive manufacturing: a review. *J Mater Eng Perform* 23(6):1917–1928.
3. DebRoy T, Wei HL, Zuback JS, Mukherjee T, Elmer JW, Milewski JO, Beese AM, Wilson-Heid A, De A, Zhang W (2018) Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. *Prog Mater Sci* 92:112–224.
4. Lewandowski JJ, Seifi M (2016) Metal additive manufacturing: a review of mechanical properties. *Annu Rev Mater Res* 46(1):151–186.
5. Jia Q, Dongdong G (2014) Selective laser melting additive manufacturing of inconel 718 superalloy parts: Densification, microstructure and properties. *J Alloy Compd* 585:713–721.
6. Amato KN, Gaytan SM, Murr LE, Martinez E, Shindo PW, Hernandez J, Collins S, Medina FJAM (2012) Microstructures and mechanical behavior of inconel 718 fabricated by selective laser melting. *Acta Mater* 60(5):2229–2239.
7. Chlebus E, Gruber K, Kuźnicka B, Kurzac J, Kurzynowski T (2015) Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of inconel 718 processed by selective laser melting. *Mater Sci Eng A* 639:647–655.
8. Moussaoui K, Rubio W, Mousseigne M, Sultan T, Rezai FJMS (2018) Effects of selective laser melting additive manufacturing parameters of inconel 718 on porosity, microstructure and mechanical properties. *Mater Sci Eng A* 735:182–190.
9. Kumar P, Farah J, Akram J, Teng C, Ginn J, Misra M (2019) Influence of laser processing parameters on porosity in inconel 718 during additive manufacturing. *Intern J Adv Manufact Technol* 103(1):1497–1507.
10. Balbaa M, Mekhiel S, Elbestawi M, Mclsaac J (2020) On selective laser melting of inconel 718: Densification, surface roughness, and residual stresses. *Mater Design* 193:108818.
11. Liu H, Cheng W, Sun Y, Ma R, Wang Y, Bai J, Xue L, Song X, Tan C (2023) Effects of process parameters and heat treatment on microstructure and mechanical characteristics of laser powder bed fusion alloy inconel 718. *Coatings* 13(1):189.
12. Shao W, He B, Qiu C, Li Z (2022) Effect of hatch spacing and laser remelting on the formation of unique crystallographic texture of in718 superalloy fabricated via laser powder bed fusion. *Opt Laser Technol* 156:108609.
13. Mao Y, Gao Y, Juan H, Shen X, Zhou H (2024) Effect of hatch spacing on the quality of inconel 718 alloy part. *Materials* 17(2):452.
14. Jiang C-P, Maidhah AA, Wang S-H, Wang Y-R, Pasang T, Ramezani M (2023) Laser powder bed fusion of inconel 718 tools for cold deep drawing applications: optimization of printing and post-processing parameters. *Materials* 16(13):4707.
15. King WE, Barth HD, Castillo VM, Gallegos GF, Gibbs JW, Hahn DE, Kamath C, Rubenchik AM (2014) Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing. *J Mater Process Technol* 214(12):2915–2925.
16. Khairallah SA, Anderson AT, Rubenchik A, King WE (2016) Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. *Acta Mater* 108:36–45.
17. Matthews MJ, Guss G, Khairallah SA, Rubenchik AM, Depond PJ, King WE (2017) Denudation of metal powder layers in laser powder-bed fusion processes. In: *Additive manufacturing handbook*. CRC Press, pp 677–692.
18. Bidare P, Bitharas I, Ward RM, Attallah MM, Moore AJ (2018) Fluid and particle dynamics in laser powder bed fusion. *Acta Mater* 142:107–120.
19. Tang M, Pistorius PC, Beuth JL (2017) Prediction of lack-of-fusion porosity for powder bed fusion. *Addit Manuf* 14:39–48.
20. Gobert C, Reutzel EW, Petrich J, Nassar AR, Phoha S (2018) Application of supervised machine learning for defect detection during metallic powder bed fusion additive manufacturing using high resolution imaging. *Addit Manuf* 21:517–528.
21. Scime L, Beuth J (2018) Anomaly detection and classification in a laser powder bed additive manufacturing process using a trained computer vision algorithm. *Addit Manuf* 19:114–126.
22. Baumgartl H, Tomas J, Buettner R, Merkel M (2020) A deep learning-based model for defect detection in laser-powder bed fusion using in-situ thermographic monitoring. *Progr Addit Manufact* 5(3):277–285.
23. Li K, Ma R, Qin Y, Gong N, Wu J, Wen P, Tan S, Zhang DZ, Murr LE, Luo J (2023) A review of the multi-dimensional application of machine learning to improve the integrated intelligence of laser powder bed fusion. *J Mater Process Technol* 318:118032.
24. Theeda S, Jagdale SH, Ravichander BB, Kumar G (2023) Optimization of process parameters in laser powder bed fusion of ss 316l parts using artificial neural networks. *Metals* 13(5):842.
25. Barrionuevo GO, La Fé-Perdomo I, Ramos-Grez JA (2025) Laser powder bed fusion dataset for relative density prediction of commercial metallic alloys. *Scientific Data* 12(1):375.
26. Khalad A, Telasang G, Kadali K, Zhang PN, Xu W, Chinthapenta V (2024) A generalized machine learning framework for data-driven prediction of relative density in laser powder bed fusion parts. *Intern J Adv Manufact Technol* 135(9):4147–4167.
27. Roy A, Swope A, Devanathan R, Van Rooyen IJ (2024) Chemical composition based machine learning model to predict defect formation in additive manufacturing. *Materialia* 33:102041.
28. Lu C, Shi J (2022) Relative density prediction of additively manufactured inconel 718: A study on genetic algorithm optimized neural network models. *Rapid Prototyp J* 28(8):1425–1436.
29. Ikeshoji T-T, Yonehara M, Kato C, Yanaga Y, Takeshita K, Kyogoku H (2022) Spattering mechanism of laser powder bed fusion additive manufacturing on heterogeneous surfaces. *Sci Rep* 12(1):20384.

Оборудование · Интеграция · Производство деталей · Инжиниринг · Сервис



КОМПЛЕКСНЫЙ ПОСТАВЩИК аддитивных промышленных решений

Оборудование 3D-принтеры / 3D-сканеры



полимеры
и полиамиды



песчаные литейные
формы и стержни



SLM/LPBF
металлы

Услуги



Промышленная 3D-печать



Интеграция участков производств



Реверс-инжиниринг и КД



Обучение и сопровождение

i3d.group

+7 (495) 108 60 68

3d@i3d.ru



Прочти
меня на
сайте

Производственная площадка Metal-Sprint во время повторного визита редакции Industry3D.

Не демонстрационные образцы, а реальные изделия: что изменилось на производстве Metal-Sprint

Спустя несколько месяцев редакция Industry3D снова приехала на площадку Metal-Sprint. За время, прошедшее после первой экскурсии, здесь стало больше оборудования, а главное — заметно больше самых разных изделий.

На столах, в производственной зоне и рядом с установками находились не отдельные образцы, созданные для демонстрации возможностей технологии, а детали, связанные с реальными промышленными задачами.

