

ФАБРИКА
БРАТЬЕВ
ПРОСВИРНИНЫХ

Первая и крупнейшая
в России ферма 3D-печати

Подробнее на с. 6



Инновационные
материалы
для 3D-печати
металлами

34



Аддитивные
технологии
для решения
промышленных
задач

38



Постобработка
в аддитивных
технологиях

48

VPGLASERONE

Качество Инновации Будущее

ИТТЕРБИЕВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР YLR-500-U-R-SM

Ультрасовременный одномодовый лазер
Идеально для 3D SLM печати!



Выходная мощность
до 2 кВт

Подробнее о серии YLS

YLR-500-U-R-SM — это самый компактный в отрасли непрерывный одномодовый волоконный лазер мощностью 500 Вт, объединяющий в себе последние достижения и тридцатилетний опыт компании VPG LaserONE в мире лазерных технологий. Малый диаметр световой жилы 10 или 14 мкм обеспечивает высочайшее качество пучка $M^2 < 1.1$ и возможность сфокусировать мощное лазерное излучение в наиболее узкий из возможных пучков.

Система внутренней самодиагностики, традиционно высочайшая надежность компонентов, кратковременная и долговременная стабильность по мощности, низкая вероятность отказа и большой гарантийный срок обеспечивают максимальную воспроизводимость, уверенность и контроль над ответственным производством. Благодаря этим свойствам одномодовые волоконные лазеры активно используются для 3D-печати металлом по технологии SLM (Selective Laser Melting — селективное лазерное плавление).



Внесен в реестр Минпромторга
(реестровый № 10679529).

Подробнее обо всех новинках Вы можете узнать
у наших консультантов по e-mail и телефону:

+7 (495) 477-71-77
sales@vpglaserone.ru

www.vpglaserone.ru



Реклама



ПРИМЕНЕНИЕ

- 3D SLM печать
- Прецизионная резка
- Сварка высокоотражающих металлов
- Сверление сквозных отверстий
- Лазерная перфорация

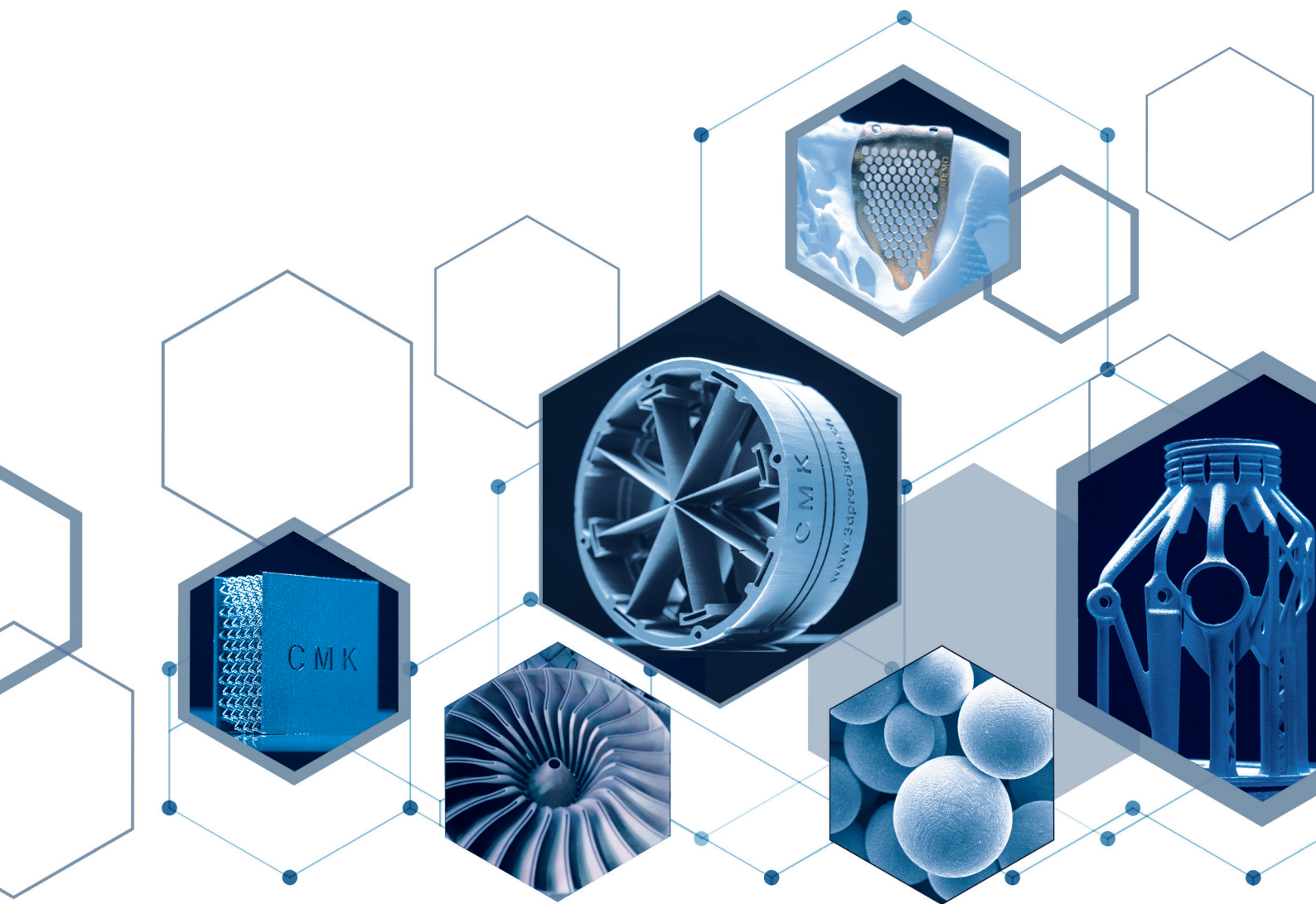


ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Выходная мощность до 2 кВт
- Качество пучка $M^2 < 1.1$
- Система защиты от обратного отражения
- Стандартный оптический QBN коннектор
- Самый компактный и легкий корпус из существующих
- КПД «от розетки» более 40%
- Долговременная нестабильность <1% за 8 часов

СОЗДАВАЯ НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ,
КОНСТРУИРУЕМ БУДУЩЕЕ

Производство металлопорошковых композиций
из никелевых, титановых,
кобальтовых сплавов и сталей



Издатель ООО «ПРОМЕДИА»

директор О. Фалина

главный редактор Т. Карпова

дизайнер-верстальщик С. Куликова

Экспертный совет :

Н.М. Максимов, к.т.н.
основатель и ген. директор
компании Nickatech, LLC

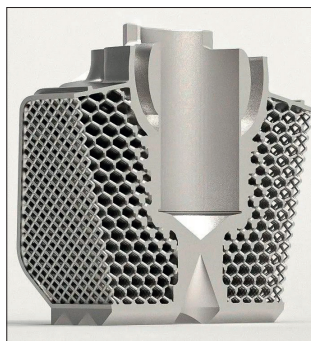
П.А. Петров, к.т.н.,
«Московский политех»

отдел рекламы:
т/ф (499) 55-9999-8

Адрес: 121205, г. Москва,
территория инновационного
центра «Сколково», ул. Нобеля, д. 7
т/ф (499) 55-9999-8
(многоканальный),
e-mail: info@additiv-tech.ru
www.additiv-tech.ru

Журнал зарегистрирован
Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных
технологий и массовых
коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации
СМИ ПИ № ФС 77-67106
от 15.09.2016.
ISSN 3033-7410

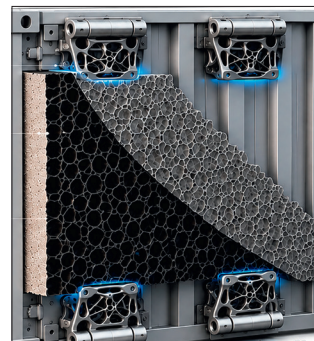
Тираж 5000 экз.
Распространяется
на выставках и по подписке.
Перепечатка опубликованных
материалов разрешается только
при согласовании с редакцией.
Все права защищены ® .
Редакция не несет
ответственности за достоверность
информации в рекламных
материалах и оставляет
за собой право на редакторскую
правку текстов. Мнение редакции
может не совпадать с мнением
авторов.



16



51



58

Содержание

- 6** Фабрика братьев Просвирниных:
как 3D-печать превращается в промышленность
- 10** От прототипа к малой серии: как современные настольные
3D-принтеры меняют промышленное производство
- 12** Как моделирование снижает риски при металлической
3D-печати
- 16** Аддитивные технологии 2016–2025 гг.:
технологические категории, ключевые параметры
и прикладные применения
- 28** Особенности развития рынка аддитивных технологий в России
- 31** Перспективы расширения рынка
аддитивных технологий в России
- 34** Инновационные материалы для 3D-печати металлами
- 38** Аддитивные технологии для решения промышленных задач
- 46** Требование времени — практическая реализация
инженерной инициативы
- 48** Постобработка в аддитивных технологиях:
от заготовки-полуфабриката до рабочего изделия
- 51** Аддитивные технологии в строительстве:
Россия в числе лидеров
- 54** Разработка и оптимизация адаптивной подошвы
спортивной обуви методом селективного лазерного спекания
- 58** Разработка складного контейнера на основе
монококовых панелей и интегрированных аддитивных узлов
с применением платформы GOAPS™

Центр промышленной роботизации для подмосковных компаний

Правительство Подмосковья и производитель отечественных лазеров «ВПП Лазеруан» (входит в кластер «СФ Тех» ГК Softline) заключили соглашение о развитии автоматизации и роботизации. Документ на ПМЭФ подписали губернатор Московской области Андрей Воробьев и генеральный директор предприятия Сергей Размахаяев.

Партнерство позволит расширить уникальный Центр промышленной робототехники во Фрязино, который стал ключевой площадкой для продвижения роботизированных и лазерных технологий, а также базой для специализированных образовательных программ.

«Наш инвестор "ВПП Лазеруан" — сегодня единственный в России серийный производитель волоконных лазеров мирового уровня. Его технологии во многом опережают время, а в линейке более 600 видов сложнейших приборов — от промышленных до медицинских. Компания запустила центр промышленной робототехники, чтобы дать доступ к свое-



Фото: Пресс-служба губернатора Московской области

му уникальному оборудованию небольшим подмосковным компаниям, у которых нет возможности приобрести его самостоятельно. Мы, безусловно, будем поддерживать этот проект, предоставляя компаниям возможность бесплатно или на льготных условиях использовать мощности центра. Это поможет небольшим производствам Подмосковья модернизировать свои цеха, стать более конкурентоспособными», — заявил Андрей Воробьев.

Отходы будут переработаны

В аддитивных технологиях расплавленный металлический порошок после просеивания возвращается в рабочий цикл, что позволяет использовать исходный материал многократно. Однако после 3D-печати также остаются неотребоваанные отходы, включая поддерживающие конструкции (в определенных случаях на них может приходиться до 50% объема заготовки) и бракованные детали, — все вышеперечисленное не возвращается в производственный цикл из-за сложностей в переработке. Чтобы замкнуть производственный цикл, учёные НИТУ МИСИС использовали метод ультразвуковой атомизации. Его суть заключается в том, что металлические отходы плавятся под воздействием электрической дуги, а жидкий металл стекает на поверхность, которая вибрирует с частотой до 50 тысяч раз в секунду. Из капель расплава, которые мгновенно застывают в защитной атмосфере аргона, получаются мельчайшие частицы сферического порошка, причем с коэффициентом сферичности 0,9 (1 — идеальная форма).



Фото: НИТУ МИСИС

Сейчас технология отрабатывается на распространенных сплавах, чтобы продемонстрировать эффективность предложенной концепции, но новый подход будет особенно актуален в случае аддитивного производства изделий из драгоценных металлов, например, платины.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-79-10304).

Новые стандарты

С 1 июля 2026 года вступили в силу новые национальные стандарты Российской Федерации в области аддитивного производства:

ГОСТ Р 72499-2025. Аддитивные технологии. Композиции металлопорошковые из нержавеющей стали. Общие технические условия.

ГОСТ Р 72500-2025. Аддитивные технологии. Проволока из титана и сплавов титана. Общие технические условия.

ГОСТ Р 72501-2025. Аддитивные технологии. Изделия

из стали марки 12X18H10T, изготовленные методом электронно-лучевой наплавки проволокой. Общие технические условия.

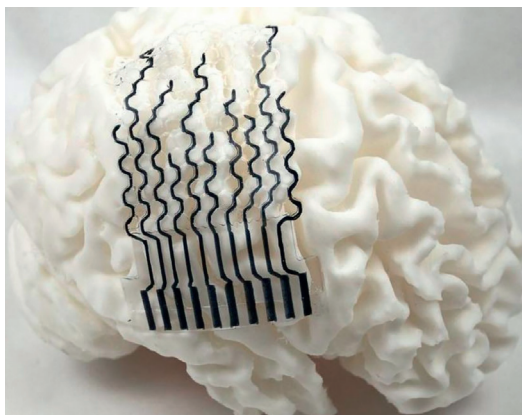
ГОСТ Р 72642-2026. Аддитивные технологии. Изделия из жаростойких сплавов на основе никеля, изготовленные методом селективного лазерного сплавления. Общие технические условия.

Подробную информацию по каждому национальному стандарту можно получить на сайте Росстандарта.

Точно по форме

Универсальные биоэлектроды, которые нейрохирурги размещают на поверхности мозга для регистрации его активности, часто не учитывают уникальную анатомию пациента. Группа исследователей из Университета штата Пенсильвания под руководством профессора Тао Чжоу предложила альтернативное решение, описанное в журнале *Advanced Materials*, — биоэлектроды из гидрогеля, напечатанные на 3D-принтере.

Отправной точкой в создании биоэлектрода служит МРТ-сканирование. На его основе проводится анализ методом конечных элементов — «процесс, создающий детальную симуляцию нейронной структуры человека» — и реконструируется 3D-модель. Затем программное обеспечение проектирует электрод, форма которого повторяет специфические выступы и бороздки



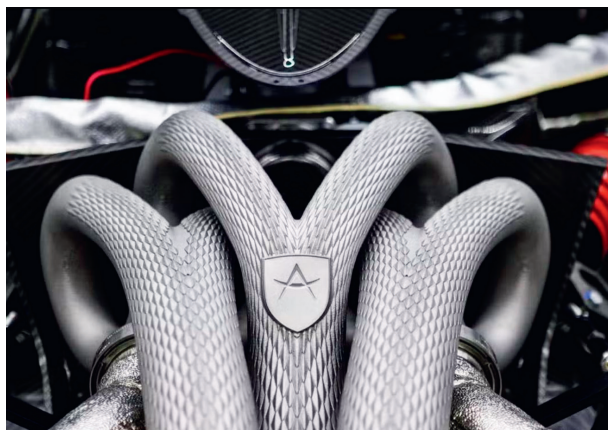
мозга. Наконец, эта конструкция печатается методом прямой печати чернилами.

Материал — гидрогель с высоким содержанием воды — ведет себя как мягкая ткань. Чтобы гарантировать, что он не потеряет прочность при размягчении, Чжоу и его команда выбрали архитектуру, вдохновленную сотами. Устройство весит меньше, использует меньше материала и изготавливается быстро.

Испытания показали впечатляющие результаты: напечатанные датчики прилегают к мозгу гораздо плотнее стандартных пластин. Тесты на крысах в течение 28 дней подтвердили их полную биосовместимость.

Команда рассматривает эту работу как основу для будущих клинических применений.

Создана, чтобы вызывать восхищение



В суперкаре Evo от Apollo Automobil будет установлена самая большая, по утверждению компании, цельная выхлопная система, изготовленная методом селективного лазерного плавления. Время печати этой сложной структуры — 123 часа.

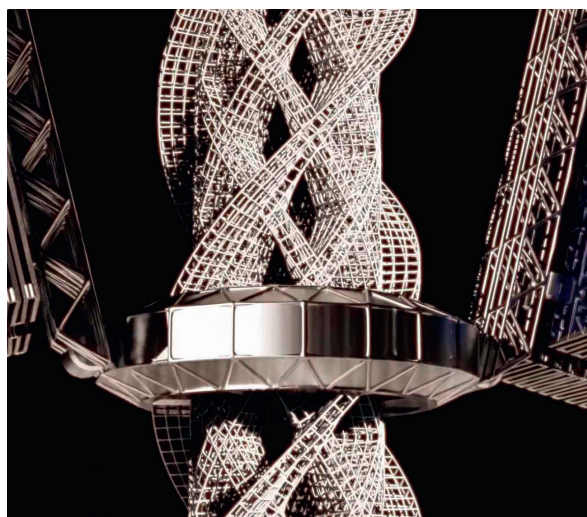
Система, получившая название Dragon Skin, покрыта чешуйчатой текстурой, что перекликается с драконьей тематикой названий автомобилей Apollo. Она изготовлена из титанового сплава аэрокосмического класса и покрыта керамическим покрытием, рассчитанным на температуру до 1000 °С. Компания Apollo заявляет, что рисунок в виде чешуи не является чисто декоративным — он разработан для улучшения распределения тепла по всей системе. Это тот случай, когда за эстетикой скрывается техническая логика.

Лунный проект

По сообщению VoxelMatters, компания Branch Technology (Чаттануга, США) работает над проектом NASA, в рамках которого изучает возможности по 3D-печати на Луне 50-метровой башни для повышения эффективности сбора солнечной энергии и связи.

Branch Technology применяет собственную роботизированную экструзионную систему C-Fab, которая позволяет создавать крупногабаритные решетчатые каркасы с открытыми ячейками. Главные преимущества такого подхода — значительное снижение расхода материала относительно объема конструкции и возможность воплощать сложные геометрические формы произвольной конфигурации.

На первом этапе проекта компания подтвердила реализуемость концепции, на втором этапе сосредоточилась на развитии материаловедения и технических аспектов проекта.



Школа №1 стала первой

В рамках Международного технологического форума на площадке Авиационного колледжа РГАТУ имени П. А. Соловьева прошел хакатон по аддитивным технологиям и реверс-инжинирингу. Участниками стали учащиеся 9-х классов из школ № 1, № 4, № 12, № 26, № 32 и гимназии № 8. Соревнования состоялись при поддержке передовой инженерной школы «Технологии двигателестроения».