Что изменилось со времени прошлого визита

Во время нашей предыдущей экскурсии на площадке работали четыре установки селективного лазерного плавления (SLM): три находились в основном производственном помещении и ещё одна — в отдельной зоне. Компания также готовилась принять две машины SLM с областью построения 480×320 мм. Об этом мы рассказывали в материале «Как в России печатают металлом: экскурсия на Metal-Sprint».

Теперь парк оборудования стал больше. И скоро будет еще больше. Уже оплачена и собирается еще одна установка по другой технологии. На этот раз это DED.

На первый взгляд, увеличение количества машин можно воспринимать просто как расширение производственных мощностей. Однако гораздо интереснее другое: вместе с оборудованием расширилась номенклатура изделий, которые одновременно находятся в работе.



Две новые установки Kings M480.

В одну установку могут быть загружены несколько деталей или целая партия изделий. Где-то печатаются небольшие компоненты сложной формы, где-то — более крупные элементы, а отдельные проекты занимают значительную часть рабочей области машины.

Именно загрузка оборудования лучше всего показывает, как меняется положение металлической 3D-печати. Технология постепенно выходит за пределы экспериментов и единичных демонстрационных проектов. На одном производстве одновременно можно увидеть изделия для нескольких совершенно разных сфер — от приборостроения до аэрокосмической промышленности.

Печать металлом уже используется значительно шире, чем кажется

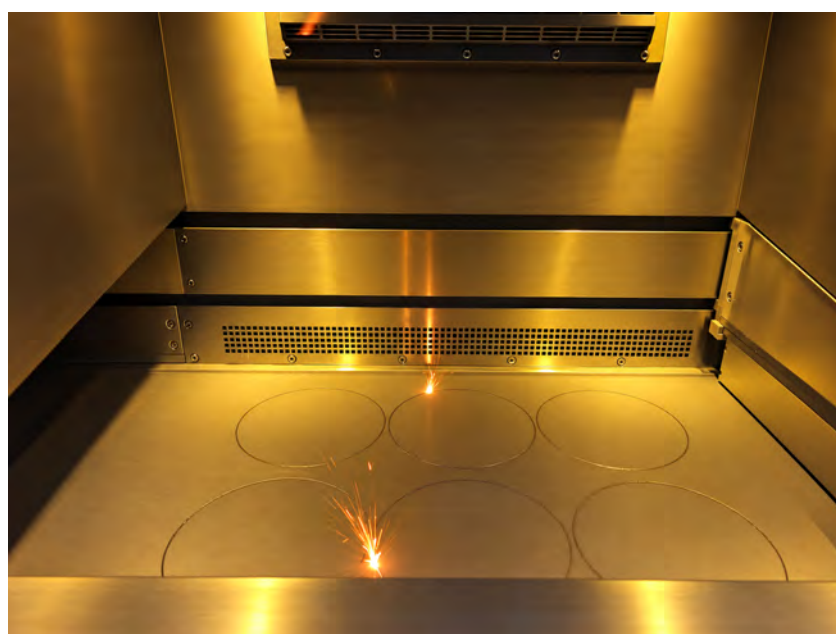
Посетителю такого производства сложно сразу

определить назначение большинства изделий. Многие детали не похожи на привычные корпуса, шестерни или крепления. Их форму определяет функция: внутренние каналы, требуемое распределение материала, ограничения по массе, способ монтажа и условия эксплуатации.

Некоторые изделия

напоминают фрагменты двигателей и теплообменников. Другие выглядят как миниатюрные корпуса со сложной системой отверстий. Третьи вообще трудно соотнести с каким-либо знакомым механизмом, пока не узнаешь, для чего они предназначены.

Именно эта непохожесть часто становится одним из



Печать сразу шести крупных деталей на новой двухлазерной установке Kings M480.

На производстве

главных преимуществ аддитивного производства. Инженер может проектировать деталь исходя из её задачи, а не только из возможностей фрезы, токарного резца, пресс-формы или сварочного оборудования.

Сейчас основа производственного парка Metal-Sprint — установки SLM и оборудование для сопутствующих операций. При этом в компании планируют расширять технологический набор и в дальнейшем добавлять оборудование, работающее по другим аддитивным технологиям.

Но во время экскурсии сама технология довольно быстро перестаёт быть главным объектом внимания. Значительно интереснее рассматривать то, что уже выходит из производственных камер.

От цифровой модели до металлической детали

Фраза «3D-печать быстрее традиционного производства» нуждается в уточнении. Аддитивный процесс не всегда выигрывает у токарной обработки, литья или штамповки по времени изготовления каждой отдельной детали.

Преимущество появляется в других местах производственной цепочки.

Для печати не требуется сначала изготовить отдельную пресс-форму, литейную оснастку или сложный набор приспособлений. После подготовки трёхмер-

ной модели, выбора ориентации, построения поддержек и настройки параметров изделие можно отправлять в производство.

Это особенно важно при изготовлении:

- единичных деталей;
- прототипов, которые должны быть выполнены из рабочего металла;
- небольших и средних партий;
- компонентов сложной формы;
- изделий, конструкция которых ещё может измениться;
- деталей с внутренними каналами;
- запасных частей, для которых отсутствует готовая оснастка;
- элементов, объединяющих несколько компонентов традиционной сборки.

В традиционном производстве значительная часть времени может уходить не на само изготовление детали, а на подготовку процесса. При аддитивном подходе этот путь иногда удаётся сократить: внести изменения в цифровую модель, заново подготовить построение и напечатать следующую версию.

Поэтому корректнее говорить не просто о высокой скорости принтера, а о сокращении полного цикла — от конструкторской задачи до получения металлической заготовки или готового изделия.

Облегчение как реальная производственная задача

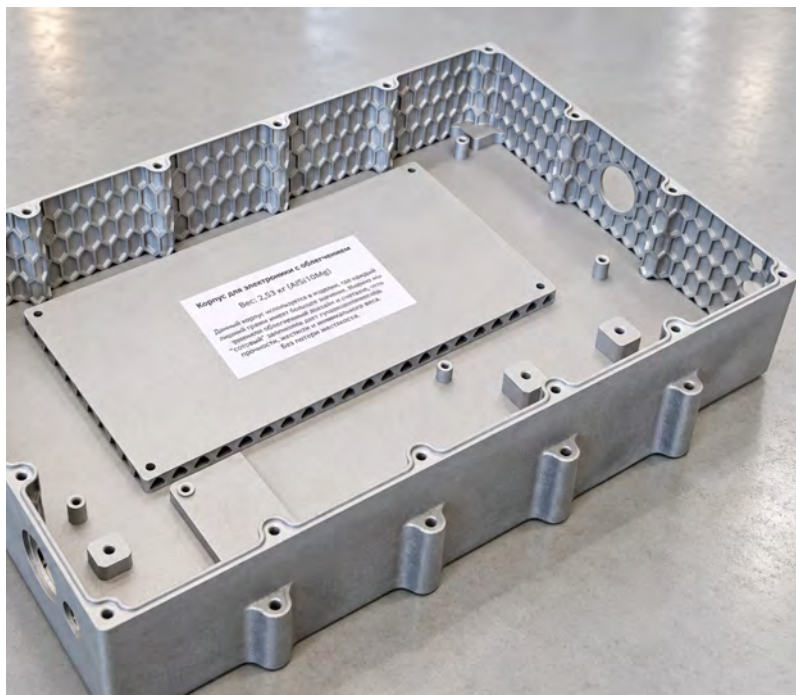
Один из наиболее наглядных примеров того, зачем промышленности нужна металлическая 3D-печать, — не изготовление принципиально новой детали, а переработка уже существующей конструкции. На площадке нам показали сразу несколько пар изделий: исходный вариант и облегчённую версию из того же материала RS-300.

Такое сравнение особенно показательное: масса уменьшается не за счёт замены материала на более лёгкий, а за счёт изменения геометрии и перераспределения материала внутри детали. Это уже не демонстрация возможностей принтера, а обычная инженерная задача — оставить материал там, где он действительно нужен, и убрать его там, где он не работает.

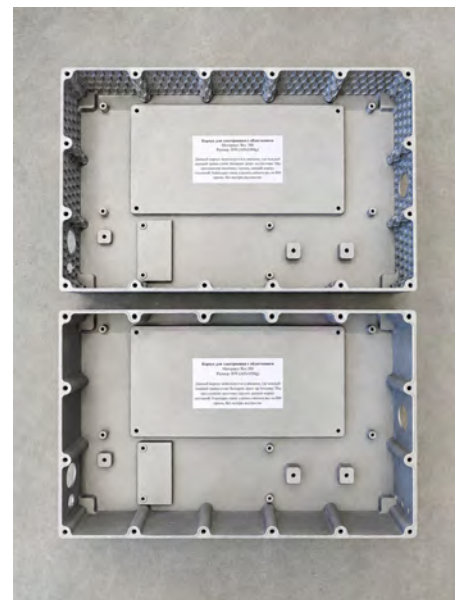
Три примера, которые мы увидели на производстве, хорошо показывают масштаб эффекта.

Корпус электроники для авиации: минус 800 граммов

Первый пример — корпус для электроники, используемый в авиации. Оба варианта выполнены из RS-300. Исходная конструкция весит 3630 г, облегчённая — 2830 г. Разница составляет 800 г, или примерно 22% массы детали.



Облегченный корпус.



Исходный и облегчённый варианты авиационного корпуса из RS-300: 3630 и 2830 г соответственно.

При этом, по данным Metal-Sprint, жёсткость конструкции удалось сохранить. Облегчение получили благодаря сотовой структуре: часть сплошного объёма заменили геометрией, которая требует меньше материала, но сохраняет

необходимую работу корпуса.

Корпус масляного фильтра для грузового автомобиля: минус 2,5 килограмма

Второй пример — корпус масляного фильтра. Здесь также сравниваются две

версии из RS-300. Исходный корпус весит 5000 г, облегчённый — 2500 г.

Снижение массы составило 2500 г, то есть 50%. Для деталей такого размера это уже не небольшая оптимизация, а заметное изменение конструкции.



Исходный и облегчённый корпус масляного фильтра.



Корпус масляного фильтра после облегчения: 2500 г.

Корпус электроники
для авиации

- 800 ГР.

Корпус масляного фильтра для
грузового автомобиля

- 2 500 ГР.

Корпус блока управления
лебёдки

- 700 ГР.

Корпус блока управления лебёдки: минус 700 граммов

Ещё одна пара — корпус блока управления лебёдки, также изготовленный из RS-300. Масса исходной версии — 2580 г, облегчённой — 1880 г.

В этом случае удалось убрать 700 г, или около 27% исходной массы.

Что показывают эти три примера

Во всех трёх случаях материал остаётся одним и тем же, а результат даёт именно переработка геометрии: масса уменьшается примерно на 22–50%. И это без потери жёсткости.

У аддитивного маршрута есть и ещё одно важное преимущество для подобных задач. После изменения цифровой модели новую версию можно снова подготовить к построению без изготовления новой формообразующей оснастки. Именно поэтому 3D-печать удобна не только для выпуска сложной детали, но и для последовательной отработки её конструкции.

На практике это хорошо дополняет разговор о скорости производства: выигрыш может возникать



Исходный и облегчённый корпус блока управления лебёдки.



Корпус блока управления лебёдки из RS-300: 1880 г.

не потому, что лазер быстрее фрезы или литейной машины, а потому, что между новой CAD-моделью и следующим физическим вариантом детали становится меньше подготовительных этапов.