Перед командами стояла задача создать точную копию заданной детали: сначала выполнить 3D-сканирование на оборудовании дуальной лаборатории «Дендрит», затем провести 3D-моделирование в системе «Компас-3D» и, наконец, распечатать деталь на современных 3D-принтерах. Точность изготовления оценивали директор Авиационного колледжа РГАТУ имени П. А. Соловьева Кирилл Попков и доцент кафедры материаловедения, литья и сварки Виталий Федулов.

— Хакатон тесно связан с новой специальностью «Аддитивные технологии», которую мы открыли в колледже в прошлом году. Мы продолжаем набор на эту специальность, и в этом году нам выделено 25 бюджетных мест. Участники попробовали себя в роли технических специалистов, и мы очень надеемся, что всех этих ребят увидим в числе наших студентов, — рассказал Кирилл Попков.



Фото: РГАТУ

По итогам хакатона победу с отрывом всего в один балл одержала команда школы № 1. От передовой инженерной школы ребята получили лазерные дальнометры, а школа — 3D-принтер. Второе место заняла команда школы № 26, награжденная инженерными калькуляторами. Третьими стали участники из школы № 32, которым вручили электронные штангенциркули.

Хакатон стал важным профориентационным событием, позволившим школьникам погрузиться в мир высоких технологий и сделать осознанный шаг к инженерной профессии.

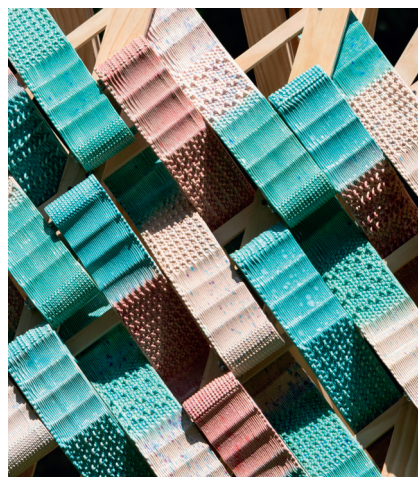


Фото: Yanko Design

Возрождение интереса к мастерству

CeraShingle — это фасадная система из керамической черепицы (400×130 мм), напечатанной на 3D-принтере. Роботизированные манипуляторы наносят глину слой за слоем, создавая сложную текстуру, перфорацию и цветовые градиенты. Плитка меняет оттенок под воздействием солнечного света, а при укладке с нахлестом образует «дышащую» оболочку здания. Этот материал выглядит абсолютно современно благодаря своим цифровым корням, но сохраняет первобытное тепло обожженной земли.

По мнению дизайнеров Ютао Чен и Ивэнь Гу, их проект отвергает спор о противостоянии цифрового и ручного труда, предлагая новую главу развития ремесла в ответ на запрос архитектуры к тактильным материалам и снижению выбросов углекислого газа.

Запуск системы запланирован на 2026 год.

Подписывайтесь на журнал
"Аддитивные технологии"



Отсканируйте
этот QR-код
и подпишитесь
на телеграм-канал
журнала



Отсканируйте
этот QR-код
и подпишитесь
на МАХ-канал
журнала



Отсканируйте этот
QR-код, чтобы
оформить почтовую
подписку на журнал
«Аддитивные технологии»



Тел.: 8 (4912) 51-19-41
8 (800) 444-29-41
+7 (930) 783-19-41
E-mail: 3d@3d-shop.ru

www.fdm-shop.ru
www.moldcast.ru

- Изготовление пластиковых, резиновых и металлических деталей на заказ.
- Официальный поставщик 3D-принтеров, 3D-сканеров и расходных материалов.
- 3D-печать прототипов и макетов различными технологиями.
- 3D-моделирование по образцам, чертежам и фотографиям.
- Высокоточное и художественное 3D-сканирование, обратное проектирование, реверс-инжиниринг.
- Промышленное литье деталей различными партиями.

г. Рязань, ул. Каширина, стр. 1Б, 1 подъезд, 5 этаж

Фабрика братьев Просвирниных: как 3D-печать превращается в промышленность

Сегодня 3D-печать в России переживает момент, когда она перестаёт быть «про прототипы» и становится полноценным производством. Один из ярких примеров этого перехода — Фабрика братьев Просвирниных, которую сами основатели называют не просто парком оборудования, а промышленной системой. О первой и крупнейшей фабрике 3D-печати и о становлении отрасли аддитивных технологий мы побеседовали с сооснователем Фабрики братьев Просвирниных — Виталием Просвирниным.



— Расскажите об истории компании. С чего все началось?

Компания появилась в 2015 году. Тогда 3D-печать в России только начинала развиваться: оборудование было дорогим, материалов не много, реальных задач почти не было. А квалифицированные кадры отсутствовали вовсе. Мы заходили в эту тему не как предприниматели, а как инженеры. Вопросы ставили жестко, по-баумански: где это можно применять как инструмент, дающий реальный эффект для производств, — в сроках, качестве и себестоимости изделий.

Предстояло разобраться, в каких процессах 3D-печать реально лучше традиционных методов, научиться получать одинаковый результат из раза в раз. Важным было создать поточное производство, способное выдавать большой объём самой разной продукции без брака.

— Вас три брата. Как устроена работа внутри компании?

Да, это семейный бизнес. Но без иерархий и пересечения ролей. Мы с самого начала разделили зоны ответственности. Один отвечает за производство и операционку, второй — за развитие и стратегию, третий — за инженерную часть, науку и технологии. За счёт этого нет ситуаций, когда «все за всё отвечают», что часто равно «у семи нянек дитя без присмотра». А за счёт разностороннего подхода к ситуациям решения принимаются быстро.

— Рынок тогда только формировался. Как вы нашли свою нишу?

Мы её не искали. Мы шли от задач. Сначала мы занялись в большей степени образовательными проектами — обучали детей и молодёжь аддитивным технологиям.

Параллельно занимались изготовлением прототипов, мелких партий несложных изделий. Потом пошли запросы на изготовление кастомных изделий. А позже поступали более сложные задачи — создание деталей, которые либо невозможно, либо невыгодно делать традиционными способами.

Со временем стало понятно, что стабильное производство серий с высокой повторяемостью — самый частый и актуальный запрос отраслевиков. На этом и сфокусировались.

— С какими сложностями столкнулись на старте и при росте?

Вначале сложности, можно сказать, были стандартные, как в любом производстве на стадии становления: брак, нестабильное качество, проблемы с допусками, перегруженные принтеры, отсутствие нормального планирования.

В процессе мы часто сталкиваемся с ошибкой восприятия. Многие думают, что 3D-печать — это «нажал кнопку и получил деталь». На практике же это длинная технологическая цепочка, где на каждом этапе можно получить проблему.

Когда мы стали масштабироваться, к вышесказанным сложностям добавились зависимость от поставщиков расходников и материалов, необходимость в разработке специфической архитектуры производства, усиление систем безопасности и контроля качества. Систему пришлось строить с нуля, «подсмотреть» было не у кого.

— Расскажите о производстве. Что у вас сейчас по оборудованию?

Сейчас на фабрике работает более 3000 3D-принтеров. Основной объём — это FDM-печать, потому что она



лучше всего подходит для серий. Есть SLS для инженерных задач и SLA — для деталей, где важна точность и поверхность.

Но принтеры — это только часть. Есть конструкторское бюро, участок подготовки моделей, участки финишной обработки деталей: шлифовка, покраска, сборка — и отдельная служба контроля качества. Фактически мы закрываем весь цикл.

— Каким должен быть идеальный 3D-принтер?

В производстве важна не скорость и не «вау-характеристики». Нужен принтер, который стабильно работает, даёт одинаковый результат и не требует постоянного вмешательства. Если он сегодня печатает хорошо, а завтра нет — он не подходит для производства.

— Какие материалы используете?

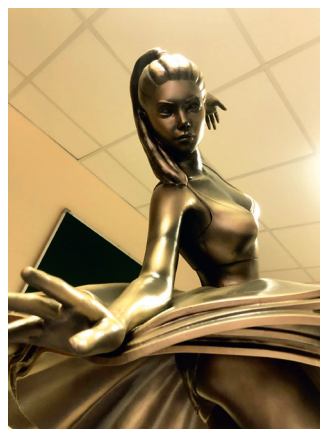
Материалы используются те, которые эффективно могут закрыть потребность клиента. В серийных заказах используем только проверенные материалы. Эксперименты с материалами мы проводим постоянно — тестируем новые, выходящие на рынок, исследуем существующие на предмет расширения сферы применения. Без преувеличения могу сказать, что сегодня наша команда — одна из самых экспертных в этой сфере. В какой-то момент было принято решение открыть собственное производство филамента, потому что стабильность материала напрямую влияет на результат.

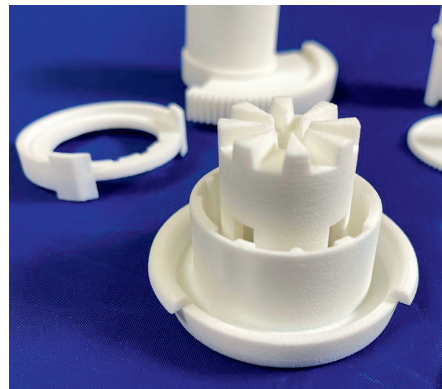
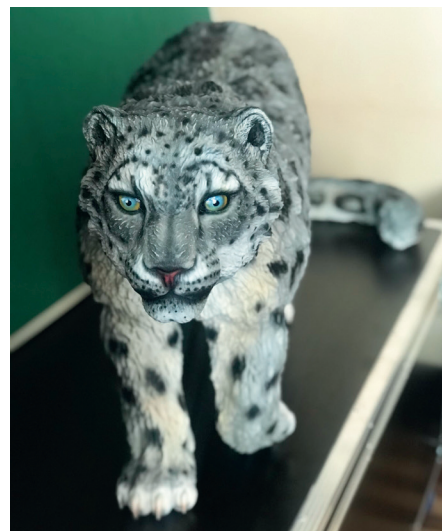
— Как вы обеспечиваете качество?

К качеству у нас сложный, но эффективный системный подход, включающий в себя мониторинг, инспекцию и контроль на каждом этапе от входного сырья до упаковки и транспортировки заказчику готовых изделий. Для критичных деталей, кроме прочего, используем 3D-сканирование. На мой взгляд, без этого серийное производство невозможно.

— Кто ваши основные заказчики?

Среди наших заказчиков — промышленные компании, дизайнеры, архитекторы, технологические и медицинские





учреждения. И не только. Работаем по одной логике: сначала разбираем задачу, потом предлагаем решение, подбираем технологию, производим и проверяем результат. От задач стараемся не отказываться. Даже если сразу непонятно, как делать — разбираемся и делаем.

— Какие проекты удалось реализовать?

За всё время сделали более 24 000 проектов. Это и серийные изделия, и светильники, и крупные инсталляции, и инженерные детали. Стараемся сделать так, чтобы каждый заказчик получил абсолютно возможное качество в минимальные сроки и на более выгодных условиях.

— Сколько человек работает в компании?

Сегодня в компании трудится более 100 человек. Это операторы, инженеры, технологи, специалисты по управлению и контролю качества, мастера финишной обработки. Кадры в основном адаптируем и обучаем сами.

— Семейный формат как-то влияет на бизнес?

Безусловно. Клиентоориентированность — один из показателей семейного подхода. За качество работы компании мы отвечаем своим именем и репутацией семьи. А это большая ответственность. Наши процессы мы выстраиваем на основе семейных ценностей — открытости, честности, взаимоуважении, заинтересованности в собственном труде и стремлении к развитию.

— Вы занимаетесь разработками?

Да. Работаем с материалами, оптимизируем процессы, автоматизируем производство. Без этого в нашей сфере долго не продержишься — всё быстро меняется.

— Почему клиенты выбирают вас?

Мы подходим к процессу как к решению задачи клиента. Нам важно всё: от скорости и качества нашей работы до настроения, с которым наш заказчик примет результат. А еще мы любим и умеем решать сложные задачи и выполнять практически любые запрашиваемые объёмы.

— Как вы видите дальнейшее развитие?

Отрасль аддитивных технологий развивается и будет развиваться дальше.

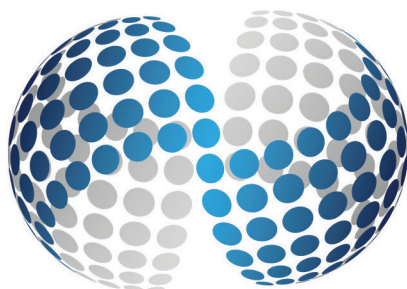
Основные направления — увеличение объёмов, снижение себестоимости, работа с материалами и интеграция 3D-печати в обычные производственные процессы.

С уверенностью можно сказать, что 3D-печать — это инструмент промышленности настоящего и предвестник инноваций будущего. ■

 **МЕРИТОГРУПП**

www.meritogroup.ru, www.i3dpro.ru,
ruplastik@meritogroup.ru, +7 (495) 085-06-98

Специализированный проект и конференция
по аддитивным технологиям
в промышленности



Additive Minded

26–29 ЯНВ
2027

МОСКВА, РОССИЯ
additiveminded.ru

в рамках выставки:



Международная специализированная
выставка пластмасс и каучуков

RUPLASTICA

Организатор:

**ЭКСПО
ФЬЮЖН**

От прототипа к малой серии: как современные настольные 3D-принтеры меняют промышленное производство

Ещё несколько лет назад настольные 3D-принтеры использовались в основном для прототипирования и инженерных разработок, тогда как производственные задачи решались на промышленном оборудовании или передавались подрядчикам. Сегодня этот подход меняется. Новое поколение принтеров Bambu Lab — H2D, H2C и H2S — позволяет предприятиям выполнять значительную часть производственных задач непосредственно на своей площадке, сокращая сроки изготовления деталей и снижая зависимость от внешних поставщиков.

Почему предприятия меняют подход

Традиционная схема «разработка — заказ — ожидание поставки» уже не всегда отвечает требованиям современного производства. Даже небольшая пластиковая деталь может стать причиной простоя оборудования, а изготовление оснастки или запасной части нередко занимает несколько недель.

Собственный 3D-принтер сокращает этот цикл до нескольких часов. Вместо ожидания поставки инженер корректирует цифровую модель, запускает печать и получает готовое изделие в течение смены или к началу следующего дня.

Работа с инженерными и армированными материалами — PA-CF, PET-CF, PPS-CF, PPA-GF, активная камера с подогревом, двухэкструдерная система и стабильная повторяемость сделали современные настольные системы полноценным производственным инструментом, а не только оборудованием для конструкторских бюро.

Где настольный 3D-принтер приносит реальную пользу

IT-инфраструктура и серверные. Панели для стоек, кабельные органайзеры, крепления PDU, вентиляционные заглушки, монтажные адаптеры под нестандартное оборудование. Особенно актуально при модернизации серверных и работе с техникой разных производителей.

Запасные части для производственных линий. Направляющие, ролики, втулки, толкатели, захваты манипуляторов, крепления датчиков. Предприятие переходит к цифровому складу ЗИП: вместо стеллажей с редкими комплектующими — библиотека CAD-моделей и катушка филамента, а деталь печатается по мере необходимости.

Оснастка и производственные приспособления. Кондукторы, сборочные шаблоны, позиционеры, держатели инструмента, контрольные калибры. Двухопловая печать позволяет за один цикл получить жёсткое основание и мягкие контактные поверхности из TPU — без фрезеровки и последующей доработки.

Малые серии продукции. Корпуса приборов, панели управления, элементы автоматизации, защитные кожухи.

Партия 50–200 штук выпускается без изготовления пресс-формы, что особенно выгодно при пилотных проектах и производстве под конкретного заказчика.

Литейное производство. Мастер-модели, технологическая оснастка и вспомогательные элементы для литья по выплавляемым моделям сокращают сроки подготовки производства.

Экономика и окупаемость

Основной эффект достигается не за счёт цены оборудования, а благодаря сокращению сроков и снижению зависимости от подрядчиков. Показательный пример: функциональный кронштейн из PA-CF массой около 180 г обходится примерно в 320 Р по материалу и 5 часов машинного времени. Аналогичная деталь, изготовленная фрезеровкой у подрядчика, стоит ≈ 4 500 Р и требует 7–10 рабочих дней. При регулярной потребности в подобных деталях принтер окупается за 3–6 месяцев, а далее формирует прямую экономию.

Не менее важно то, что предприятие получает возможность оперативно вносить изменения в конструкцию, отказаться от хранения редко используемых комплектующих и перейти к производству «по требованию».

Три модели под разные задачи

H2S — базовое решение для оснастки, ЗИП и функциональных деталей из инженерных пластиков.

H2D — двухэкструдерная печать для сложной геометрии, комбинации жёстких и эластичных материалов.

H2C — флагман для армированных композитов, ответственных деталей и высокоточных мастер-моделей.

Для большинства предприятий Bambu Lab H2S, H2C и H2D становятся не заменой промышленному оборудованию, а его эффективным дополнением. Массовый выпуск остаётся задачей специализированных технологий, тогда как оснастка, запчасти, приспособления и малые серии рациональнее производить на собственной площадке — рядом с конструктором, а не за тысячу километров от него.

Поставка и поддержка на территории России

Компания iGO3D — официальный дистрибьютор Bambu Lab в России. Мы поставляем исключительно EU-версии принтеров, адаптированные под европейские стандарты качества и безопасности, с гарантией 1 год на всё оборудование. Обслуживание и ввод в эксплуатацию выполняют сертифицированные сервисные инженеры, а постоянное наличие филамента на складе — включая инженерные и армированные материалы — обеспечивает бесперебойную работу производственных задач без простоев в ожидании расходных материалов. ■

ЧАСЫ ВМЕСТО НЕДЕЛЬ

Промышленная 3D-печать —
прямо на вашем производстве

Bambu Lab серии H2 — промышленная 3D-печать инженерными
и армированными материалами для реальных производственных задач.