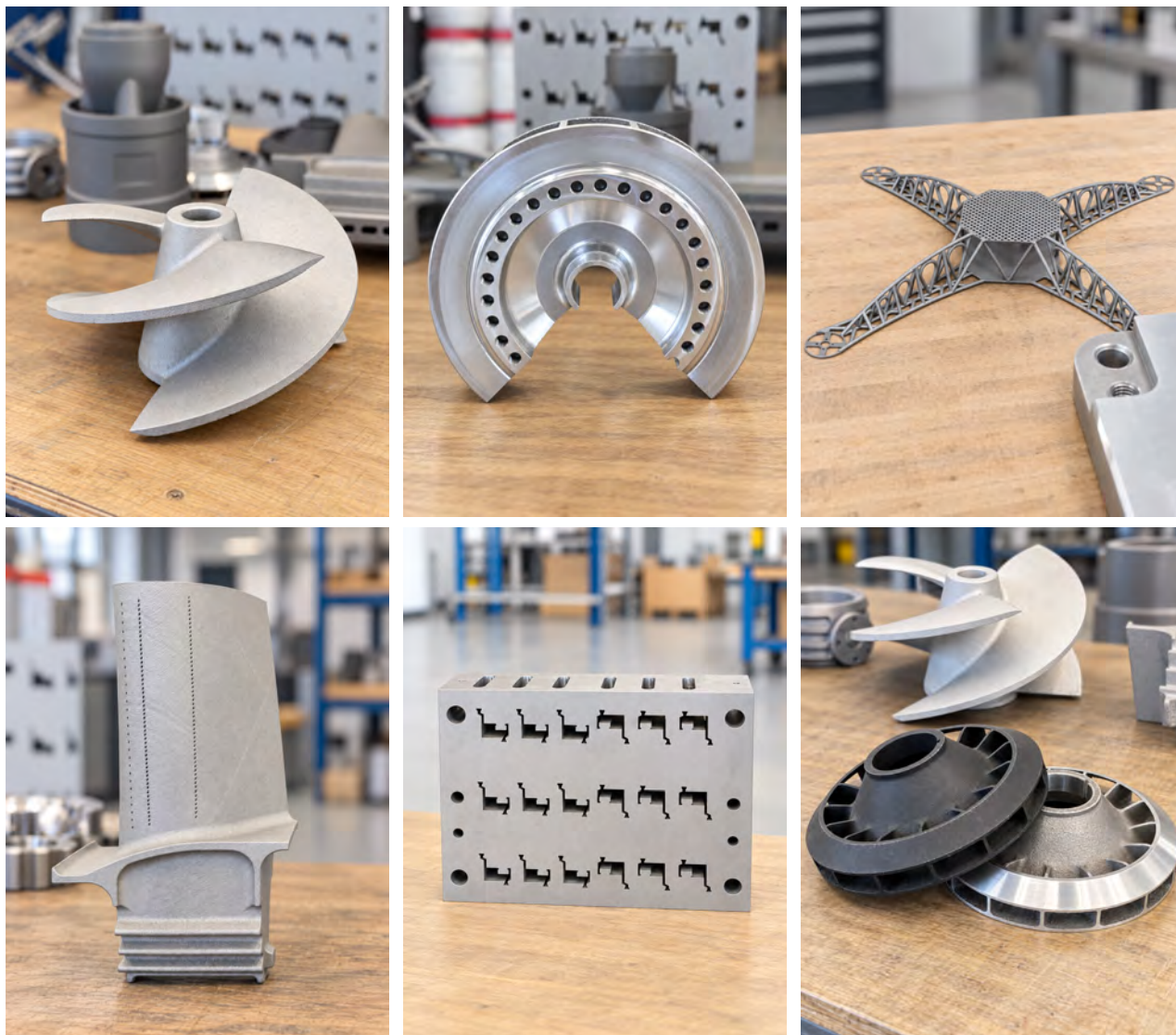
Печать того, что нельзя показывать

Далеко не все аэрокосмические проекты настолько открыты. Во время экскурсии одна из установок печатала изделие для аэрокосмической отрасли, подробности которого не раскрываются, а саму деталь нельзя показывать полностью. Для промышленной 3D-печати это обычная ситуация: наиболее интересные

разработки нередко закрыты требованиями конфиденциальности.

Не только аэрокосмос

Аэрокосмическое направление остаётся одним из самых наглядных для аддитивных технологий, но увиденные на площадке примеры этим не ограничиваются. Корпус масляного фильтра и корпус блока управления лебёдки показывают, что та же логика облегчения применяется и к задачам наземной техники и промышленного оборудования. Кроме этих изделий, на производстве были и другие детали, назначение которых можно раскрывать в разной степени.



Галерея готовых изделий.

Один принтер — несколько разных задач

Ещё одна важная особенность аддитивного производства становится заметна при взгляде на платформу построения. На ней необязательно находится одно крупное изделие. В рамках одного цикла можно разместить несколько одинаковых или разных деталей, если это допускают материал, параметры процесса и производственная задача.

Для небольших серий это особенно интересно. Производству не требуется созда-

вать отдельный комплект оснастки для каждой геометрии. Несколько деталей можно объединить в одно построение, а при следующем запуске изменить состав партии.

Это не означает, что металлическая 3D-печать автоматически становится самым дешёвым способом производства. Порошки, оборудование, защитная атмосфера, подготовка построения и последующая обработка остаются дорогими. Но технология даёт гибкость, которая может быть важнее

минимальной стоимости одного изделия.

Особенно когда речь идёт о срочном проекте, сложной геометрии или небольшой партии.

После завершения печати работа не заканчивается

Готовая деталь не появляется в камере принтера в том виде, в котором её сразу можно установить в двигатель, прибор или летательный аппарат.

После выращивания изделие необходимо извлечь из порошка, очис-

На производстве

тить, отделить от платформы и удалить поддержки. В зависимости от материала и требований проекта могут потребоваться термообработка, механическая обработка посадочных поверхностей, шлифование, полирование и контроль.

Именно постобработка часто определяет, насколько быстро напечатанная заготовка станет функциональной деталью. Поэтому при сравнении с традиционными технологиями важно учитывать весь маршрут, а не только часы работы установки. Ранее, мы подробно писали о постобработке SLM.

Тем не менее даже с учётом последующих операций аддитивный процесс способен сократить срок изготовления. Особенно в случаях, когда традиционный маршрут требует производства оснастки, большого количества переходов или сборки детали из нескольких элементов.

Скорость как возможность быстрее менять конструкцию

Наиболее ценным результатом ускорения может оказаться не только раннее получение готовой детали, но и возможность быстрее проверить инженерное решение.

Если во время испытаний выясняется, что необходимо изменить толщину стенки, положение канала, крепление или форму отдельного



Постобработка.

участка, конструктор корректирует цифровую модель. После повторной подготовки файла новая версия снова отправляется в производство.

При традиционном подходе подобное изменение иногда требует переделки оснастки или повторной настройки нескольких производственных операций. При аддитивном — основной объём изменений происходит в цифровой модели и подготовке построения.

Именно поэтому техноло-

гия особенно востребована там, где одновременно важны сложность изделия и скорость разработки.

От красивых образцов к повторяемому производству

Во время повторного визита оборудования стало больше, установки загружены разными проектами, а рядом находится множество уже изготовленных деталей.

Это важный переход. Зрелость технологии определяется не тем, насколько эффектно выглядит единичный образец, а способнос-

тью производства снова и снова получать изделия с требуемой геометрией и характеристиками.

Что дальше

Расширение парка машин создаёт возможность одновременно вести больше проектов и брать в работу более крупные изделия. Но следующий этап развития связан не только с количеством принтеров.

Для промышленного производства важна вся цепочка: подготовка моделей, работа с порошками, печать, термообработка, механическая обработка, контроль и документирование результатов.

В ближайших планах Metal-Sprint:

- покупка или запуск нового оборудования;
- расширение участка постобработки;
- рост объёмов серийного производства;

• расширение производственной площадки.

Металлическая печать становится обычным производственным инструментом

За время между двумя визитами на площадку Metal-Sprint изменилась не сама физика процесса. Лазер по-прежнему послойно формирует изделие из металлического порошка. Изменился масштаб увиденного.

Стало больше оборудования. Стало больше одновременно выполняемых задач. И стало больше деталей, по которым уже можно обсуждать не абстрактные преимущества технологии, а конкретный инженерный результат: например, снижение массы корпуса на 800 г, 2,5 кг или 700 г при сохранении того же материала.

Металлическая 3D-печать не отменяет традиционное

производство. Напечатанные изделия по-прежнему могут нуждаться в термообработке, фрезеровании, токарной обработке и контроле. Для простых деталей и крупных партий классические методы часто остаются рациональнее.

Но там, где необходимы сложная геометрия, внутренние каналы, малая серия, быстрое изменение конструкции или сокращение количества компонентов, аддитивное производство уже становится практическим рабочим инструментом.