-  Машиностроение
и приборостроение
-  Электроника
и IT-инфраструктура
-  Оснастка и ЗИП
для производственных линий
-  Упаковочные и сборочные
производства
-  Литейное производство —
мастер-модели и оснастка



СКИДКА 5000 РУБЛЕЙ

НА ПРИНТЕРЫ СЕРИИ H2 ПО ПРОМОКОДУ «AT-2026»

Действует до 31.12.2026. Не суммируется с другими акциями.

iGO3D — официальный дистрибьютор Bambu Lab в России

✓ EU-версии

✓ Сертифицированные инженеры

✓ Гарантия 1 год

✓ Филамент на складе

☎ +7 (495) 232-03-22

✉ info@igo3d.ru



Как моделирование снижает риски при металлической 3D-печати



*Павел Кучин,
руководитель отдела технической поддержки ГК «ПЛМ Урал»*

Металлическая 3D-печать дает промышленности возможность изготавливать детали сложной формы, облегченные конструкции, изделия с внутренними каналами, тонкими стенками и геометрией, трудной для традиционной обработки. Этим объясняется интерес к аддитивным технологиям со стороны машиностроения, авиации, энергетики, двигателестроения, медицины и ремонтного производства.

В этой статье речь идет о лазерном сплавлении металлического порошка в порошковом слое — SLM / LPBF / DMLS. Именно этот класс процессов поддерживается в SIMMAX-ADDITIVE. Другие группы аддитивных техно-

логий, включая WAAM, DED, Binder Jetting и EBM, здесь не рассматриваются.

При этом аддитивное производство металлов остается технологически сложным процессом. Деталь формируется послойно. Материал локально нагревается, плавится, охлаждается, усаживается и взаимодействует с уже построенной частью изделия, платформой и поддержками. Внутри заготовки возникают температурные градиенты, деформации и остаточные напряжения. Они напрямую влияют на точность, стабильность геометрии и последующую обработку.



Рис. 1. В фокусе статьи: моделирование SLM / LPBF / DMLS — лазерного сплавления металлического порошка в порошковом слое

Для предприятия риск проявляется в конкретных потерях: занятое машинное время, израсходованный металлический порошок, расход защитного газа, затраты на постобработку, контроль, термообработку и повторное изготовление. Если изделие вырабатывается несколько суток, ошибка на этапе подготовки становится дорогой.

Расчетное моделирование помогает выявить такие риски до запуска печати. Инженер получает возможность проверить технологический сценарий в цифровой среде: оценить деформации, зоны остаточных напряжений, влияние поддержек, ориентации детали и условий закрепления. Такой подход сокращает число пробных построений и повышает предсказуемость результата.

Почему аддитивный процесс трудно прогнозировать без расчета

В металлической 3D-печати источник тепла воздействует на материал локально. Каждый новый слой изменяет температурное состояние уже построенной части. После охлаждения материал стремится уменьшиться в объеме, но свободному перемещению мешают соседние участки, поддержки и платформа. Так формируется напряженно-деформированное состояние изделия.

Картина меняется на разных стадиях производства. Во время построения деталь зафиксирована на платформе. После охлаждения напряжения перераспределяются. После отделения от плиты геометрия может измениться еще раз. Удаление поддержек, термообработка и механическая обработка также влияют на конечное состояние.

Поэтому оценка только готовой геометрии не дает полной картины. Важно проследить развитие процесса

по этапам: построение, охлаждение, снятие с платформы, удаление поддержек, последующие операции. Именно в этой последовательности часто находится причина будущего дефекта.

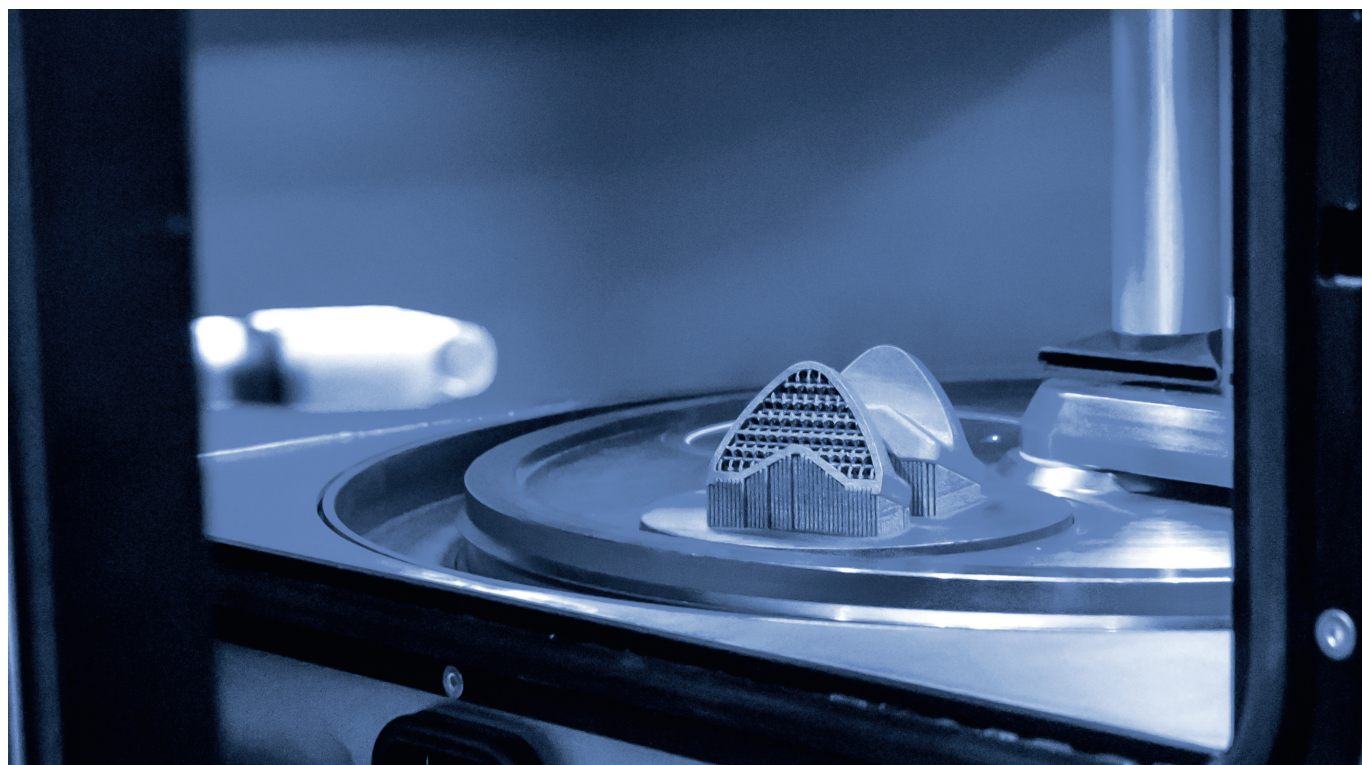
Например, деталь может оставаться в допуске, пока она закреплена на плите. После отделения накопленные напряжения высвобождаются, и изделие коробится. В другой ситуации деформация начинает расти еще во время построения, перегружает поддержки и ухудшает стабильность процесса. Без расчета такие эффекты обнаруживаются слишком поздно — при контроле готовой детали.

Основные технологические риски

Наиболее заметная группа рисков связана с геометрическими отклонениями. К ним относятся коробление, изгиб, локальная усадка, нарушение плоскостности, смещение критических поверхностей, деформация тонких стенок и длинномерных элементов. Для ответственных деталей даже небольшое отклонение приводит к дополнительной обработке или браку.

Вторая группа рисков связана с остаточными напряжениями. Они могут не проявляться визуально сразу после печати, но влияют на стабильность размеров, риск трещинообразования, ресурс изделия и поведение детали при последующей механообработке. Особенно опасны зоны концентрации напряжений около резких переходов, массивных участков, тонких перемычек и областей крепления к платформе.

Третья группа относится к технологической подготовке. Ориентация детали, схема поддержек, параметры



Послойное лазерное сплавление металлического порошка в установке SLM/LPBF. Локальный нагрев и последующее охлаждение формируют температурные градиенты, деформации и остаточные напряжения

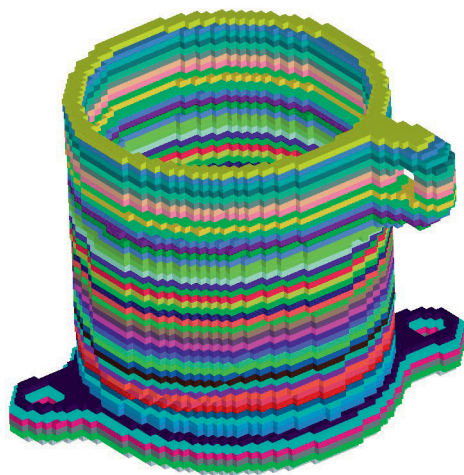


Рис. 3. Послойная расчетная модель детали в SIMMAX-ADDITIVE

слоя, стратегия построения, последовательность сканирования участков слоя и условия охлаждения могут усиливать или снижать деформации. Ошибка в одном параметре иногда приводит к цепочке последствий: росту напряжений, увеличению отклонений, усложнению удаления поддержек и росту трудоемкости доводки.

Отдельное значение имеют операции после печати. Снятие с платформы, удаление поддержек, термообработка, контроль и механическая обработка меняют состояние изделия. Расчетная модель позволяет заранее понять, какие изменения возникнут на этих этапах и какие зоны потребуют особого внимания.

Что показывает моделирование

Моделирование аддитивного выращивания воспроизводит процесс формирования изделия в расчетной среде. В модели учитываются геометрия детали, материал, платформа, поддержки, параметры построения и граничные условия. Результатом становится прогноз поведения детали на разных стадиях изготовления.

Инженер может получить данные по деформациям, механической усадке, остаточным напряжениям, перемещениям после снятия с платформы, влиянию поддержек и ориентации детали. Эти данные помогают сравнивать варианты технологической подготовки до запуска оборудования.

Практическая ценность расчета особенно заметна при выборе ориентации. Поворот детали на платформе меняет зоны теплового воздействия, направление накопления деформаций, объем поддержек и трудоемкость постобработки. Для тонкостенных, протяженных и несимметричных изделий эта разница может определять годность всей партии.

Моделирование также помогает проверить схему поддержек. Недостаточная фиксация повышает риск коробления и отрыва. Избыточные поддержки увеличивают расход материала, усложняют удаление и могут создавать дополнительные зоны напряжений. Расчет показывает, какие участки требуют усиления, а какие

элементы можно оптимизировать без потери устойчивости процесса.

Еще одна важная задача — прогноз изменения формы после отделения от платформы. На этом этапе изделие освобождается от жесткого закрепления, и накопленные напряжения перераспределяются. Для деталей с высокими требованиями к точности такой прогноз позволяет заранее заложить компенсацию геометрии или изменить технологию построения.

Что влияет на точность расчета

Результат моделирования зависит от качества исходных данных. Для металлической 3D-печати важны температурно-зависимые свойства материала, параметры источника тепла, стратегия сканирования, толщина слоя, условия теплоотвода, закрепление детали, свойства платформы и поддержек.

Поэтому расчетную модель следует рассматривать как инженерный инструмент принятия решений, а не как замену технологической отработки. На практике наибольшую ценность дает связка: расчет, пробное построение, контроль геометрии, уточнение модели и повторный расчет. Такой цикл позволяет предприятию постепенно формировать собственную базу знаний по материалам, режимам и типовым деталям.

SIMMAX-ADDITIVE для подготовки металлической 3D-печати порошковым лазером

Для решения таких задач ГК «ПЛМ Урал» развивает SIMMAX-ADDITIVE — отечественный программный продукт для моделирования процесса лазерного сплавления/спекания металлического порошка в порошковым слое — SLM / LPBF / DMLS. Система предназначена для инженеров-технологов, специалистов по аддитивному производству и расчетчиков, участвующих в подготовке печати. В статье рассматривается именно этот класс задач: послойное построение металлической детали из порошка с локальным лазерным нагревом.

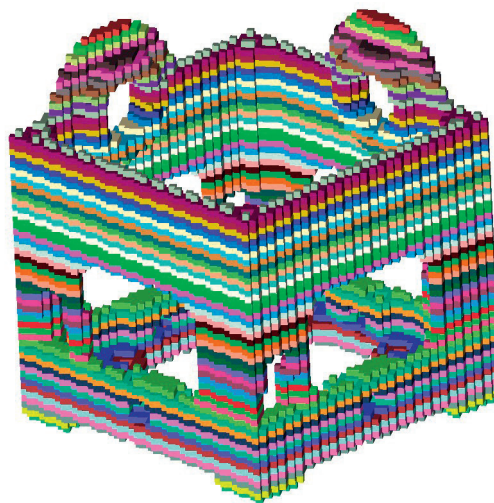


Рис. 4. Виртуальное выращивание сложной геометрии для оценки деформаций и остаточных напряжений

В первую очередь SIMMAX-ADDITIVE ориентирован на задачи технологического макромоделирования: оценку деформаций, усадки, остаточных напряжений, влияния ориентации, поддержек и параметров выращивания. Такой уровень моделирования особенно полезен при подготовке изделий, где критичны конечная геометрия, стабильность после снятия с платформы и снижение числа пробных построений.

SIMMAX-ADDITIVE позволяет выполнить виртуальное выращивание детали и оценить ее поведение до запуска оборудования. Пользователь может импортировать геометрию, учитывать поддержки, задавать материал, параметры процесса, расчетную сетку и условия закрепления. После расчета доступны поля деформаций, усадки и остаточных напряжений, а также данные по изменению состояния изделия в ходе построения.

Продукт полезен на этапе выбора технологического сценария. С его помощью можно сравнить варианты ориентации, проверить схему поддержек, оценить риск коробления, определить зоны повышенных напряжений и спрогнозировать поведение детали после снятия с платформы. Для предприятия это означает сокращение количества пробных построений и более обоснованную подготовку производства.

SIMMAX-ADDITIVE также помогает выстраивать внутреннюю инженерную практику. Расчеты дают технологу количественную информацию, которую можно использовать при разработке методик, выборе режимов, согласовании требований с конструкторским отделом и планировании контроля.

От опытного образца к стабильной технологии

Внедрение металлической 3D-печати обычно проходит несколько стадий. Сначала предприятие получает опытные образцы, затем подбирает режимы, после этого стремится выйти на повторяемое производство. Самая сложная часть начинается на этапе перехода к стабиль-

ной технологии, где требуется предсказуемое качество, понятная себестоимость и управляемые сроки.

Моделирование ускоряет этот переход. Оно помогает заранее отсеять неудачные варианты, сократить объем экспериментов, определить чувствительные зоны изделия и снизить зависимость от проб и ошибок. При этом расчет не отменяет практические испытания. Он делает их более точными и сокращает число итераций.

Для ответственных металлических деталей такой подход особенно важен. Здесь недостаточно получить красивую форму после печати. Нужно обеспечить размерную стабильность, контролируемое напряженно-деформированное состояние, пригодность к последующей обработке и соответствие требованиям эксплуатации.

Заключение

Металлическая 3D-печать связана с высокой концентрацией тепловых и механических эффектов. Деформации, усадка, остаточные напряжения, влияние поддержек, ориентации и закрепления определяют качество будущего изделия еще до завершения построения.

Моделирование позволяет увидеть эти эффекты заранее. Инженер получает инструмент для проверки технологических решений до запуска оборудования, сравнения вариантов и снижения риска брака. Для предприятия это выражается в экономии машинного времени, материала и трудозатрат на доводку.

SIMMAX-ADDITIVE решает эту задачу в рамках цифровой подготовки производства. Система помогает прогнозировать поведение металлической детали при послойном построении из порошка, выявлять проблемные зоны и принимать технологические решения на основе расчета. Такой подход делает аддитивное производство более управляемым и приближает его к требованиям промышленной серийности. ■



Моделирование SLM / LPBF / DMLS до запуска печати

Прогноз деформаций, усадки и остаточных напряжений при послойном построении металлических деталей из порошка.



Снизьте риск брака до запуска оборудования




8 800 500-19-93

www.plm-ural.ru

info@plm-ural.ru



Подробнее о SIMMAX-ADDITIVE

Аддитивные технологии 2016–2025 гг.: технологические категории, ключевые параметры и прикладные применения



Период 2016–2025 гг. характеризуется переходом аддитивных технологий (АТ) от прототипирования к серийному и промышленному производству. В статье систематизированы основные технологические категории 3D-принтеров, выделены ключевые параметры выбора оборудования, приведены примеры референсных систем и типовых изделий. Отдельное внимание уделено трендам 2024–2025 гг.

Николай Максимов, Nickatech LLC, Founder, CEO

Введение

Период с конца 1980-х годов, когда были созданы первые АТ-технологии FDM (Stratasys) и SLA (3D Systems), подробно описаны во многих источниках, например [1–3].

Аддитивное производство (АМ) за последние десять лет прошло несколько этапов развития:

1. 2016–2018 — зрелость прототипирования, начало промышленной сертификации металла [4].
2. 2018–2021 — масштабирование LPBF, развитие SLS/MJF как серийной альтернативы литью.
3. 2021–2023 — рост multi-laser, автоматизация пост-процессов, гибридные АМ+CNC.
4. 2023–2025 — индустриализация, контроль качества in situ, устойчивость, снижение TCO (затрат).

Современные АТ формируют цифровой производственный контур: конструирование для АМ (DfAM) → подготовка данных → печать → постпроцесс → контроль качества → сертификация.

На рис. 1 показано сравнение относительного индекса внедрения различных типов АМ и их относительного роста по годам 2016–2025. Из графиков видно, что строительная печать показывает наиболее быстрый и крутой рост, в то время как полимерные и металлические АМ остаются наиболее разработанными и широко внедренными в производство сегментами АМ. Следующая волна получения добавочной стоимости придет от масштабирования быстрорастущих сегментов (строительный, керамический, биопечать).

Методология исследования

Материал подготовлен на основе: анализа обзорных статей 2016–2025 гг.; технических спецификаций производителей; прикладных кейсов; материалов главных выставок АМ: Formnext (Германия) 2024–2025 [5] и RAPID+TCT (США) 2024–2025 [6]; отраслевых отчетов.

Категоризация выполнена по прикладному принципу: материал + технология + область применения.

Сквозные параметры для матрицы:

- **Точность/повторяемость:** (X, Y, Z; деформации; усадка/компенсации).
- **Производительность:** объем/ч, мм/с, площадь/смена; общая эффективность оборудования (OEE).
- **Материалы:** номенклатура, требования к сырью, повторное использование порошка/пластика.
- **Постпроцесс:** обязательный/опциональный (HIP, дебайдинг-синтеринг, выжигание, механика, пропитка).
- **ТСО:** CAPEX + расходники + энергозатраты + труд + простой/сервис + брак.
- **QA/QC:** мониторинг процесса, NDT/CT, протоколы испытаний.

Интересные результаты дает библиометрический анализ публикаций по тематике АМ (тренды, возможности и вызовы) за последние ~10 лет [7].

Ключевые выводы: эволюция аддитивного производства (2016–2025)

1. От прототипирования к промышленному производству

За последнее десятилетие АМ перешло от быстрого прототипирования к технологии изготовления конечных изделий. Наиболее активное внедрение наблюдается в аэрокосмической отрасли, автомобилестроении, здравоохранении. Основной драйвер — возможность создавать сложные геометрии и кастомизированные изделия, недоступные традиционным методам производства.

Вывод: АМ больше не является нишевым инструментом — оно становится ключевым методом производства в высокотехнологичных отраслях.

2. Глубокая интеграция с технологиями Industry 4.0

Библиометрический анализ показывает резкий рост исследований (рис. 2), объединяющих АМ с:

АМ: зрелость и рост (2016 - 2025)

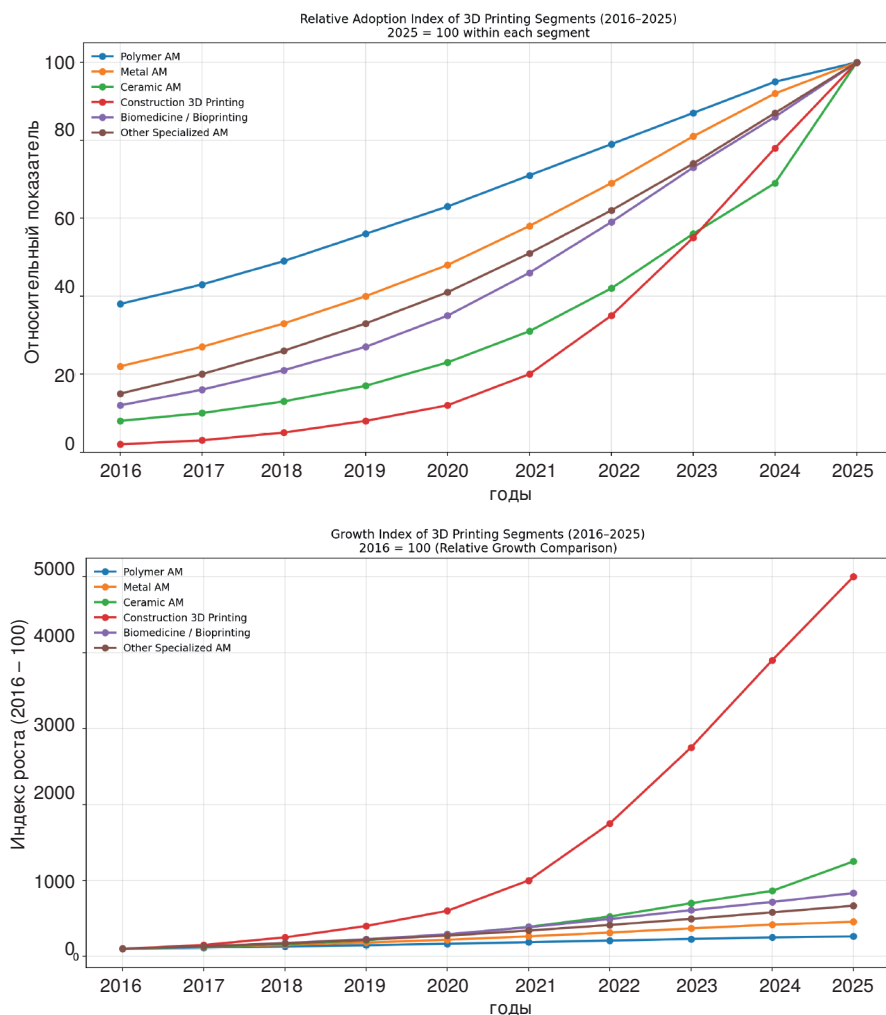


Рис. 1. АМ: относительный индекс внедрения и относительный рост разных сегментов по годам 2016–2025

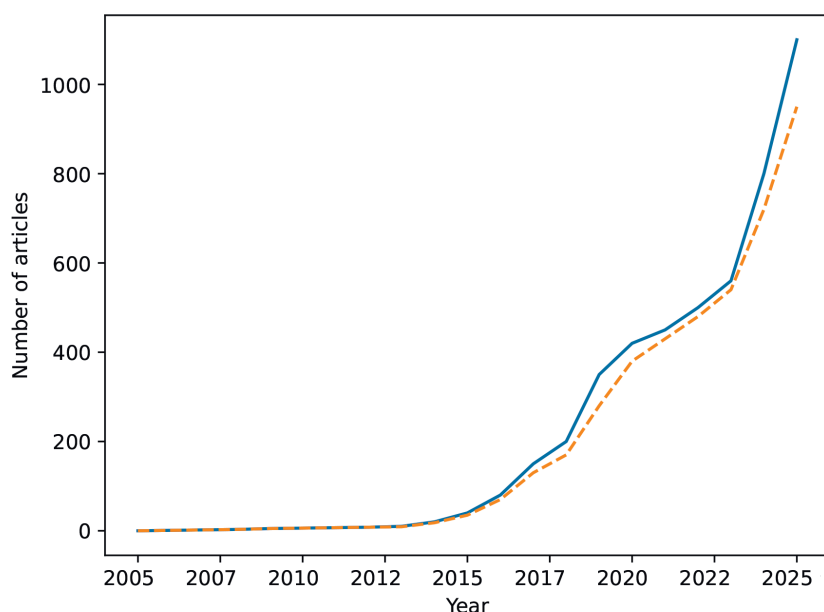


Рис. 2. Рост числа публикаций по годам по теме Industry 4.0/5.0 в АМ (получены из Scopus and WOS)

IoT/киберфизическими системами, искусственным интеллектом и анализом данных, цифровыми двойниками, системами мониторинга в реальном времени. Ключевые возможности: предиктивное обслуживание, замкнутые производственные циклы, оптимизация процессов на основе данных.

Вывод: АМ эволюционировало в цифровой интегрированный производственный узел, а не отдельную машину.

3. Рост массовой кастомизации и распределенного производства

АМ позволяет: организовать локализованное производство «по требованию»; достичь сокращения складских запасов, логистической сложности. Поддерживает массовую кастомизацию в промышленных масштабах.

Вывод: АМ является ключевым драйвером децентрализованных моделей производства (особенно важно для строительной 3D-печати).

4. Переход к Industry 5.0 (человекоцентричность + устойчивость)

Современные исследования (после 2020 года) смещают фокус на: взаимодействие человек — машина, коллаборативную робототехнику, устойчивое производство, циркулярную экономику. Industry 5.0 добавляет: человекоориентированный дизайн, устойчивость и социальную значимость, экологическую оптимизацию.

Вывод: АМ движется от эффективности к ценности (человек + устойчивость).

5. Устойчивое развитие становится ключевым драйвером

АМ способствует: эффективному использованию материалов (меньше отходов); оптимизации энергопотребления; созданию облегченных конструкций (особенно в авиации); локализации производства → снижению транспортных расходов.

Вывод: устойчивость становится одним из главных аргументов внедрения АМ, а не просто дополнительным преимуществом.

6. Быстрый рост исследований и глобальное сотрудничество

Библиометрические данные показывают: экспоненциальный рост публикаций после ~2015 года; веду-

шую роль Китая, США, Европы; рост междисциплинарных исследований (инженерия + IT + материаловедение)

Вывод: AM стало глобальной и высоко кооперационной областью исследований и разработок.

7. Ключевые технологические ограничения (еще не решены)

Несмотря на рост, остаются серьезные проблемы:

- Технические: стабильность процесса и повторяемость; ограничения по материалам (особенно в строительстве); качество поверхности и постобработка.
- Цифровые: отсутствие стандартов, несовместимость систем.
- Экономические: высокий CAPEX; неочевидный ROI в ряде отраслей.
- Кадровые: нехватка квалифицированных специалистов.

Вывод: AM все еще находится в стадии перехода от инновации к стандартному промышленному инструменту.

8. Перспективные направления (5–10 лет)

Наиболее важные будущие направления: автономные системы печати на базе ИИ; контроль качества в реальном времени (in situ); гибридное производство (AM + CNC); крупномасштабное AM (строительство, инфраструктура); биопечать и новые материалы.

Вывод: следующий этап — автоматизация + масштабирование + прорыв в материалах.

Стратегический вывод

За последние 10 лет аддитивное производство эволюционировало от изолированного инструмента прототипирования к интегрированному элементу цифровых производственных экосистем (Industry 4.0) и далее к человекоориентированным и устойчивым производственным системам (Industry 5.0).

Металлические аддитивные технологии

Металлические технологии, прежде всего LPBF и DED, достигли высокой степени зрелости. Основные ограничения связаны с остаточными напряжениями, необходимостью постобработки и высокой стоимостью порошков.

Основные процессы: LPBF (Laser Powder Bed Fusion); DED (Directed Energy Deposition); Binder Jetting (порошок металл/керамика/песок + жидкое связующее).

Ключевые параметры: плотность и микроструктура; межслойная адгезия; остаточные напряжения; повторяемость; постпроцесс (термообработка, HIP, мехобработка); стоимость порошка; производительность (лазеры, объем камеры).

Примеры изделий: топологически оптимизированные кронштейны (рис. 3); теплообменники с внутренними каналами (рис. 4); корпуса e-drive; ремонт турбинных лопаток (DED).

Конструктивные особенности: сложная внутренняя сеть каналов (изогнутые, разветвленные, переменного сечения, невозможно изготовить традиционными методами); тонкие стенки и микроканалы (повышают площадь теплообмена); решетчатые структуры (lattice) внутри (турбулизация потока, улучшение теплоотдачи);



Рис. 3. Топологически оптимизированный кронштейн (Ti-6Al-4V), классический пример AM-only-геометрии (решетчатые ребра, облегчение) [2]. Источник: EOS GmbH

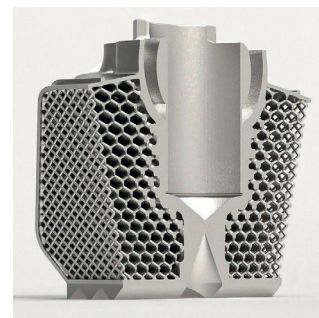


Рис. 4. Теплообменник, изготовленный методом порошковой лазерной плавки (LPBF/SLM), в котором вся геометрия внутренних каналов создается сразу при печати — без сверления, пайки или сборки.

топологическая оптимизация (материал распределяется только там, где он нужен).

Как это работает: один поток (например, горячий газ) проходит через внутренние каналы сложной формы; второй поток (жидкость/воздух) движется по соседним каналам; благодаря геометрии: увеличивается площадь контакта, создается турбулентность, резко растет коэффициент теплоотдачи.

Почему это возможно только с AM? Традиционные технологии (фрезеровка, сверление, пайка) не позволяют делать закрытые извилистые каналы; ограничены прямолинейной геометрией; требуют сборки из множества частей. 3D-печать создает монолитную деталь, без соединений → выше надежность, позволяет реализовать бионические/органические формы. Преимущества (по сравнению с классическими теплообменниками): +30–200% к эффективности (в зависимости от дизайна); –30–70% массы; компактность (в разы меньше объем); меньше соединений → выше герметичность.

Где применяется: авиация, космос (двигатели, охлаждение электроники); автомобилестроение/электромобили (батареи, силовая электроника); нефтегазовая промышленность (компактные теплообменники); оборона; дата-центры (охлаждающие системы).

Конкретные реальные примеры: GE Aviation — топологически оптимизированные теплообменники для авиационных систем; NASA — компактные 3D-печатные теплообменники для космических аппаратов; Siemens Energy — AM-теплообменники для турбинных систем. Этот наглядные примеры показывают, что ценность AM — не скорость, а геометрия. Именно такие изделия: невозможно сделать традиционно, они дают максимальный экономический эффект.

Дополнительные операции — постпроцесс (металл):

- LPBF: снятие поддержек + термообработка/снятие напряжений + (часто) мехобработка/шлифовка/ГИП.
- DED: мехобработка почти всегда, термообработка по материалу.
- Binder Jetting: дебайдинг + спекание (критично для точности/усадки).

Таблица 1. Матрица выбора технологии и оборудования (порошки металлов и сплавов)

Ключевой параметр	Технология	Типовые требования	Примеры моделей, «лучшие по параметру»
Точность/детализация, тонкие стенки	LPBF / PBF-LB	Слой ~20–60 мкм (иногда 10–100 мкм), высокая детализация; сильная зависимость от поддержек/тепловых деформаций	EOS M 290 (рабочая зона 250×250×325 мм, мощность 400W, сканирование до 7 м/с, EOS GmbH)
Производительность в серии	LPBF multilaser	Рост производительности за счет 2–4+ лазеров; важны скорость сканирования, стратегия раскладки	Multi-laser LPBF-линейки, SLM NXG XII 600; Trumpf TruPrint 5000
Крупногабарит/ремонт/наплавка	DED (порошок/проволока)	Слой/валики крупнее; точность ниже, при этом высокая скорость наплавки и ремонтпригодность	DED-класс (DMG MORI/Optomec и др.; выбор сильно зависит от задач и материалов)
Низкая стоимость детали при больших партиях + без поддержек	Binder Jetting (металл)	Высокая производительность на «зеленой» стадии; обязательны дебайдинг + спекание (усадка)	Desktop Metal Shop System



Рис. 5. Принтер EOS M 400-4 (LPBF). Источник: EOS GmbH

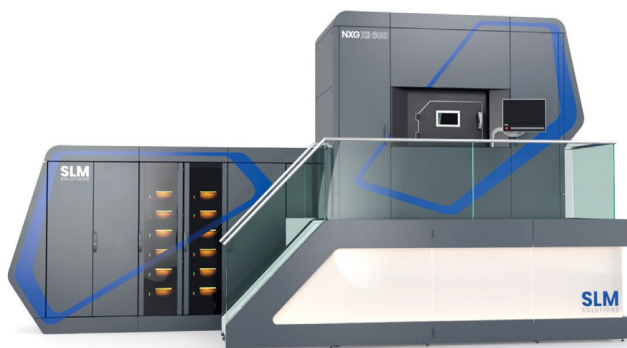


Рис. 6. Принтер SLM Solutions NXG XII 600



Рис. 7. HP Jet Fusion 5600 (MJF). Источник: HP Inc.

Оценка полной стоимости владения (TCO):

CapEx: LPBF высокий, DED высокий/очень высокий, BJ высокий.

Орех: порошки/газ/фильтры/сервис; у BJ добавляется печь/синтеринг.

Примеры промышленных систем LPBF представлены на рис. 5, 6.

Полимерные технологии

Основные процессы: SLS/MJF, FDM/FDM, SLA/DLP, DLS [8–10]. Полимерные технологии стали основой серийного производства. Особенно выделяются технологии MJF благодаря высокой производительности и стабильности свойств.

Постпроцессы:

SLS: охлаждение, очистка от порошка, иногда пропитка/окраска.

FDM: снятие поддержек, иногда термообработка/шлифовка.

SLA/DLP [10]: промывка + УФ отверждение

FDM: самый предсказуемый/дешевый вход, но качество/скорость зависит от материала и камеры. Требуется точность кинематики, контроль усадки/деформаций, контроль температуры сопла/камеры, поддержка инженерных термопластов (PEEK/PEI и т.п.).

Таблица 2. Матрица выбора технологии и оборудования (полимерные технологии)

Ключевой параметр	Технология	Типовые требования	Примеры моделей
Серийные функциональные детали (PA12/PA11/TPU), без поддержек	SLS	Слой 100–120 мкм, качество порошка/рециклинг, стабильность температуры камеры, повторяемость	EOS P 396 (treatstock.com)
Компактный SLS	SLS (desktop/compact)	Слой 110 мкм, производительность ниже промышленных	Formlabs Fuse 1: рабочая зона 165×165×300 мм, (Formlabs)
Надежные прототипы/оснастка, широкий выбор термопластов	FFF/FDM	Слой 0.127–0.33 мм; точность обычно ±0.2 мм или ±0.002 мм/мм (класс промышленных FDM)	Stratasys F370 (Stratasys), HP Jet Fusion 5600; EOS P 500; Stratasys F900
Максимальная поверхность/детализация на смолах	SLA/DLP	Высокое качество поверхности; стабильность смол/пост-УФ-отверждение	Carbon M3, широкий выбор смол для изделий [10] (рис. 8, 9)



Рис. 8. Принтер Carbon M3

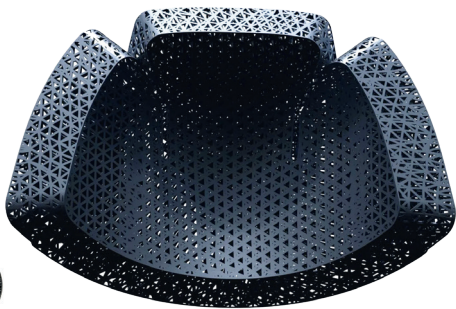


Рис. 9. Части шлема, напечатанные на Carbon M3 (DLC, материал — EPU-эластомер)

Керамические технологии

Технологии фотополимеризации (LCM/DLP), binder jetting [11–13] обеспечивают высокую точность при производстве медицинских и технических компонентов. Основная проблема — усадка при синтеринге и контроль дефектов.