И, судя по тому, насколько разные изделия сегодня находятся рядом с принтерами Metal-Sprint — от авиационных корпусов до компонентов для наземной техники, — область применения металлической 3D-печати продолжает расширяться. 🌐



SLM 3D-ПРИНТЕРЫ
для промышленной печати металлами

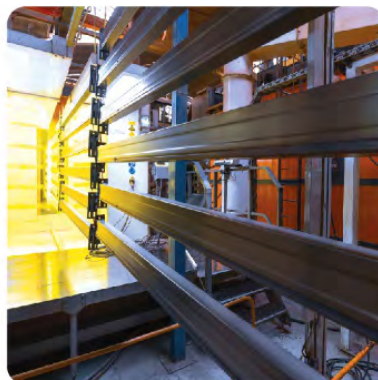
i3D
3D - ИНТЕГРАЦИЯ

Гальваническое оборудование

Покрытия и оборудование
для их нанесения

Оборудование и материалы
для обработки поверхности

Оборудование и материалы
для очистки сточных вод,
воздухоочистки
и утилизации отходов



19-21 октября

2026

Москва, Крокус Экспо

Организатор — компания MVK
Офис в Санкт-Петербурге

MVK Международная
Выставочная
Компания

expocoating-moscow.ru

18+



От рецептуры до детали: как в М-Шейп разрабатывают материалы для 3D-печати



Прочти
меня на
сайте

Бронзонаполненные гранулы, полиамид, который удалось напечатать на открытом Ender 3, металлические и керамические композиции и собственная лабораторно-производственная база. Industry3D побывал на производстве М-Шейп и посмотрел, как рождаются материалы для аддитивного производства — буквально от смешивания компонен-

тов до готовой детали.

Есть производства, на которых во время экскурсии вам показывают заранее подготовленные образцы, аккуратно расставленные на полках. А есть производства, куда удаётся попасть в особенно удачный момент — когда прямо сейчас происходит что-то новое.

С М-Шейп получился именно второй вариант.

Офис и производствен-

ный участок М-Шейп находятся в пешей доступности от **метро Дмитровская**. Площадка компактная: оборудование для подготовки материалов, 3D-принтеры и печи расположены рядом, поэтому всю технологическую цепочку здесь можно пройти буквально за одну экскурсию — от исходных компонентов до напечатанного и термообработанного образца.

В день нашего визита команда занималась новым материалом — бронзонаполненными гранулами. Именно их разработку М-Шейп выполняет в рамках НИОКР по заказу клиента. В дальнейшем заказчик планирует использовать этот материал для 3D-печати статуэток и других изделий.

Поэтому вместо того, чтобы увидеть только конечный результат, мы застали почти всю цепочку разработки: подготовку и смешивание компонентов, получение композиции, гранулирование и печать тестовых образцов, которым ещё предстоит дальнейшие испытания.

И именно этот процесс, пожалуй, лучше всего объясняет, чем занимается М-Шейп.

С чего начинается материал

Для пользователя FDM-принтера материал чаще всего начинается с катушки: поставил филамент, выбрал профиль печати и получил деталь. Но до появления стабильного инженерного материала на катушке существует довольно длинная цепочка — подбор сырья, соотношения компонентов, смешивание, гранулирование или получение филамента, подбор температур, скоростей, параметров экструзии и печати, изготовление тестовых образцов и их испытания.

А когда речь идёт о напол-



Подготовка бронзонаполненной композиции.

ненных системах, задача становится ещё сложнее.

М-Шейп как раз работает на этом уровне. Компания разрабатывает и производит материалы в виде гранул и филаментов и подбирает составы под реальные инженерные задачи. В линейке и разработках предприятия — инженерные пластики и композиты, а также металл- и керамиконаполненные материалы.

Во время экскурсии это было особенно хорошо видно: в отдельном блоке

находится оборудование для подготовки материалов, а технологическая цепочка не заканчивается непосредственно 3D-печатью. На производстве установлены две муфельные и одна вакуумная печи, оборудование для работы с гранулами и филаментами, несколько 3D-принтеров для проверки материалов.

То есть это скорее небольшая материаловедческая лаборатория, объединённая с производственным участком, где рецептура материала и технология получения

То есть это скорее небольшая материаловедческая лаборатория, объединённая с производственным участком, где рецептура материала и технология получения детали рассматриваются как единое целое.

детали рассматриваются как единое целое.

При этом характеристиками из собственной лаборатории здесь не ограничиваются.

Часть материалов М-Шейп проходит независимые испытания. Нам показали протоколы лаборатории ООО «РусАвтоПласт» в Тольятти, где проверяли реальные партии материала.

лов компании.

В протоколах есть уже вполне конкретные показатели: текучесть расплава, зольность, прочность и модуль при растяжении и изгибе, усадка, водопоглощение, ударная вязкость, теплостойкость. То есть цифры в таблицах свойств появляются не только из внутренних испытаний производителя.

Бронза: НИОКР в реальном времени

Самым интересным процессом во время нашего визита стала работа с бронзой.

Сначала подготавливаются исходные компоненты будущего материала, затем они смешиваются, а полученную композицию гранулируют. Именно бронзонаполненные гранулы и

ООО «РусАвтоПласт»
Лаборатория ООО «РусАвтоПласт»
Россия, 445004, г. Тольятти ул. Базовая, 40 тел/факс:(8482) 698-200

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ		№
Наименование материала (марка, тип)		М-Шейп 3Д ПА6-СВ10
Партия	160/3-26	
Дата изготовления	06.07.2026 г.	
Масса партии	53 кг	
Производитель	ООО «РусАвтоПласт»	

Результаты испытаний:

Наименование показателя	Ед. изм.	Методы испытаний	Результаты испытаний
1. Показатель текучести расплава, 260°C/2,16кг	г/10 мин.	ГОСТ 11645	27
2. Массовая доля золы (800 °C)	%	ГОСТ 15973	9,2
3. Модуль упругости при изгибе	МПа	ГОСТ 9550	4350
4. Изгибающее напряжение при максимальной нагрузке	МПа	ГОСТ 9550	153
5. Модуль упругости при растяжении	МПа	ГОСТ 9550	3600
6. Прочность при растяжении	МПа	ГОСТ 11262	96
7. Относительное удлинение при разрыве	%	ГОСТ 11262	2,0
8. Ударная вязкость по Шарпи образца с надрезом при +23 °C	кДж/м²	ГОСТ 4647	5,0
9. Температура изгиба под нагрузкой 0,45 МПа	°C	ГОСТ 12021	93
10. Температура изгиба под нагрузкой 1,80 МПа	°C	ГОСТ 12021	88
11. Усадка, средняя	%	ГОСТ 18616	0,27
12. Усадка продольная/поперечная	%	ГОСТ 18616	0,28/0,26

Датум изд.	Статус	Дата	Подпись	Подпись
160/3-2026	РН	01.06.2026		Н.Г. Максимов

ООО «РусАвтоПласт»
Лаборатория ООО «РусАвтоПласт»
Россия, 445004, г. Тольятти ул. Базовая, 40 тел/факс:(8482) 698-200

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ		№
Наименование материала (марка, тип)		М-Шейп 3Д ПА6-СВ10
Партия	111/3-26	
Дата изготовления	27.05.2026 г.	
Масса партии	50 кг	
Производитель	ООО «РусАвтоПласт»	

Результаты испытаний:

Наименование показателя	Ед. изм.	Методы испытаний	Результаты испытаний
1. Показатель текучести расплава, 260°C/2,16кг	г/10 мин.	ГОСТ 11645	17
2. Массовая доля золы (800 °C)	%	ГОСТ 15973	10
3. Модуль упругости при изгибе	МПа	ГОСТ 9550	4410
4. Прочность при растяжении	МПа	ГОСТ 11262	99
5. Усадка, средняя	%	ГОСТ 18616	0,33
6. Водопоглощение в воде за 24 часа, при +23 °C	%	ГОСТ 4650-2014	1,45

Датум изд.	Статус	Дата	Подпись	Подпись
111/3-2026	РН	01.06.2026		Н.Г. Максимов

Протоколы независимых испытаний материалов М-Шейп.

должны стать результатом этого НИОКР, но не только. По результатам НИОКР М-Шейп передают заказчику не только сам материал, но и режимы печати, постобработки и постпроцессы. Далее материал проверяют уже в печати: из него изготавливают тестовые образцы и смотрят, как композиция ведёт себя в реальном процессе.



На производстве

Подготовка исходных компонентов перед смешиванием.



Смешивание компонентов бронзонаполненного материала.



Полученная бронзонаполненная композиция в гранулах.



Печать тестовых образцов из новой бронзонаполненной композиции.

Но хороший материал сам по себе ещё ничего не доказывает. Его нужно проверить.

При нас из нового материала изготавливались тестовые образцы для дальнейшей отработки технологии и испытаний. Здесь разработчику приходится учитывать уже не только свойства исходной композиции, но и её поведение в принтере: стабильность подачи, формирование слоя, меж-

слойное соединение, геометрию изделия и последующие технологические операции.

Рабочий продукт возникает только тогда, когда вместе работают рецептура, производство самого расходного материала и режимы печати.

Именно поэтому новый материал здесь появляется не «вообще», а под конкретную будущую деталь и задачу заказчика.

Именно поэтому новый материал здесь появляется не «вообще», а под конкретную будущую деталь и задачу заказчика.

Металл через FDM: печать — только первый этап

Работа с металлонаполненными композициями — одно из заметных направлений М-Шейп.

Компания уже работает, в частности, с нержавеющей сталью, включая **17-4PH**, а среди показанных нам образцов были также изделия из материалов на основе **AISI 316L**.



Смысл технологии MEX заключается в том, что металлический порошок находится в полимерном связующем. На первом этапе изделие фактически печатается так же, как привычная FDM-деталь. Получается так называемая green

part — «зелёная» заготовка.

Но это ещё не металлическая деталь.

Затем из заготовки удаляют связующее — спекают. При этом приходится учитывать усадку: геометрия исходной модели должна компенсировать изменение

размеров в процессе постобработки.

На сайте М-Шейп отдельно описаны работы с материалом 17-4PH и необходимость определения коэффициента усадки для корректировки исходной модели.

[Читать на сайте](#)

И вот здесь становится понятна роль тех самых печей, которые стоят на производстве. Они не вспомогательный атрибут лаборатории, а полноценная часть технологической цепочки.





На производстве

Муфельные печи на производстве М-Шейп.

Вакуумная печь — ещё одна часть цепочки постобработки.

А если вместо металла — керамика?

Похожий принцип используется и при работе с керамикой, хотя составы и режимы, разумеется, другие.

Среди материалов и образцов, которые нам показали в М-Шейп, был шликер «М-Шейп Керамика ВК94-1», который печатают на гранульном принтере М-Шейп.

В показанном кейсе температура печати составляла 260 °С, температура платформы — 100°С, камера оставалась открытой, скорость печати — 100 мм/с. После печати изделие спекают в печи Graphen «Урал 3Д».

Компания занимается как керамополимерными композициями, так и другими составами для получения керамических изделий с последующим удалением связующего и спеканием.

Один из таких экспериментов команда подробно показывала в своём

Telegram-канале. По данным М-Шейп, печать каждого из демонстрационных изделий занимала около 30 минут, удаление связующего — порядка восьми часов, а спекание в обычной муфельной печи — около 12 часов. В итоге менее чем за двое суток были получены несколько керамических изделий. Это данные компании по конкретному эксперименту, но они показывают всю технологическую цепочку, а не только самый

заметный её этап — 3D-печать.

Гузель (СЕО и сооснователь) также рассказала о работах с керамикой **Al₂O₃** и **ZrO₂**, в том числе об отработке режимов спекания совместно с АО «Кристалл».

Преимущество аддитивного подхода для малых серий и экспериментальных изделий: если конструкция меняется, не требуется каждый раз изготавливать новую формообразующую оснастку.



Керамические образцы и материалы, показанные во время экскурсии.

На производстве

Впрочем, больше всего во время экскурсии меня удивил даже не металл и не керамика.

А вот эта деталь.



Деталь из ПА6-СВ20

На первый взгляд — обычная FDM-печать. Но есть две детали.

Материал — стеклонаполненный полиамид **ПА6-СВ20**. Его рабочие температуры готовых изделий от -60 до $+195$ °C и стойкость к маслам и топливам.

Принтер — Ender 3.

Причём, как рассказали в М-Шейп, деталь была получена на открытом принтере с первой попытки. И печатал

её клиент. С первого раза — довольно удивительно. Возможно, всё дело в материале?

Для человека, который хотя бы раз пытался стабильно печатать полиамидом, последняя фраза звучит намного интереснее, чем название принтера.

Полиамиды достаточно требовательны к процессу. Они гигроскопичны, активно набирают влагу из возду-

ха, склонны к короблению и усадке, а при печати крупных или геометрически сложных деталей быстро проявляются проблемы со стабильностью размеров и адгезией. Поэтому для таких материалов обычно уделяют большое внимание сушке, температурному режиму и контролю условий вокруг зоны печати.

А здесь перед нами не маленький кубик для демонстрации материала: в детали несколько крупных отверстий, тонкие соединительные участки, множество малых отверстий и элементы, расположенные в разных направлениях. То есть геометрия вполне способна показать проблемы материала, если они есть.

Именно поэтому небольшой образец в некотором смысле рассказывает о работе М-Шейп не меньше, чем более эффектные металлические детали.

ПА6-СВ20 в работе: вместо металлической крышки

Нам показали и другой тест **ПА6-СВ20** — уже не демонстрационный, а эксплуатационный. Крышку заливной горловины масляного бачка, которую раньше делали из металла, напечатали из ПА6-СВ20. А в дальнейшем под нее сделали и вовсе отдельный материал с устойчивостью к УФ, негорючий (категория горения ПБ-0), масло и бензостойкий (3D-X FR).



Крышка, напечатанная из ПА6-SB20



Крышка ПА6-SB20 в эксплуатации на масляном баке

Деталь изготовили на **BambuLab H2D** при температуре **260 °C**; печать заняла **два часа. С мая 2026 года** крышка работает 24/7 под прямыми солнечными лучами и в парах масла.

Несколько месяцев эксплуатации — ещё не ресурсное испытание на годы, поэтому делать громкие выводы о долговечности рано. Но для материала это уже гораздо интереснее лабораторного кубика: деталь не лежит на полке, а постоянно работает в среде с масляными парами и под солнцем.

Но нужно понимать, что не любой металл нужно заменять полимером и не в любой детали это имеет смысл. Здесь же есть конкретная функция, понятные условия эксплуатации и возможность наблюдать, как материал ведёт себя со временем.