Ключевые параметры:

Размер/распределение частиц, реология, твердая фаза (влияет на усадку/дефекты/плотность).

Разрешение и точность (пиксель/оптика у DLP, толщина слоя, стратегия экспонирования).

Постпроцесс: дебайндинг/спекание (усадка, деформация, повторяемость печь-профиля).

Максимальная плотность/прочность после спекания + контролируемая пористость (если нужна).

Номенклатура материалов (Al_2O_3 , ZrO_2 , Si_3N_4 и т.д.) и доступность сертифицированных шликеров/порошков.

Пример принтера и образцов печати представлен на рис. 10, 11.

Постпроцессы: почти всегда дебайндинг/выжигание связующего + спекание (усадка и деформация — главный источник разброса).

ТСО: определяется материалами (шликер/порошок) и цепочкой выжигания.

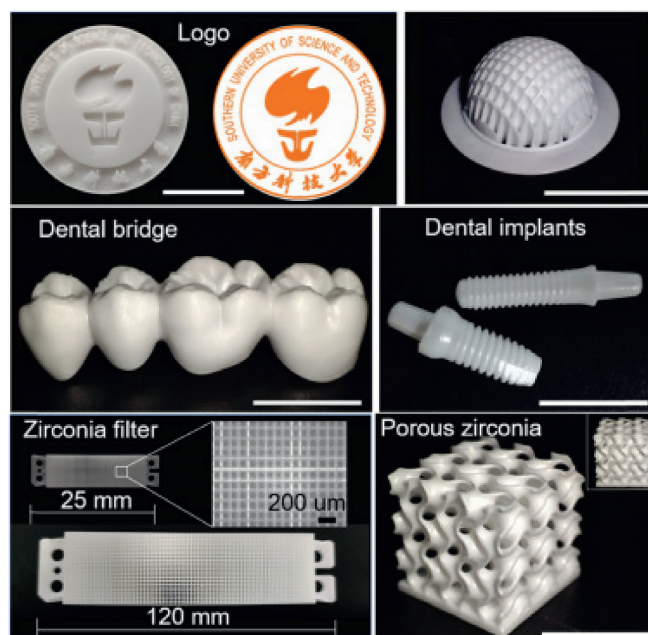
Таблица 3. Матрица выбора технологии и оборудования (керамические технологии)

Ключевой параметр	Технология	Типовые требования	Примеры моделей
Максимальная точность / качество поверхности	Фотополимеризация (DLP/LCM)	Разрешение ~40–60 мкм, слой ~20–200 мкм, сильная роль реологии шликера и профиля спекания	Lithoz CeraFab System S320 (246×130 мм платформа)
Прототипирование, лаборатория, высокая детализация мелких изделий	DLP/LCM (compact)	Разрешение ~40 мкм, слой ~25–100 мкм	Lithoz CeraFab Lab L30, 3DCeram C1000
Более простая геометрия, возможная пористость, масштаб	Binder Jetting/экструзия паст	Точность обычно ниже, зато проще по оборудованию/масштабированию; спекание критично	Зависит от материалов и оборудования для спекания



← Рис. 10. Керамический 3D-принтер Lithoz CeraFab System S320 для серийного производства технической керамики, основанный на технологии LCM [14]

Рис. 11. Изделия из керамики (ZrO_2), полученные методом LCM: зубные мосты, имплантаты, фильтры и пористые структуры [14] →



Ювелирные и литейные применения

Ювелирные применения демонстрируют высокую степень цифровизации. 3D-печать позволяет реализовать массовую кастомизацию изделий. Критическими параметрами являются детализация и чистота выжигания, что определяется материалами (воск/выжигаемые смолы). Качество определяется не только принтером, но и всей системой: смола → печать → промывка/постработка УФ → выгорание → литье → качество поверхности [15–16].

Технико-экономический анализ технологии 3D-печати ювелирных моделей в сравнении с классической восковой технологией приведен в работе [17].

Ключевые параметры (ювелирная печать под литье) [18]

- Разрешение XY и стабильность Z (микродетали/гравировки).
- Качество выгорания (ash-free burnout): минимальная зольность, предсказуемые профили печи.
- Повторяемость размеров (компенсация усадки/деформаций модели и формовочных масс).



Рис. 13. Восковые модели, напечатанные на принтере Solidscape S325



Рис. 12. 3D-печать на принтере Systems ProJet MJP 2500W [19]

Таблица 4. Матрица выбора технологии и оборудования (ювелирные и литейные применения)

Ключевой параметр	Технология	Типовые диапазоны требований (ориентир)	Примеры моделей
Чистый выжиг (минимум золы), надежное литье	SLA/DLP + castable resin	Ключевое — выжигание (burnout) и повторяемость профиля печи/формомассы	Formlabs Castable Wax Resin (20% wax, zero ash, clean burnout), Formlabs Form 2/3/4
Ультрадеталь (микрогравировки, тонкие элементы)	DLP (высокое разрешение XY)	Критичны XY-разрешение и стабильность поддержек/ориентации	Часто выбирают DLP-системы, заточенные под кастинг, ProJet MJP 2500W, Formlabs Form 4
Производительность «деревьев» в смену	DLP/SLA-ферма	Важны скорость печати, простота постпроцесса, предсказуемость выжига	Ферма из 2–6+ машин + стандартизированный выжиг, DWS

• Производительность партии (сколько «деревьев» в день) + удобство постобработки [19].

Постпроцессы: промывка/сушка, постотверждение (УФ, зависит от смолы), выжигание + литье, затем финишная обработка.

ТСО. Главные драйверы: материал (смола/воск), расходники постпроцесса, брак при выжигании/литье.

Строительная 3D-печать

Строительные технологии (3DCP) находятся на стадии быстрого роста. Ключевые факторы — реология материала [20–22], межслойная адгезия и интеграция армирования. Строительные системы (портальные и мобильные) [23–26] обеспечивают сокращение сроков возведения оболочки здания и снижение трудозатрат.

Ключевые параметры строительной 3D-печати:

Геометрия и кинематика: портальная рама vs мобильность, точность позиционирования, рабочий объем/габариты.

Производительность: скорость укладки, непрерывность подачи, надежность насоса/шнека, время на переналадку.

Материал: окно реологии (подача/экструзия), способность к укладке (buildability) слоев, ранняя прочность, усадка/растрескивание, долговечность.

Армирование/интеграция: методы армирования, закладные, инженерные решения, контроль качества.

Нормативы и контроль качества (QA/QC): протоколы испытаний, отслеживаемость (traceability) состава, повторяемость.

Постпроцессы: контроль выдерживания/влажности, возможная подрезка/шлифовка, интеграция закладных/инженерии, испытания прочности.

ТСО: определяют принтер, материал (смесь + логистика), обслуживание насосов/шнеков, простои, квалификация команды и контроль качества.

Сравнительный анализ ТСО

Структура затрат (ТСО) различается в зависимости от технологии (рис. 17): для LPBF с ее высокой точностью критичны порошки и постобработка, для SLS с высокой производительностью важными являются материалы



Рис. 14. Портальный строительный принтер S-400.



Рис. 15.
Мобильный
строительный
принтер
Rogue 1302.
Источник: AMT



Рис. 16. Концепт Charlotte (2025) на уровне R&D

Таблица 5. Матрица выбора технологии и оборудования (строительная 3D-печать)

Ключевой параметр	Технология/архитектура	Типовые требования	Примеры моделей
Скорость возведения + масштаб по длине	Gantry (портал)	Скорость подачи/укладки, стабильность смеси, непрерывность; точность обычно на уровне см/мм	ICON Vulcan, S400 (AMT), COBOD2
Качество траектории/слоя в сложной геометрии	Робот-манипулятор	Лучше по траекториям/ориентации, но сложнее интеграция/ограждение/логистика	подбирается под интегратора и задачи
Мобильность/полевые условия	Mobile/track/wheeled systems	Критична логистика, подготовка площадки, стабильность подачи и энергоснабжения	Apis Cor, Rogue 1302 (AMT)

и их повторное использование, для строительной печати с возможностью масштабирования определяющими являются логистика и подготовка смеси.

TCO (Total Cost of Ownership — совокупная стоимость владения) — это метод оценки, учитывающий все прямые и косвенные расходы на приобретение, внедрение, эксплуатацию и утилизацию актива (IT-систем, оборудования, ПО) за весь жизненный цикл. TCO помогает увидеть реальную цену, которая часто превышает первоначальную стоимость покупки из-за затрат на поддержку, обучение и обслуживание.

Основные составляющие TCO. Прямые затраты: цена покупки оборудования/ПО, стоимость лицензий, проектирование и установка. Косвенные (операционные) затраты: обслуживание, ремонт, обучение персонала, энергопотребление, простои в работе. Утилизация: расходы на списание или замену актива по окончании его жизненного цикла.

Использование TCO позволяет принимать обоснованные финансовые решения. Например, покупка более дорогого, но надежного сервера может быть выгоднее в долгосрочной перспективе, чем покупка дешевого, требующего постоянного ремонта.

FAT (Factory Acceptance Test) и SAT (Site Acceptance Test) — этапы приемки промышленного оборудования

FAT (Factory Acceptance Test — заводские приемочные испытания перед отгрузкой):

- Проводятся на заводе-изготовителе перед отправкой оборудования.
- Цель — убедиться, что оборудование полностью соответствует требованиям заказчика и техническому заданию (спецификациям).
- Проверяют: функциональность, безопасность, целостность данных, работу блокировок, аварийные сигналы и интерфейсы.
- Результат: устранение дефектов до отправки, снижение рисков.

SAT (Site Acceptance Test — приемочные испытания на месте):

- Проводятся на площадке заказчика после доставки, сборки и подключения.

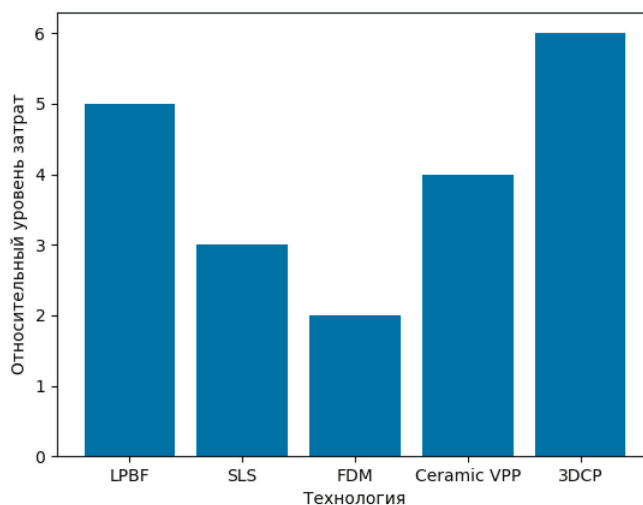


Рис. 17. Сравнительная относительная структура TCO

- Цель — подтвердить, что оборудование не повреждено при транспортировке и работает правильно в условиях реального производства.
- Проверяют: качество монтажа, работоспособность всех систем после установки.
- Результат: ввод в эксплуатацию и обучение персонала.

Сравнительная производительность

Производительность определяется объемом рабочей камеры, скоростью нанесения слоя или подачи материала, а также уровнем автоматизации (рис. 18, таблица 6).

Заключение. Аддитивные технологии 2016–2025 гг. достигли стадии индустриальной зрелости. Дальнейшее развитие будет связано с оптимизацией экономики производства, повышением повторяемости и стандартизацией процессов.

Аддитивные технологии (2016–2025 → следующая фаза) с учетом перспективы AI

1. Статья [28] вводит новое измерение, связанное с внедрением искусственного интеллекта (AI) в AM, которое эволюционирует от цифрового производства к интеллектуальному производству. При этом фокус направлен

Таблица 6. Матрица параметров

Категория	Точность	Производительность	Постпроцесс	Ключевой драйвер TCO
Металл LPBF	Высокая	Средняя	Термо + CNC	Порошок
Металл DED	Средняя	Высокая	Синтеринг	Энергия
Binder Jet	Средняя	Высокая	Синтеринг	Печь
SLS/MJF	Средняя	Высокая	Очистка	Порошок
FDM	Средняя	Низк./сред.	Поддержки	Материал
Керамика VPP	Высокая	Средняя	Синтеринг	Печь
3DCP	Низкая	Очень высокая	Интеграция	Логистика

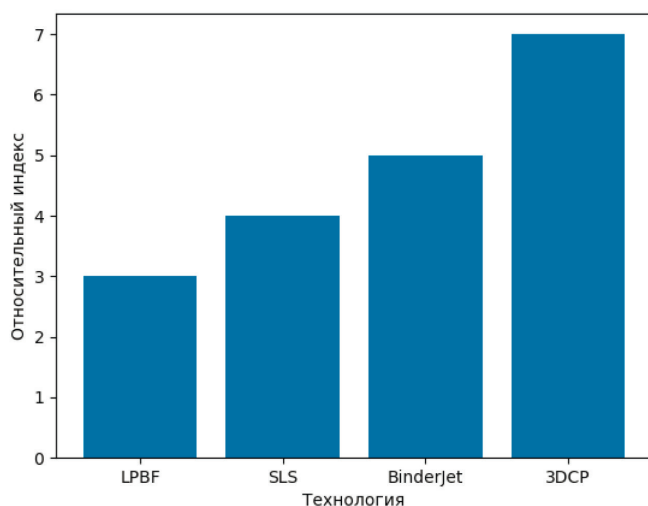


Рис. 18. Сравнительная относительная производительность

на: машинное обучение (ML); искусственный интеллект (AI); автоматизацию проектирования и управления процессом; интеллектуальные системы принятия решений.

2. Интеграция AI в полный производственный цикл AM

Одним из ключевых направлений развития является внедрение AI на всех этапах жизненного цикла AM.

Этап проектирования. Использование AI включает: генеративный дизайн (generative design); топологическую оптимизацию; автоматическое формирование геометрии изделий. Данные методы позволяют существенно сократить время инженерной разработки и перейти от итеративного проектирования к алгоритмически управляемому поиску оптимальных решений.

Этап подготовки (pre-processing). На стадии подготовки к печати AI применяется для: автоматической оптимизации параметров процесса; генерации поддерживающих структур; планирования траекторий печати. Это позволяет заменить традиционные методы проб и ошибок системным и воспроизводимым подходом.

Этап печати (in-process control). Наиболее значимый эффект достигается при внедрении AI в процессе печати: мониторинг в реальном времени; обнаружение дефектов с использованием систем компьютерного зрения; адаптивное управление параметрами. Данный подход обеспечивает переход к системам с замкнутым контуром управления (closed-loop control), в которых параметры процесса корректируются в режиме реального времени.

Этап постобработки и контроля качества. AI используется для: прогнозирования дефектов; автоматизации контроля качества; предиктивного обслуживания оборудования. В результате формируется единая интеллектуальная система управления качеством продукции.

3. Переход от цифровых к автономным системам

Сопоставление подходов Industry 4.0 и AI-ассистированного производства позволяет выделить ключевой технологический сдвиг. В рамках Industry 4.0 оборудование взаимосвязано; осуществляется сбор и анализ данных. В рамках AI-ассистированного AM системы интерпретируют данные, принимают решения и корректируют процесс.

Таким образом, происходит переход от пассивных систем, исполняющих заданные команды, к активным системам, способным к самооптимизации в реальном времени.

4. Преодоление ключевых ограничений аддитивных технологий

Ранее выявленные ограничения АТ включают: нестабильность процессов; вариативность качества; высокую зависимость от квалификации оператора; ограниченную производительность. Интеграция AI позволяет: стабилизировать процесс за счет адаптивного управления; повысить воспроизводимость результатов; снизить влияние человеческого фактора; оптимизировать параметры в режиме реального времени. Следовательно, AI выступает не как дополнительное улучшение, а как ключевой механизм преодоления существующих технологических барьеров.

5. Материалы на основе данных (data-driven materials) и параметрическая оптимизация

Важным направлением является интеграция AI в разработку материалов. Если ранее подбор состава осуществлялся преимущественно экспериментальным путем, то современные подходы включают: моделирование поведения материалов; оптимизацию рецептур (особенно актуально для строительных смесей); адаптацию параметров печати под конкретный материал. Это приводит к формированию концепции материалов на основе данных, где свойства материалов определяются и оптимизируются на основе анализа данных и алгоритмов машинного обучения.

6. Экономические аспекты и масштабируемость

С точки зрения экономики производства аддитивные технологии традиционно сталкиваются с ограничениями по стоимости, скорости, масштабируемости.

Внедрение AI оказывает существенное влияние на данные параметры за счет:

- повышения процента успешных построений (build success rate);
- оптимизации времени печати;
- снижения количества брака и отходов;
- уменьшения зависимости от высококвалифицированного персонала.

Таким образом, AI становится ключевым фактором перехода от экономически ограниченной технологии к промышленно масштабируемой производственной системе.

7. Трансформация роли персонала

В контексте Industry 5.0, ориентированной на человекоцентричное производство, внедрение AI приводит к изменению роли человека в производственном процессе: оператор → супервайзер; ручное управление → стратегическое управление; выполнение операций → контроль и оптимизация системы.

В результате формируется новая структура занятости: снижение доли операторов; рост потребности в инженерах и специалистах по данным; усиление роли программного обеспечения.

8. Значение для строительной 3D-печати

Особую значимость AI-ассистированные технологии приобретают в области строительной 3D-печати,

где традиционно наблюдаются следующие проблемы: нестабильность поведения материалов; влияние внешних факторов (температура, влажность); ограниченный уровень автоматизации; сложность контроля качества.

Применение AI позволяет реализовать: корректировку состава смеси в реальном времени; мониторинг качества слоев; автоматическую коррекцию траекторий печати; прогнозирование дефектов.

Ключевой вывод заключается в том, что масштабирование строительных аддитивных технологий невозможно исключительно за счет развития оборудования. Эффективное внедрение возможно только при интеграции: программного обеспечения; систем управления процессом; алгоритмов искусственного интеллекта.

9. Итоговая модель развития аддитивных технологий

С учетом рассмотренных подходов аддитивное производство можно представить как многоуровневую систему:

1. Технологическая платформа.
2. Цифровая производственная система (Industry 4.0).
3. Устойчивое и человекоцентричное производство (Industry 5.0).
4. Промышленно верифицированная технология.
5. Интеллектуальная автономная система (AI-ассистированный уровень).