Матрица для углепластика: 8 часов на оснастку

Ещё один кейс оказался интересен тем, что конечная деталь вообще не печатается. 3D-печать здесь нужна для изготовления матрицы, на которой затем формуют углепластик.



Готовая 3D-печатная оснастка и сформованная углепластиковая заготовка

Оснастку напечатали из материала **«М-Шейп 3Д ПФА-SB30»** на **Gigantry F2 Innovations**. Температура печати — **270 °C**, время печати — **восемь часов**. Дальше матрицу использовали уже как обычную формообразующую осна-



Готовые изделия после формовки и нарезки

На производстве

тку: температура формовки углепластика составляла **90 °С.**

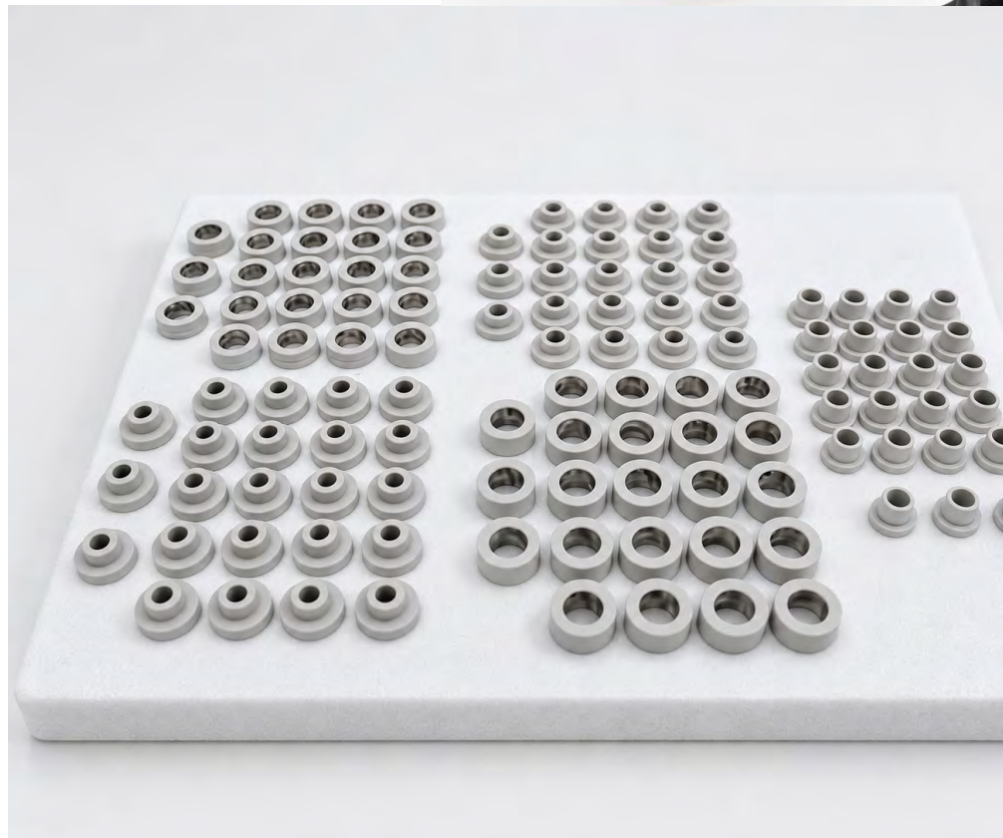
Мне этот пример понравился именно своей «невидимостью». Покупателю готовой углепластиковой детали неважно, как была сделана матрица. А для производства это отдельный технологический этап, и 3D-печать здесь работает не как способ получить финальное изделие, а как способ быстро изготовить инструмент для следующей операции.

Отдельно — 3D-X FR

Особое внимание во время экскурсии мы уделили ещё одной новинке — 3D-X FR. В М-Шейп его описывают как негорючий материал, устойчивый к ультрафиолету. На фоне привычных требований к FDM-пластикам это уже совсем другой набор задач: материалу мало хорошо печататься, от него ждут стабильности при эксплуатации вне лаборатории.

Не материал ради материала

За время экскурсии мы увидели довольно пёструю коллекцию: стеклонаполненные инженерные пластики, 3D-X FR, 17-4PH, AISI 316L, керамические материалы, бронзонаполненную композицию и готовые изделия из них.



Катушка материала 3D-X FR, показанная на производстве





На производстве

Но после посещения производства интереснее оказался не сам перечень марок.

Главное впечатление — здесь принтер вообще не главный герой.

Сегодня на одной и той же площадке смешивают компоненты для новых бронзонаполненных гранул, печатают из них образцы для испытаний, в другом проекте заменяют металлическую крышку полиамидной, а ещё в одном — делают из инженерного пластика матрицу, на которой затем формуют углепластик.

Задача начинается не с вопроса «какой филамент вам продать?», а с того, какой результат нужно получить.

Дальше рецептура материала, технология производства расходника, режим печати, постобработка и испытания. На сайте компании этот подход сформулирован примерно так же: анализ условий работы детали, подбор материала, испытания на образцах, настройка режимов печати и сопровождение внедрения в производство. Самое интересное здесь происходит и до 3D-принтера, и после него. До — когда подбирают полимерную основу, наполнитель, соотношение компонентов и способ получения гранул или филамента. После — когда напечатанный образец отправляется в

печь, на испытания, становится оснасткой или устанавливается на оборудование и начинает работать.

Бронзонаполненные гранулы, разработку которых нам удалось увидеть вживую, пожалуй, лучше всего собирают эту историю в одну точку. Пока это ещё не красивая серийная статуэтка на витрине. Пока перед нами компоненты, смешивание, гранулирование, работающий принтер и тестовые образцы.

Но именно этот момент и оказался самым интересным: мы попали не на презентацию готового результата, а практически в начало появления нового материала. 🌐

Календарь событий

19-21/10

ExpoCoating Moscow 2026

Ключевое событие в области гальваники, обработки поверхности и нанесения покрытий

Москва, МВЦ «Крокус Экспо»



ОКТАБРЬ

Пн	Вт	Ср	Чт	Пт	Сб	Вс
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

19-21/10

NDT Russia 2026

Ключевое в России и странах ближнего зарубежья событие в области неразрушающего контроля

Москва, МВЦ «Крокус Экспо»



Testing&Control 2026

Ведущая в России площадка, где ежегодно встречаются специалисты промышленности, инженеры и производители со всей страны



Москва, МВЦ «Крокус Экспо»

НОЯБРЬ

Пн	Вт	Ср	Чт	Пт	Сб	Вс
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30						

10-13/11

Металл-Экспо'2026

Международная промышленная выставка



Санкт-Петербург,
КВЦ «Экспофорум»