Выводы. За период 2016–2025 гг. аддитивные технологии прошли эволюцию: от прототипирования → к цифровому производству → к интеллектуальным автономным системам. На современном этапе AI выступает ключевым фактором дальнейшего развития, обеспечивая повышение эффективности; устойчивость процессов; масштабируемость производства.

В долгосрочной перспективе конкурентоспособность в области аддитивных технологий будет определяться не столько характеристиками оборудования, сколько уровнем интеграции.

Заключение

Статья демонстрирует, что в период с 2016 по 2025 год аддитивные технологии прошли переход от прототипирования к промышленному применению, сформировав устойчивые технологические категории с различными областями оптимального использования. Показано, что ключевыми факторами развития являются оптимизация параметров процессов, развитие материалов и интеграция цифровых производственных систем. Особое значение приобретает внедрение искусственного интеллекта, обеспечивающее повышение стабильности, качества и масштабируемости производства. В совокупности это свидетельствует о переходе аддитивных технологий к этапу интеллектуального автономного производства. ■

Приложение 1. Аббревиатуры

Abbreviation	English	Русский
AM	Additive Manufacturing	Аддитивное производство
ME	Material Extrusion	Экструзия материала
FDM	Fused Deposition Modeling	Моделирование методом послойного наплавления
PEEK	Polyether Ether Ketone	Полиэфирэфиркетон
PEI	Polyetherimide	Полиэфиримид
VP	Vat Polymerization	Фотополимеризация в ванне
SLA	Stereolithography	Стереолитография
DLP	Digital Light Processing	Цифровая обработка светом
cDLP	Continuous Digital Light Processing	Непрерывная цифровая обработка светом
SLS	Selective Laser Sintering	Селективное лазерное спекание
DMLS	Direct Metal Laser Sintering	Прямое лазерное спекание металлов
CAD	Computer-Aided Design	Автоматизированное проектирование
STL	Stereolithography	Формат стереолитографии
PAA	Polyacrylic Acid	Полиакриловая кислота
SMA	Shape Memory Alloy	Сплав с эффектом памяти формы
LPMP	Laser Powder Melt Pool	Лазерное формирование расплава порошка
SLM	Selective Laser Melting	Селективное лазерное плавление
LPBF	Laser Powder Bed Fusion	Лазерное сплавление слоя порошка
PBF	Powder Bed Fusion	Сплавление слоя порошка
EBM	Electron Beam Melting	Электронно-лучевое плавление
AI	Artificial Intelligence	Искусственный интеллект
MJF	Multi Jet Fusion	Многосопловое сплавление
PVP	Polyvinyl Pyrrolidone	Поливинилпирролидон
DED	Direct Energy Deposition	Прямое энергоосаждение
CFR	Carbon Fiber Reinforcement	Армирование углеродным волокном
LOM	Laminated Object Manufacturing	Послойное ламинирование
ITOP	Integrated Tissue and Organ Printing System	Интегрированная система печати тканей и органов
IoT	Internet of Things	Интернет вещей

Приложение 1. Аббревиатуры (продолжение)

Abbreviation	English	Русский
CNC	Computer Numerical Control	Числовое программное управление
PLA	Polylactic Acid	Полимолочная кислота
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene	Акрилонитрил-бутадиен-стирол
MJ	Material Jetting	Струйная подача материала
DOD	Drop-On-Demand	Капельная подача материала
UV	Ultraviolet	Ультрафиолет
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol	Полиэтилен-терефталат-гликоль
FFF	Fused Filament Fabrication	Печать расплавленной нитью
BJ	Binder Jetting	Струйное нанесение связующего
CJP	Color Jet Printing	Цветная струйная печать
PVA	Polyvinyl Alcohol	Поливиниловый спирт
HIP	Hot Isostatic Pressing	Горячее изостатическое прессование
QA/QC	QA — Quality Assurance, QC — Quality Control	Обеспечение качества (QA) и контроль качества (QC)
DfAM	Design for Additive Manufacturing	Проектирование для аддитивного производства
ROI	Return on Investment	Возврат инвестиций
OEE	Overall Equipment Effectiveness	Общая эффективность оборудования
TCO	Total Cost of Ownership	Совокупная стоимость владения
CAPEX	Capital expenditure	Капитальные затраты в расширение бизнеса
NDT / CT	Computed tomography in nondestructive testing	Компьютерная томография в методе неразрушающего контроля

Литература

- Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies. – 3rd ed. – Cham: Springer, 2021. – 675 p.
- DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S. et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties // Progress in Materials Science. – 2018. – Vol. 92. – P. 112–224.
- Longfei Zhou, Jenna Miller, Jeremiah Vezza, Maksim Mayster, Muhammad Raffay, Quentin Justice, Zainab Al Tamimi, Gayn Hansotte, Lavanya Devi Sunkara, Jessica Bernat. Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. <https://doi.org/10.3390/s24092668>
- Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G. et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods and applications // Composites Part B. – 2018. – Vol. 143. – P. 172–196.
- Formnext 2024–2025 Official Industry Reports. – Frankfurt am Main, 2025.
- RAPID + TCT 2024–2025 Industry Summaries. – SME, 2025
- The Integration of Additive Manufacturing into Industry 4.0 and Industry 5.0: A Bibliometric Analysis (Trends, Opportunities and Challenges). Shayan Dehghan, Sasan Sattarpanah Karganroudi, Saïd Echchakoui and Nouredine Barka. 2025. <https://doi.org/10.3390/machines13010062>
- Polymer Laser Sintering (PLS) и FDM: review (2024) — (Wiley Online Library)
- Polymer AM advances (2024, ScienceDirect) — широкий обзор полимерной АТ и применений. (ScienceDirect)
- 3Dnatives
- Paula González-Suárez, Pedro Manuel Hernández-Castellano and Annabella Narganes-Pineda Additive Manufacturing of Ceramics Study: Sustainable Material Extrusion and Its Potential Role in Circular Economy. <https://doi.org/10.3390/app16021019>
- Xiangquan Wu, Jiachen Teng, Xiangxu Ji, Chunjie Xu, Dong Ma, Shang Sui, Zhongming Zhang Research progress of the defects and innovations of ceramic vat photopolymerization/ <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103441>
- An Overview on 3D Printing of Ceramics Using Binder Jetting Process Venukumar Sarila, Harisivasri Phanindra Koneru, Saritha Pyatla, Muralimohan Cheepu, Venkata Charan Kantumunchu, Damodaram Ramachandran Engineering Proceedings Volume 61 Issue 1 <https://doi.org/10.3390/engproc2024061044>
- www.lithoz.com/en/
- Guide to Resin 3D Printers: SLA vs. DLP vs. MSLA vs. LCD https://formlabs.com/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-lp/?srsltid=AfmBOopXkuGfVyhJe-kyUapsnLG7TZerI60DHX8makETxuQCZYfncO0&utm_
- <https://www.3dsystems.com/3d-printers/projet-mjp-2500w-plus>
- Rapid investment casting: a techno-economic analysis for evaluating VAT photopolymerisation processes// The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Volume 134, pages 5717–5739, (2024). <https://link.springer.com/journal/170>
- Digital Goldsmiths: Top 3D Printers to Revolutionize Your Jewelry Workflow. https://all3dp.com/1/best-3d-printers-for-jewelry/?utm_
- SLA Professional 3D Printers: Industrial Manufacturing with High Performance Materials. <https://www.dwssystems.com/3d-printers/>
- Buswell R. A., Leal de Silva W. R., Jones S. Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research //Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 112. P. 37–49. DOI:10.1016/j.cemconres.2018.05.006
- Towards innovative and sustainable buildings: A comprehensive review of 3D printing in construction. Habibelrahman Hassan, Edwin Rodriguez-Ubinas, Adil Al Tamimi, Esra Trepici, Abraham Mansouri, Khalfan Almehairbi Automation in Construction Volume 163, July 2024, 105417. www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580524001535
- Three-dimensional concrete printing for sustainable construction and architecture: A comprehensive review. Muhammad Adeel/ Journal of Chinese Architecture and Urbanism, 025370074, 2025, <https://doi.org/10.36922/JCAU025370074>
- 3D PrintingIndustry (2025), <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-and-construction-technology-landscape-mapped-242993>
- <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/icon-vulcan-ii/>
- 3D Concrete Printed Construction Systems 2: An Overview of 3DCP Construction Practices. www.huduser.gov/portal/sites/default/files/pdf/3D-Concrete-Printed-Construction-Systems-Part-2.pdf
- World's largest 3D-printed neighborhood nears completion in Texas. www.reuters.com/world/us/worlds-largest-3d-printed-neighborhood-nears-completion-texas-2024-08-08/
- <https://amt-print.com/>
- AI-Assisted 3D Printing – Insights on Emerging Trends and Technologies (IIP Series, Futuristic Trends in Mechanical Engineering, Vol. 3, 2025)



ТЕРМООБРАБОТКА

19-я международная специализированная выставка

Единственная в России выставка
термического оборудования и технологий

16 - 18 сентября 2026

Россия, Москва, ВДНХ, павильон 57

Основные разделы:

- Оборудование для термической и химико-термической обработки
- Промышленные печи и сушильные шкафы
- Жаропрочная оснастка
- Индукционное оборудование
- Огнеупорные и теплоизоляционные материалы
- Изделия из графита, углеродного волокна и углерод-углеродных композитов
- Лабораторное и контрольно-измерительное оборудование
- Вакуумная техника
- Автоматизация производства



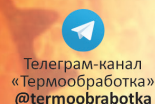
Организатор:



Независимый
выставочный
аудит



В рамках выставки «Термообработка 2025» пройдёт
19-я международная научно-практическая конференция
«Инновационные технологии термообработки»



Официальный
сайт выставки:
htexporus.ru

Реклама



23-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
ИСПЫТАТЕЛЬНОГО И КОНТРОЛЬНО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

19-21 октября 2026

Москва, МВЦ «Крокус Экспо»



Забронируйте
стенд

Организатор:



+7 (495) 252 11 07, control@mvk.ru

Testing&Control

Реклама

Особенности развития рынка аддитивных технологий в России



Виктор Рекимчук — известный эксперт в области аддитивных технологий, коммерческий директор компании ООО «Ай 3Д». Хорошее знание рынка, процессов и людей, которые развивают и продвигают данное направление, опыт работы в ведущих компаниях делают его интересным собеседником, который с готовностью откликается на инициативы, реагирует на запросы и комментирует идеи. На московской выставке «Металлообработка» редакция журнала «Аддитивные технологии» попросила Виктора Максимовича рассказать об особенностях развития рынка аддитивных технологий в России и мире.

Как бы Вы могли охарактеризовать современный этап развития аддитивных технологий в мире? Можно ли говорить об их зрелости?

На начальной стадии развития аддитивных технологий (АТ) оборудование рассматривалось как вспомогательное и использовалось для быстрого прототипирования деталей, спроектированных для традиционных методов производства. С развитием производства 3D-сканеров появилась возможность быстро получать STL-файлы для обратного проектирования. Это было инновацией для восстановления деталей с утраченной конструкторской документацией. Далее появились технологии металлической 3D-печати — для них были разработаны порошковые материалы по аналогии с традиционными методами.

На современном этапе развития появились новые технологии 3D-печати, функциональные материалы, которые расширили применение АТ в различных отраслях промышленности. Разработано оборудование для пост-обработки деталей, произведенных методом 3D-печати, появились новые программные продукты CAD, CAE, CAM, которые были созданы специально для проектирования в АТ (DfAM). Это и есть начало зрелости АТ.

Однозначно можно сказать, что АТ обеспечивают абсолютно новый подход к проектированию и производству уникальных изделий, которые невозможно спроектировать и произвести другим методом, но их внедрение требует новых правил сертификации.

Какие технологические и бизнес-процессы являются сейчас наиболее важными?

Отвечая на первый вопрос, я уже отметил значимость программных продуктов в АТ. Кроме того, на сегодняшний день использование FDM-принтеров для конструкторов является технологической необходимостью при создании

прототипов. Это позволяет экономить время и дорогостоящие материалы в производстве тестовых образцов.

В целом, на мой взгляд, нельзя разделить технологические процессы для АТ на значимые или незначимые, но можно обозначить белые пятна, которые требуют повышенного внимания.

Что касается бизнес-процессов, связанных с получением прибыли, в нашей стране они находятся в стадии развития. В большинстве случаев компании знакомятся с новыми возможностями АТ, которые направлены на уменьшение себестоимости продукта и повышение производительности труда. Затем предполагается закупка оборудования, обучение сотрудников, это стимулирует разработчиков оборудования вкладывать средства в создание новых инструментов для АТ.

В какие ниши 3D-печать встроилась так, что уже невозможно представить, как без нее обходились?

Если мы говорим про нашу страну, это технология обратного проектирования с последующей 3D-печатью детали, образца. В связи с санкциями цепочка поставок многих запчастей ограничена или невозможна, а АТ позволяют решить проблему их импортозамещения. При этом технология 3D-печати может быть абсолютно разной: SLM, DED, BJ (в основном 3D-принтеры для 3D-печати песчаных форм с последующим литьем различных металлов), EBM, WAAM, SLS, SLA и т.д.

Какие события и разработки последнего времени Вы можете выделить?

Аддитивные технологии продолжают развиваться, преодолевая ограничения, требуют дополнительных действий для улучшения точности геометрии или свойств материалов. Так, для одной из самых востребованных на мировом рынке технологий SLS для улучшения прочност-

ных характеристик материалов и качества поверхности была разработана технология постобработки — паровое химическое сглаживание (CVS). Это пример того, как будут появляться технологии, которые в дальнейшем улучшат качество производимых 3D-печатью деталей.

Также можно отметить использование искусственного интеллекта (ИИ), который позволяет ускорять процессы проектирования и подготовки деталей к 3D-печати. Эта связь в дальнейшем будет развиваться огромными шагами, так как ИИ позволяет обрабатывать большое количество данных в считанные минуты.

Что происходит в мире? С чем связана череда поглощений компаний?

К сожалению, в мире происходит стагнация производства, которая связана с нарастающим кризисом. На таком нестабильном рынке маленькие компании не выдерживают конкуренции и, как следствие, продают свои ноу-хау более крупным игрокам в АТ.

За кем основные интеллектуальные ценности? Какие научные и прикладные задачи стоят перед специалистами в мире и в нашей стране?

Очевидно, что основные интеллектуальные ценности находятся в странах Европы, США и Китае.

На мой взгляд, сегодня научные исследования связаны в большей степени с разработкой новых материалов и сплавов, которые невозможно использовать в классических технологиях или трудно обрабатывать.

Что касается научных задач, то я бы не стал разделять их на наши и мировые, потому что они одни и те же. И в нашей стране есть ученые и инженеры, которые способны решать очень сложные задачи.

Аддитивные технологии в нашей стране, как и во всем мире, в основном развивают частные компании. Они наращивают большой научный потенциал по производству 3D-принтеров, а вот применение технологии по умолчанию отдано производству, которое не всегда готово его принять. АТ пока не стали теми технологиями, которые заключаются в нажатии одной кнопки, но комбинация в использовании ИИ и робототехники даст этот эффект в скором будущем.

А теперь давайте попробуем сравнить с Китаем. Какие факторы помогли Китаю выйти на такой уровень? Ведь они не были пионерами в 3D-печати.

АТ в нашей стране начали использовать даже раньше, чем в Китае, благодаря ОДК, которая стала применять технологию в производстве компонентов авиационных двигателей и газотурбинных установок.

Но в Китае 12–15 лет назад была принята программа по обучению китайских студентов в ведущих вузах США, Германии и Великобритании, открытые источники называют цифру 2 миллиона человек. После обучения самые талантливые студенты оседали в Силиконовой долине, где занимались различными прорывными технологиями, в том числе и АТ. Это происходило в США вплоть до первого президентского срока Дональда Трампа в 2017 году.

После того как он провозгласил, что каждый китайский студент — это шпион, они вернулись в Китай. Полученные знания позволили им очень быстро разработать промышленные 3D-принтеры, а так как 90% мирового производства товаров находится в Китае, то масштабировать рынок АТ не составило большого труда.

Почему в нашей стране шаги не столь эффективные? Как поддержать наших производителей в конкуренции с сильными китайскими компаниями?

Ответ находится на поверхности: мы мало что производим сами, практически нет запроса от российского рынка.

Не секрет, что сейчас можно в странах Ближнего Востока зарегистрировать компанию, например, бытовой техники, а в Китае подписать контракт на производство под собственным брендом. Затем его продавать через «Алиэкспресс» по всему миру, а также на российском рынке. Не надо вкладывать деньги в разработку товара, в продвижение бренда, сертификацию и т.д. Это касается производства одежды, обуви, сварочных аппаратов, автомобилей, 3D-принтеров, 3D-сканеров и т.д.

Да, у нас появились 3D-принтеры, есть базовые материалы и ПО, но их качество до сих пор уступает китайским, которые уже превзошли продукцию европейских и американских производителей. Почему так произошло в Китае? Потому что государство сделало усилие для развития АТ.

Кто-то может задаться вопросом: зачем тогда нам надо упираться и развивать АТ в России, если можно использовать китайское оборудование? Ответ: суверенитет России в развитии АТ. В этом контексте государство безусловно должно поддерживать производителей российского оборудования, материалов и ПО, чтобы продукты, произведенные АТ, были дешевле, чем традиционное производство. Почему? Потому что традиционное производство остается дешевым за счет того, что все оборудование и разработки были давно оплачены государством при СССР, а компании, не вкладывая деньги в развитие, продолжают его эксплуатировать.

Кто-то может сказать: а давайте запретим ввоз оборудования даже из дружественных нам стран или введем пошлины. Этого делать нельзя, потому что высокотехнологичные компании должны использовать только передовые технологии. Российским разработчикам АТ нужна реальная государственная поддержка финансирования, а не искусственные препоны, чтобы они могли реально конкурировать с зарубежными производителями.

Мне кажется, что в России крайне редко говорят о фабриках АТ.

Мы редко говорим про ЦАТ или фабрики АТ, потому что это еще «штучный товар» на российском рынке. Это происходит, на мой взгляд, из-за недооцененности в целом АТ. Технология не стала обыденной, в медийном пространстве она до сих пор вызывает эффект «вау», как будто она про будущее.

Какие внедрения АТ Вы бы отметили в мире?

Отвечая на этот вопрос, я хочу сказать, что АТ позволяют создавать уникальные изделия, которые невозможно произвести другим способом. Это абсолютная правда! Эта технология экономит ресурсы, не загрязняет атмосферу, не требует больших производственных площадей. Она может быть использована в различных индустриях. Почему внедрение идет медленно? Нужно время на адаптацию этой молодой технологии, что сейчас и происходит. Технология имеет свои плюсы, но есть и минусы, которые можно определить только при практическом использовании оборудования, материалов и ПО.

Опыт каких компаний наиболее показателен с точки зрения стратегии развития?

Не секрет, что это компании, которые одни из первых начали использовать АТ в своих производственных цепочках в авиационной, аэрокосмической и медицинской направленности. О них можно почитать в аналитических статьях на страницах журнала «Аддитивные технологии».

Российские компании могут обеспечить комплексное предложение?

Выполнение заказа под ключ является идеальным для потребителя. В этом случае проектирование продукта, его изготовление, постобработка выполняются в одном месте. Также возможен вариант, когда конструкторское бюро сначала проектирует продукт, а услугу 3D-печати и постобработку производит центр АТ. В обоих случаях работа начинается с проектирования для АТ с использованием CAD-программ. В нашей стране, к сожалению, лицензионных зарубежных программ CAD осталось малое количество, за исключением китайских продуктов. Российские производители ПО для АТ пытаются сократить отставание, но на это уходит много ресурсов и времени. Также есть проблемы в 3D-печати различными материалами, которых может не оказаться.

Конечный потребитель хочет получить комплексные решения, но не все компании могут это обеспечить.

Давайте поговорим про материалы. Какие из них сейчас наиболее востребованы? Что производят и не производят в России?

Разнообразие материалов для 3D-печати — это мечта, к которой стремятся пользователи АТ. В России производятся базовые порошковые металлические материалы для 3D-печати и наплавки для технологий MBJ, SLM, EBM, DED. Также имеется производство проволоки и прутков для технологии наплавки.

Что касается пластиковых технологий FDM и FGF, то для них разработано достаточно много материалов в виде нитей и гранул.

Технология SLS использует пластиковые порошковые материалы. Самые востребованные материалы — PA12 и PA11, которые могут быть стеклонаполненными, алюминийнаполненными или с карбоновым наполнением. Пластиковые материалы в России практически не производятся в промышленных масштабах, хотя заявлено, что ФГУП «ВИАМ» разработал их аналоги.

Промышленные SLA-принтеры в России практически не производятся, но материалы в виде фотополимерных смол разработали несколько компаний.

Песок и смолы, которые используются в технологии VJ для 3D-печати песчаных форм с последующим литьем, также разработаны для российского рынка.

Исходя из этого краткого анализа, можно сделать вывод, что в России есть научный потенциал, позволяющий синтезировать сложные композиции. С фантазией, я думаю, тоже все в порядке, но нет объема заказов на их производство. Производители материалов не могут просто производить материалы в никуда, им нужны заказы и объемы. В Китае производится разнообразие материалов для АТ, потому что есть запросы от клиентов из различных индустрий.

Говорят, аддитивное оборудование не столь сложно в производстве, а конкурентоспособность, оригинальность заложены прежде всего в ПО. И большинство производителей оборудования пытаются вести собственные разработки, как бы это ни было трудоемко и дорого. В мире так же?

Как я правильно понимаю, вопрос о ПО (жесткий диск), который управляет 3D-принтером и ПО, которое помогает подготовить 3D-принтер к 3D-печати. Как правило, производитель 3D-принтеров сам разрабатывает управляющую программу, а вот программу для подготовки к 3D-печати может разработать сторонняя компания.

Из своего опыта могу сказать, что для компании SLM Solutions программное обеспечение для подготовки к 3D-печати Build Processor было разработано бельгийской компанией Materialize. В России также производители оборудования используют ПО для подготовки к 3D-печати как собственного производства, так и сторонних производителей.

Какие шаги, по Вашему мнению, должны быть сделаны для преодоления барьеров и расширения рынка аддитивных технологий в России?

Самый важный шаг для дальнейшего развития АТ должно сделать государство. При всей видимой простоте использования АТ на самом деле это технологии высокого уровня, которые требуют финансовых вложений в виде исследований и привлечения наших ученых для продолжения разработок.

Яркой историей успеха развития АТ в России можно считать деятельность ученого Глеба Андреевича Турчина, который является директором ИЛИСТ и ректором Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. Глубокие знания лазерной технологии обработки материалов и привлечение талантливых ученых дали возможность ему и его коллективу разработать линию промышленных 3D-принтеров мирового уровня.

Могу с уверенностью сказать, что нет у нас никаких барьеров, которые надо преодолевать, так как они созданы искусственно. Нужен серьезный подход к развитию АТ, который обеспечит технологический суверенитет нашей страны. ■

Перспективы расширения рынка аддитивных технологий в России

По данным отчета Wohlers Report – 2026, мировой рынок аддитивного производства в 2025 году составил 24,2 млрд долларов США, показав рост 10,9%.

Объем российского рынка в 2025 г., по данным Ассоциации аддитивных технологий (АРАТ), составил порядка 22,3 млрд рублей (~1,3%) с опережающим ростом 21,2%, что говорит о его молодости, потенциале к развитию и чувствительности к различным факторам.

Редакция журнала «Аддитивные технологии» предложила экспертам отрасли ответить на вопрос, какие факторы могли бы способствовать расширению рынка аддитивных технологий в России и позволили бы стране занять достойное место в индустрии.

3D-печать для медицины — эффективный инструмент, позволяющий экономить время и деньги, повышать качество жизни пациента



Владимир Дувидзон, руководитель направления обработки полимеров Инженерной фирмы «АБ Универсал»

Рынок аддитивных технологий имеет два перспективных направления для активного применения.

Первое — это техническое прототипирование — быстрое получение опытного образца нового изделия. И я считаю абсолютно неправильным игнорировать этот передел. Он должен стать нормой для всех, независимо от того, сложное изделие или простое. Быстро воспроизвели, взяли в руки, испытали и приняли решение, что делать дальше. Дорогие металличе-

ские изделия целесообразно воспроизвести в пластике, чтобы проверить геометрию, соотношение размеров, оценить технологичность и собираемость. Изготовление в металле крупных или даже не очень крупных, но сложных изделий — это потеря времени и денег. В пластике по времени мы затратим примерно сутки, а в металле — не меньше чем трое.

Второе направление — медицина, и прежде всего это создание полимерных моделей для планирования

операций. Его надо продвигать и внедрять в повседневную практику оперирующих врачей, которые до конца не используют 3D-печать как инструмент, который дает преимущества для оценки проблемы пациента и выбора стратегии операции. Реальная картина и их представление по изображению в компьютере до операции могут сильно не совпадать. Следующая составляющая — это производство индивидуальных, и это важно, персонально изготовленных для каждого пациента медизделий: имплантатов, протезов. 3D-печать позволяет изготовить их быстрее, экономичнее, чем при механической обработке.

Реальный спрос в медицине на порядок превышает текущий по той простой причине, что не все еще готовы к изменениям, и в этом потенциал для будущего роста. Кроме того, существует перспектива серийного производства изделий как в медицине, так и в технике. Но здесь возникает проблема сертификации. И она более сложная, чем при классической механообработке, потому что в зависимости от расположения изделия в пространстве в процессе 3D-печати меняются физико-механические свойства. И она должна решаться на уровне государства или корпораций, поскольку сертифицировать изделия довольно долго и дорого.

Таким образом, у аддитивных технологий есть своя ниша, которая дает огромное преимущества потребителю по сравнению со стандартными решениями, в первую очередь при создании новых изделий в опытных и экспериментальных партиях.

Аддитивные технологии должны стать промышленным инструментом



Виталий Просвирнин,
сооснователь
Фабрики братьев
Просвирниных

Расширение рынка 3D-печати в России напрямую связано не с популяризацией самой технологии, а с ее переходом в разряд промышленного инструмента.

Первый ключевой фактор — экономика. Пока 3D-печать воспринимается как дорогая игрушка для прототипов, рынок будет расти медленно. Перелом наступает там, где заказчик видит конкретную выгоду: снижение стоимости мелкосерийного производства, сокращение сроков, отказ от складских запасов и логистики. Чем больше будет таких кейсов с цифрами, тем быстрее рынок будет масштабироваться.

Второй фактор — стандартизация и предсказуемость качества. Промышленность не работает с «примерно хорошо». Нужны допуски, повторяемость, контроль. Развитие ОТК, внедрение метрологии, цифрового контроля и единых подходов к качеству критически важны для роста доверия со стороны крупных заказчиков.

Третий фактор — материалы. Доступность и стабильность качественного сырья — основа любого производства. Развитие локального производства филамента и порошков, а также адаптация материалов под реальные инженерные задачи, а не «универсальные решения», дадут сильный импульс рынку.

Четвертый — кадры. Сегодня рынок ограничен не столько оборудованием, сколько людьми, которые умеют с ним работать. Инженеры, технологи, операторы — это узкое место. Системная подготовка специалистов и интеграция аддитивных технологий в образовательные программы — обязательное условие роста.

Пятый фактор — интеграция в классическое производство. 3D-печать не заменяет традиционные методы, а усиливает их. Там, где она становится частью производственной цепочки — вместе с литьем, мехобработкой, сборкой, — возникает реальный промышленный эффект.

И наконец, важен переход мышления: от «печати деталей» к «производству продукта».

Создавая уникальные продукты, мы повышаем спрос и формируем рынок

К задаче, решение которой позволило бы более полно раскрыть потенциал аддитивного производства, я отношу создание синергии с другими передовыми технологиями, такими как автоматизация контроля геометрии и модификация поверхности изделия.

Упрощение и ускорение выходного контроля, по моему опыту, помогают более мягко управлять рисками взаимодействия между заказчиком и исполнителем,



Артём Александров,
руководитель
бизнес-направления
«Аддитивное
производство»
ООО «Горизонт покрытий»

сократить барьер недоверия к технологии и снять вуаль неопределенности с критериев качества изделия.

Ускорить процесс контроля геометрии помогают различные системы, начиная от комплексов, использующих компьютерное зрение с искусственным интеллектом, и заканчивая крупногабаритными точными многоосевыми контрольно-измерительными машинами.

Модификации поверхностей, или, другими словами, обработка поверхностей и нанесение на них покрытий,

позволяет преодолеть ограничения, связанные с недоступностью переработки некоторых материалов аддитивными методами, а также существенно повысить износостойкость изделий, созданных из доступных для переработки материалов.

Например, изделия, подверженные абразивному износу, могут быть покрыты различными керамическими композициями, композициями на основе хрома, никеля и молибдена, а на изделия, ресурс которых зависит от коэффициента трения поверхности, можно нанести покрытие методом ионноплазменного напыления в вакууме.

Таким образом, синергия аддитивного производства с технологиями автоматического контроля позволит сократить барьер недоверия и увеличит в конечном итоге спрос на синтезированные изделия, а применение и отработка методов подготовки поверхности изделий с последующим нанесением покрытий позволят создавать недоступные до сих пор изделия как с точки зрения сложности геометрии, так и в части функциональных характеристик.

Потенциал рынка огромен, ключевые факторы роста известны, стратегия разработана, нужно идти к цели

Расширение рынка аддитивных технологий в России сдерживается зависимостью от импорта оборудования, материалов и программных продуктов, но потенциал для роста огромен. Ключевые факторы для достижения цели можно разделить на технологические, экономические, нормативно-правовые и кадровые.

Технологический суверенитет и импортозамещение — это фундамент роста рынка. Благодаря мерам поддержки Минпромторга РФ существует несколько отечественных промышленных решений оборудования для аддитивного производства. Однако собственное производство 3D-принтеров и периферийного оборудования требует перехода от гаражной сборки к выпуску серийных установок по технологиям селективного лазерного сплавления, селективного лазерного спекания и прямого лазерного выращивания для работы с металлами



Владислав Фунтиков,
директор
НОЦ «Инновационный
центр аддитивного
производства»
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
директор АНО
«Консорциум АТЛАС»

и полимерами, которые будут способны решать задачи высокотехнологичных отраслей промышленности. Необходима разработка отечественного программного обеспечения, а именно конкурентоспособных российских слайсеров, систем CAD/CAE/CAM, интегрированных с отечественными 3D-принтерами, не уступающих западным аналогам, строительство заводов по производству порошков (металлы, полимеры, керамика) и филаментов инженерного класса (PEEK, PEI, угле- и стеклонанополненные компаунды) с целью локализации производства необходимых материалов. Сейчас во всем наблюдается критическая зависимость от наших западных партнеров.

С точки зрения экономических факторов можно отметить большой крен рынка аддитивных технологий России в сторону промышленного оборудования наряду с тем, что общемировая тенденция уже имеет преимущественно ориентацию на услуги по 3D-печати. Формирование конкурентной среды на рынке предполагает создание частных центров аддитивных технологий для ключевых заказчиков определенной отрасли, а не только центров на базе ведущих отраслевых государственных корпораций и национальных исследовательских университетов. Такая тенденция начала набирать обороты. И эти центры

будут интегрироваться в энергетическую, нефтегазовую, судостроительную и медицинскую отрасли.

Проведение стандартизации и сертификации требует разработки национальных ГОСТов на аддитивные технологии, технических условий на производство порошков, технологических регламентов и инструкций на изготовление изделий из материалов на конкретном отечественном оборудовании. Для ускорения внедрения инноваций в рамках реализации «Стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года» предполагается идти по двум направлениям:

- формировать нормативную базу сертификации и стандартизации для внедрения аддитивных технологий в производственные процессы;

- формировать нормативную базу для контроля качества и приемки продукции и материалов, изготовленных с применением аддитивных технологий.

Кадровый голод — главный тормоз развития аддитивных технологий. Новые компетенции должны прививаться в рамках массовой подготовки не просто операторов принтеров, а инженеров-конструкторов по реверс-инжинирингу и топологической оптимизации изделий, инженеров-технологов, инженеров по стандартизации, инженеров-исследователей. При этом необходимо в рамках сетевых образовательных программ проводить обучение в региональных учебных заведениях и создавать центры компетенций на периферии для повсеместного внедрения аддитивных технологий. ■

Использована фотография изделия, выращенного на оборудовании АО «Лазерные системы» Самарским университетом им. академика С.П. Королева

→ 3 СЕНТЯБРЯ → САНКТ-ПЕТЕРБУРГ → БРУСНИЦЫН ХОЛЛ

Аддитивный форум Северной столицы

Технологии 3D-печати
в серийном производстве:
опыт и экономика внедрения



← РЕГИСТРИРУЙТЕСЬ!

Инновационные материалы для 3D-печати металлами

Алексей Васильев

Аддитивные технологии уже прошли тот этап в своем развитии, когда они использовались только для изготовления опытных образцов изделий. Все чаще они применяются для серийного производства. Если говорить о 3D-печати металлами, то получающиеся в итоге детали по прочности и многим другим параметрам часто превосходят аналоги, изготавливаемые традиционным способом. Но для 3D-печати необходимы сплавы с особыми свойствами. С одной стороны, перед металлургами стоит задача создания сплавов, пригодных для 3D-печати, которые по своим свойствам соответствовали бы привычным для конструкторов сплавам, применяемым в традиционных процессах обработки. В частности, это позволяет изготавливать запасные части для техники, которые невозможно из-за санкций получить от официального производителя. С другой стороны, аддитивные технологии открывают новые возможности, неведомые для ранее использовавшихся способов обработки. И для этого нужно создавать принципиально новые сплавы, которые уже не имеют аналогов в прошлом.

Формы выпуска

Наиболее распространенными технологиями 3D-печати металлом сейчас являются SLM, SLS, EBM, DMD, MBJ. Все перечисленные технологии работают с металлическими порошками.

Порошки для всех вариантов 3D-печати обязательно должны обладать следующим набором параметров:

- сферическая форма частиц, что необходимо для равномерного распределения порошка в системе подачи материала;

- хорошая текучесть, благодаря чему порошок легко распределяется по платформе построения;

- соответствие фракционного состава (по диаметру частиц) требованиям, которые предъявляет производитель принтера.

Технология SLM предусматривает селективное сплавление металла лазером. Результатом печати является монолитный предмет (рис. 1). В этой технологии используются однородные металлические порошки. Возможно применение некоторых материалов, которые изначально разрабатывались для порошковой металлургии, а не для 3D-печати.

SLS — селективное лазерное спекание. Использование однородного порошка возможно только для легкоплавких металлов. Обычно в 3D-принтер загружается порошок, представляющий собой смесь частиц основного металла и частиц легкоплавкого металла, которые выполняют связующую функцию. SLS-принтер дешевле, чем SLM, но получаемые детали характеризуются более высоким уровнем пористости.

EBM — это технология, при которой частицы металла селективно сплавляются потоком электронов. Порошок однородный, как и при SLM, но возможна работа с порошками более тугоплавких металлов.

DMD — прямое лазерное выращивание. Процесс заключается в послойном наплавлении с использованием лазера. Особенностью является быстрое охлаждение металла, что для некоторых сплавов может приводить к деформации и даже растрескиванию. Поэтому применительно к DMD лучше использовать специально предназначенные для этой технологии металлические порошки.

MBJ — нанесение связующего материала на слой однородного металлического порошка. Из полученной заготовки посредством нагрева потом удаляют связующий материал, затем заготовка отправляется в печь, где металлические частицы спекаются. Преимущества — высокая скорость и относительно низкие требования к качеству металлического порошка. Недостаток — усадка деталей при обработке в печи. Для некоторых сплавов, в основном тугоплавких, данная технология не подходит.