Печать аддитивных деталей на площадке Metal Sprint



Подготовка бронзонаполненной композиции. М-Шейп



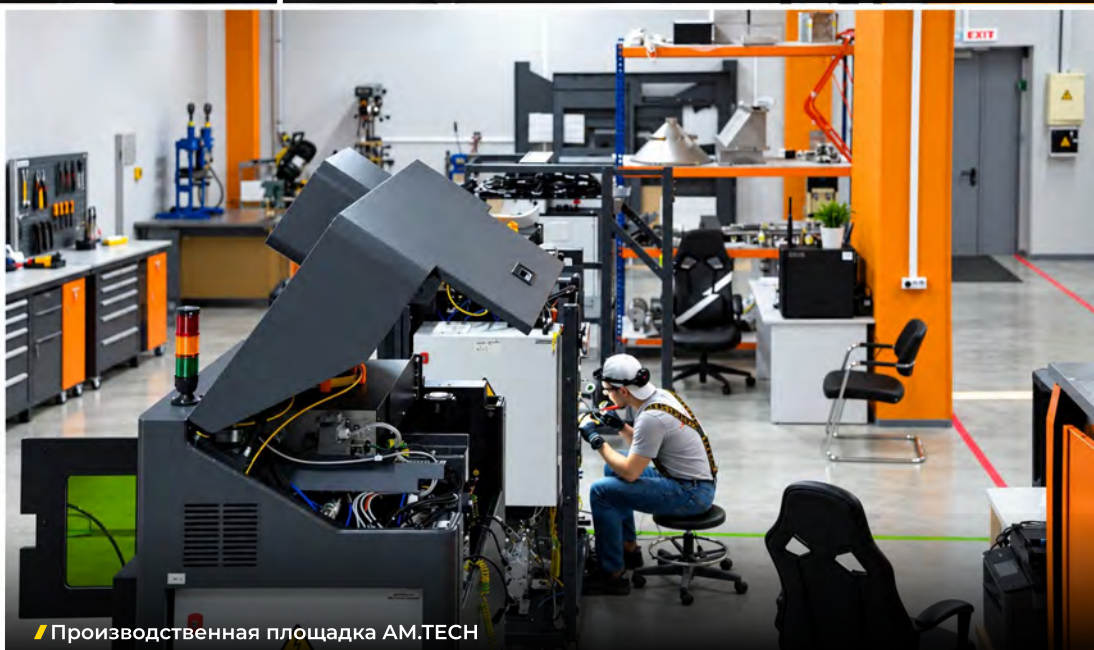
Один из этапов сборки SLM-принтера AM.TECH - монтаж внутренних технологических узлов и систем контроля оборудования



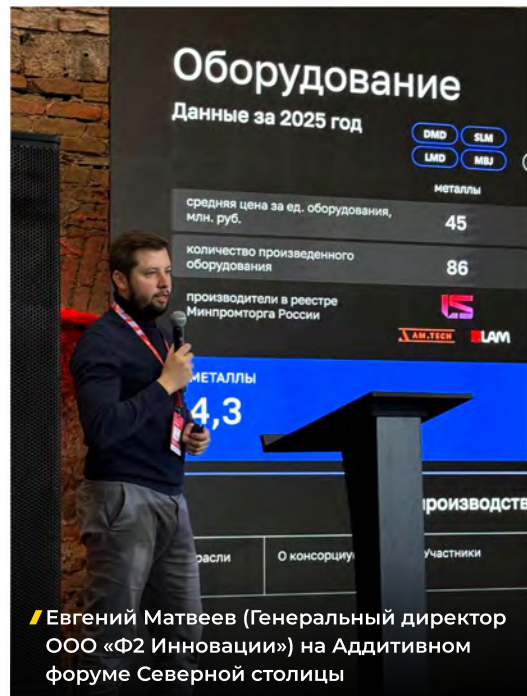
Производственная площадка AM.TECH



Образцы деталей М-Шейп



Производственная площадка AM.TECH



Евгений Матвеев (Генеральный директор ООО «Ф2 Инновации») на Аддитивном форуме Северной столицы



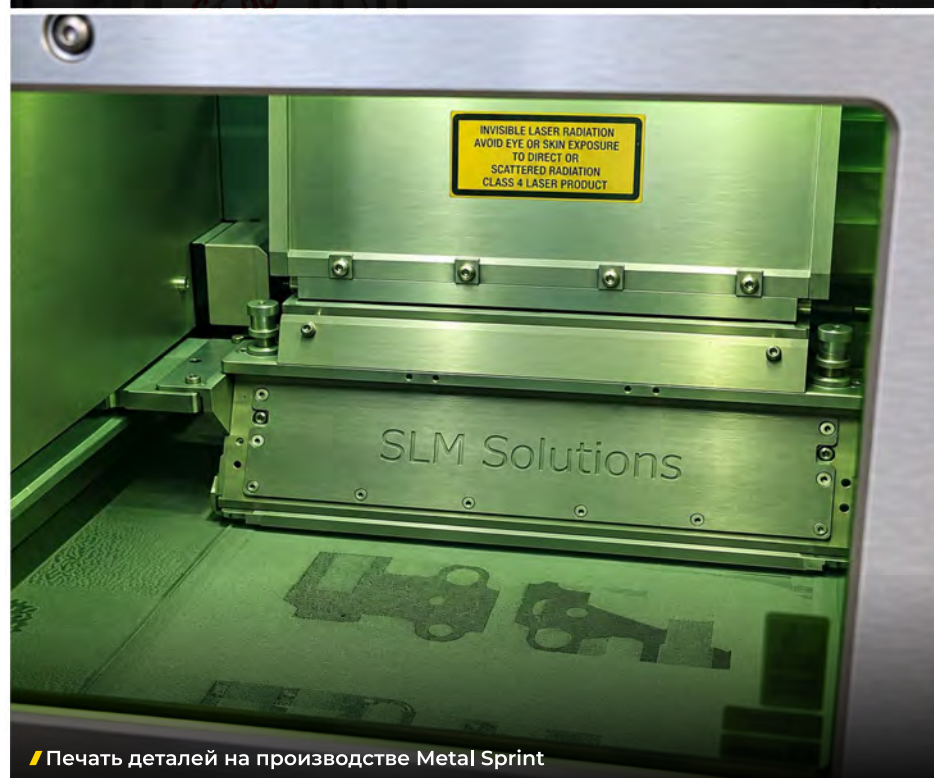
Участок контроля качества и технологической настройки SLM. AM.TECH



Обновленная производственная площадка Metal Sprint



Деталь из ПА6-СВ20. М-Шейп



Печать деталей на производстве Metal Sprint



Готовый образец из новой бронзонаполненной композиции. М-Шейп

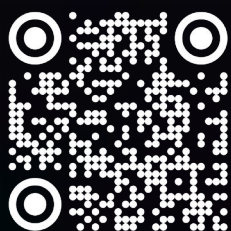
АПГРЕЙД

Если хотите чтобы
ваша статья была
опубликована в этом
журнале

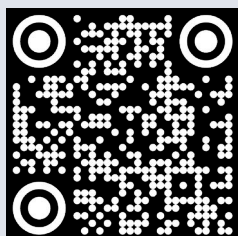
— обращайтесь к нам

Пишите нам на
info@industry3d.ru

Читайте нас на industry3d.ru.



ИНДУСТРИЯ



industry3d.ru



Освещаем главные новости и тренды в сфере промышленных аддитивных технологий, 3D-сканирования, метрологии, автоматизации и цифровизации современных производств.