Проволока применяется для 3D-печати крупных объектов. Она позволяет повысить скорость изготовления детали по сравнению с использованием порошков. Наиболее известны две такие технологии. WAAM — послойное наплавление металла посредством дуговой сварки в атмосфере инертного газа. EBAM — разновидность технологии EBM, но вместо порошка используется проволока.

Стоимость 1 кг проволоки для 3D-печати может быть на порядок меньше, чем стоимость 1 кг порошка из того же металла. В 3D-печати, даже если применяется технология WAAM, не всегда можно использовать проволоку для обычной сварки, предпочтительно использовать проволоку для наплавки.

Недостатком 3D-печати металлом с использованием проволоки является более сложная и громоздкая конструкция принтера. К тому же в результате печати получается заготовка, требующая дополнительной механической обработки. Именно по этой причине 3D-принтеры,



Рис. 1. Примеры изделий, изготовленных по технологии SLM из нержавеющей стали

работающие с проволокой, пока не получили широкого распространения, занимая лишь определенную нишу на рынке.

Недавно появилась технология μ -WAAM, в которой диаметр проволоки составляет 0,25 мм (в обычной WAAM используется проволока толщиной 0,6–2 мм). Эта технология позволяет уменьшить размеры 3D-принтера и упростить его обслуживание. Но пока принтеры на основе μ -WAAM серийно не производятся.

FDM-печать металлом

Самым распространенным типом 3D-принтеров являются FDM, из-за низкой цены и простоты использования они широко используются в быту. Принцип работы таких устройств заключается в изготовлении предметов посредством послойного наплавления пластика.

Недавно был предложен способ печатать металлом на таких принтерах. В пластиковый филамент добавляются частицы металла, но в большей концентрации, чем это нужно для декоративного эффекта. Данным материалом печатается заготовка, потом она помещается в растворитель, который удаляет пластик. Затем обработанная таким образом заготовка помещается в печь, где происходит спекание. Китайские производители уже наладили выпуск филаментов, реализующих FDM-печать металлом.

Отдаленно напоминает технологию MBJ, тем не менее концентрация частиц металла в заготовке оказывается меньше. В итоге получаем сложно предсказуемую усадку изделия при спекании, а также меньшую прочность по сравнению с MBJ. По мнению автора статьи, FDM-печать металлом на данном этапе своего развития может использоваться только для любительского применения. Далее в обзоре мы ее рассматривать не будем.

Алюминиевые сплавы

До недавнего времени основным сплавом, который использовался для 3D-печати алюминием, был PC-300. Если сравнивать со сплавами для литья, то ближайшим аналогом является силумин со всеми его преимуществами и недостатками. Детали, которые должны выдерживать высокие температуры, печатали алюминиевым сплавом PC-390, выдерживающим температуру до +250 °C.

Сейчас российская компания «РУСАЛ» продвигает на рынок новую линейку сплавов, специально предназначенных для 3D-печати (рис. 2). Их ассортимент позволяет закрыть основные потребности отраслей, где используется 3D-печать алюминием.

PC-320 — прочный сплав, оптимизированный для SLS.

PC-390 — сплав, выдерживающий температуру до +350 °C, оптимизирован для SLS.

PC-355 — сплав с пониженным коэффициентом температурного расширения. Не склонен к образованию температурных трещин, поэтому, по оценке автора статьи, пригоден для DMD.

PC-333 — отличительной особенностью данного сплава является повышенная теплопроводность. Предназначен для 3D-печати радиаторов теплоотводов.

Разработан сплав PC-553 с добавлением скандия, что придает материалу повышенную прочность и устойчивость к образованию температурных трещин.

В НИТУ МИСИС создан инновационный сплав для 3D-печати, отличающийся высокой прочностью. В основе его силумин, который легировали наночастицами карбида вольфрама.

Ученые Массачусетского технологического института создали алюминиевый сплав для 3D-печати, способный выдерживать температуру +400 °C на протяжении восьми часов. Его состав был разработан с примене-



Рис. 2. Алюминиевый порошок для 3D-печати производства компании «РУСАЛ» и изготовленный из него кронштейн

нием искусственного интеллекта. Предполагается, что новый материал станет альтернативой титану в авиации и некоторых других применениях. Алюминий не только дешевле титана, но и примерно на 40% его легче. При этом удельная теплопроводность титана на порядок меньше, чем у алюминия.

Сплавы на основе меди

Существуют так называемые дисперсионно-твердеющие сплавы, высокая прочность которых определяется особой структурой расположения наночастиц. Но не все из них пригодны для 3D-печати. Исследования показали, что дисперсионно-твердеющий сплав CuNi2SiCr на основе меди с добавлением никеля, кремния и хрома оптимально подходит для аддитивных технологий. Прочность этого сплава намного выше, чем у чистой меди, при этом он обладает хорошей электропроводностью и отличными показателями по теплопроводности. Этот сплав все чаще используется в 3D-печати по технологии SLM для производства деталей, сочетающих в себе перечисленные свойства. Например, он подходит для изготовления контактов электрических переключателей большой мощности.

Если же нужна еще большая электропроводность, то для 3D-печати приспособили сплав меди, хрома и циркония C18150, ранее использовавшийся главным образом для изготовления сварочных электродов. Проводимость сплава C18150 достигает 90% от проводимости электротехнической меди при более высокой прочности. Оптимальной технологией 3D-печати для этого сплава является MBJ.

Избавление от ванадия

Чистый титан не используется для 3D-печати из-за низкой прочности. Наиболее распространенным тита-

новым сплавом для аддитивных технологий является Ti-6Al-4V. Известны и другие титановые сплавы для 3D-печати (например, TA15), но всех их объединяет наличие в составе ванадия. Этот компонент значительно увеличивает стоимость сплава. Материал благодаря ванадию становится прочнее, но механическая прочность неравномерна в разных направлениях.

Ученые из Мельбурнского технологического университета (Австралия) создали новый сплав на основе титана, в который не входит ванадий. Новый материал имеет более высокую прочность, чем Ti-6Al-4V, и при этом значительно его дешевле. Формула инновационного сплава Ti-O-Fe, т.е. в него входят титан, кислород и железо. При производстве сплава титан легируется небольшим (0,71%) количеством оксида железа Fe_2O_3 . Добавка изменяет структуру материала, делая его более прочным.

Магнитомягкие материалы

Тем не менее есть применение 3D-печати, где избежать использования ванадия пока не удается. Речь идет о печати магнитомягкими материалами.

Трансформаторы — вид электронных компонентов, который чаще всего производится мелкими партиями по индивидуальным спецификациям под заказ. Вполне логично использовать здесь 3D-печать, в частности, для изготовления сердечников.

Материалы, из которых производятся сердечники трансформаторов, относятся к категории магнитомягких. Отличительная особенность — они обладают свойствами ферромагнетика или ферримангнетика, причем их коэрцитивная сила по индукции составляет не более 4 кА/м. Они имеют высокую магнитную проницаемость, а также малые потери на гистерезис, из-за чего и нашли применение в трансформаторах.

Печать магнитомягкими материалами — новое направление в аддитивных технологиях. Для этого пригоден, например, сплав железа и кобальта. Но такой материал очень хрупкий и у него хорошая проводимость, что для сердечника трансформатора увеличивает потери на вихревые токи Фуко. Чтобы сделать сплав более прочным, в него добавляют 2% ванадия. Помимо увеличения прочности ванадий снижает проводимость до приемлемого значения. Печать осуществляется по технологии SLM или SLS. Напечатанную на принтере деталь подвергают термической обработке для получения определенной внутренней структуры. Сначала идет предварительная фаза отжига при + 700 °C в течение 2 часов, затем следует первичный отжиг при + 820 °C в течение 10 часов.

Сплав FeCoV представляет собой некий компромисс между характеристиками и возможностью использования в 3D-печати. Для изготовления сердечников трансформаторов традиционным способом используют более совершенные сплавы. Но изготовление трансформатора точно под особенности данного проекта позволяет в итоге обеспечить более высокие технические характеристики всей системы.

Российские производители материалов для 3D-печати металлом (по данным из открытых источников)

Производитель	Материалы	Формы выпуска
ПАО «Ашинский металлургический завод»	железо, кобальт, никель, медь, жаропрочные сплавы	порошок
ФГУП «НИЦ «Курчатовский Институт» – ВИАМ»	железо, алюминий, титан, никель, кобальт	порошок
ООО «Гранком»	нержавеющая сталь, быстрорежущая сталь, инструментальная сталь, титан, жаропрочные сплавы	порошок
АО «Композит»	титан, никель	порошок
АО «Опытный завод Микрон»	нержавеющая сталь, никелевые сплавы, титановые сплавы, алюминиевые сплавы	порошок (фракции под DMD, SLM, EBM, SLS технологии)
ООО «Модуль-Т»	титан титан	проволока порошок
ООО «Нормин»	титан	порошок
АО «Полема»	нержавеющая сталь, жаропрочная сталь, медь, вольфрам, кобальт, молибден	порошок
ООО «РегионПром»	титан титан	проволока порошок
ООО «НПО «Центротех» («Росатом»)	нержавеющая сталь	порошок
АО «ЧМЗ» («Росатом»)	титан титан	проволока порошок
ПАО «Русал»	алюминий	порошок
ООО «НПО «РусРедМет»	сталь, нержавеющая сталь, жаропрочная сталь, титан, сплав кобальта с хромом	порошок
ПАО «Северсталь»	нержавеющая сталь	порошок
АО «Ступинская металлургическая компания»	жаропрочные сплавы на основе никеля и кобальта, титановые простые и сложнелегированные сплавы, коррозионно-стойкие стали, железоникелевые сплавы, иностранные сплавы	сферические гранулы фракций от 15–45 мкм, 20–63 мкм, 40–100 мкм и выше для любых видов 3D-печати и ГИП
ООО «СфераМ»	железо, алюминий, медь, никель, кобальт	порошок

Производство материалов в России

Отечественные производители материалов для 3D-печати металлом приведены в таблице. В основном у нас производят металлические порошки. Обращает на себя внимание, что российские компании выпускают специально для 3D-печати проволокой только расходные материалы из титана.

Но в России выпускается проволока для наплавления, она используется для восстановления инструментов и деталей оборудования. Это тоже одна из разновидностей аддитивных технологий. Изготавливается данная проволока в основном из нержавеющей, жаропрочной или высокопрочной стали. Производит ее, например, ООО «Завод сварочных материалов». Теоретически проволока для наплавления может быть использована и для 3D-печати, в каждом конкретном случае вопрос о ее применении решают специалисты.

Выводы

3D-печать деталей из нержавеющей стали и особенно титана уже сейчас оказывается зачастую более выгодной, чем их изготовление традиционным способом. Не удивительно, что именно эти материалы для адди-

тивных технологий производятся на многих российских предприятиях.

В современных условиях помимо реверс-инжиниринга у 3D-печати есть еще одна важная функция. Она восстанавливает производственные цепочки, разрушенные в предыдущие годы, например, в авиационной промышленности. Если восстанавливать производство, то уже на новой основе. Здесь важны сплавы на основе алюминия. И в нашей стране не только освоили их производство в виде порошков для 3D-печати, но еще и разрабатывают новые составы.

Гораздо реже встречаются отечественные производители порошков из медных сплавов. Порошки магнитных материалов специально для 3D-печати у нас пока не выпускают. Медь и сплав кобальта с железом по-настоящему будут востребованы, когда решат текущие проблемы импортозамещения и промышленность возьмется за инновационные проекты с высоким экспортным потенциалом. Главное, что для этих материалов уже имеются принтеры отечественного производства, которые сейчас работают с другими металлами. Да и установки, изготавливающие металлические частицы определенного размера, способны работать с несколькими материалами. Дело лишь за появлением спроса на 3D-печать принципиально новых продуктов. ■

Аддитивные технологии для решения промышленных задач

26-я международная выставка «Металлообработка-2026», организованная АО «Экспоцентр» при поддержке Минпромторга РФ и проходившая впервые в МВЦ «Крокус Экспо», уже традиционно содержала масштабный раздел аддитивных технологий.

Как подчеркнула исполнительный директор Ассоциации развития аддитивных технологий (АРАТ) Ольга Оспенникова: «В этом году выставочная экспозиция аддитивного кластера соседствовала с оборудованием для металлообработки, ЧПУ-центрами, роботизированными комплексами и сварочными постами. И это, несомненно, положительный тренд: аддитивные технологии и в реальном секторе промышленности активно интегрируются в производственные и технологические линии предприятий».

Стенды большинства компаний были компактно расположены в рамках коллективных экспозиций АРАТ и консорциума АТЛАС в павильоне 1–1, а также в павильоне 2–8, что, несомненно, в рамках такой большой выставки было удобно для посетителей.

Оборудование

Из оборудования прежде всего демонстрировались 3D-принтеры, работающие по SLM-технологии. Линейка оборудования была представлена на стенде **бизнес-направления «Росатом»**. В этом году компанией выпущена на рынок новейшая малогабаритная система — 3D-принтер RusMelt 150M с камерой построения до 150 мм, задача которого значительно снизить порог входа в металлическую 3D-печать для предприятий и инженерных центров.

Новинки **компании «ОНСИНТ»** — новая станция просеивания в инертно-газовой среде: с виброситом, ультразвуком и определенным образом спроектирован-

ными контейнерами (рис. 2), а также новый SLM-принтер AM350-4 с рабочей зоной 450×450×400 мм, 4 лазерами в компактном размере (проходит в дверь, рис. 2). На выставке 3D-принтеры были показаны в работе: AM350-4 печатал детали газотурбинной тематики, на малом SLM-принтере AM 150 (рабочая зона 160×160 мм) осуществлялась печать бронзой.

На стенде **ООО «НПО «3Д-Интеграция»** демонстрировалась SLM-система AMT-32 (рис. 3). Ее преимущества отражают тенденции развития данной группы оборудования: усиленная система формирования защитной атмосферы с трехступенчатой фильтрацией и самоочищающимся фильтром; применение технологии динамической фокусировки лазера (позволяет сочетать высокую производительность за счет использования луча большого диаметра и высокую точность при минимальном диаметре луча); верхняя подача порошка, которая упрощает загрузку материала и дает возможность дозагружать его в процессе печати без остановки и разгерметизации камеры. Серия AMT включает 4 машины с камерами построения от 160×250 мм до 600×600×600 мм. В принтерах устанавливаются системы сплавления с 1, 2 и 4 лазерами. Печать осуществляется сплавами титана, алюминия, никеля, кобальт-хрома, инконеля, жаропрочными и нержавеющими сталями. О технологиях, оборудовании и интересных образцах печати представителю редакции подробно рассказал Дмитрий Лобачёв, ассистент руководителя проектов. Спасибо, Дмитрий, за отличную работу со СМИ!



Рис. 1



Рис. 2



Рис. 3



Рис. 4



Рис. 5

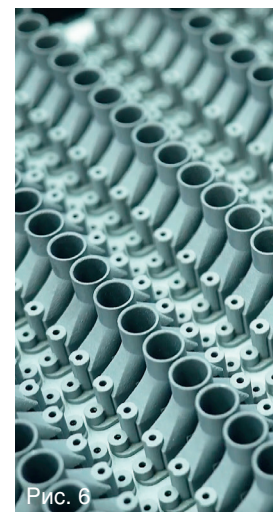


Рис. 6

Компания «Лазеры и аппаратура ТМ» показала SLM-принтер серии МЛ6 и питатель порошка для DMD-технологии (рис. 4). Компания производит SLM-оборудование с зонами построения 100×100, 250×250, 400×400.

АО «Лазерные системы» представило масштабную экспозицию — четыре работающих SLM-принтера собственного производства, от небольшого до промышленных, в том числе крупногабаритной печати M-450-L с зоной построения 500×500 мм и 4 лазерами (рис. 5) и наиболее продаваемый M-450-M с полем построения 350×350×350 мм и 2 лазерами. Компанией организован ЦАТ на базе собственного оборудования, где серийно выпускаются изделия для различных отраслей (интересная экспозиция деталей была представлена на стенде — рис. 6).

На стенде «3Д Вижн Дистрибьюшен» были показаны российская SLM-установка PrintLine3D M260 (область построения — 260×260×390 мм) и российская промышленная двухэкструдерная установка для послойного наплавления инженерных и конструкционных пластиков — Objectronics Vision F300 (область построения 300×300×300 мм) — подходит для производства функциональных прототипов и конечных изделий средних размеров (рис. 7).



Рис. 7



Рис. 8



Рис. 9

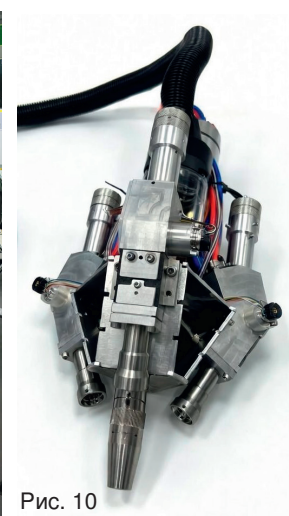


Рис. 10

Гости стенда ИЛИСТ СПбГМТУ могли ознакомиться с новейшей установкой прямого лазерного выращивания ИЛИСТ-S (рис. 8), обновленной высокопроизводительной установкой прямого лазерного выращивания ИЛИСТ-L (особенности: 6 осей робота, две оси позиционера, динамическое изменение диаметра лазерного пятна), а также с линейкой периферийного оборудования для металлических 3D-принтеров собственного производства, в т.ч. пылесосом для сбора порошка в SLM-принтере, установкой просеивания порошка (рис. 9).

Компания «Иксвелд» представила систему лазерной наплавки с новой лазерной головкой (рис. 10), а также анонсировала комплексы на базе отечественных роботоманипуляторов М13. Помимо аддитивного производства роботизированная платформа может применяться для сварки, наплавки и управления сложными технологическими процессами.

Задача проекта M-Shape — удешевить вход в мелкосерийное производство малого и среднего бизнеса. Компания занимается разработкой и производством материалов и оборудования для 3D-печати металлом, керамикой и инженерными пластиками. Особенность предлагаемого оборудования — оснащение шнековым экструдером для работы с MIM-гранулами. На выставке компания представила образец принтера, печатающе-

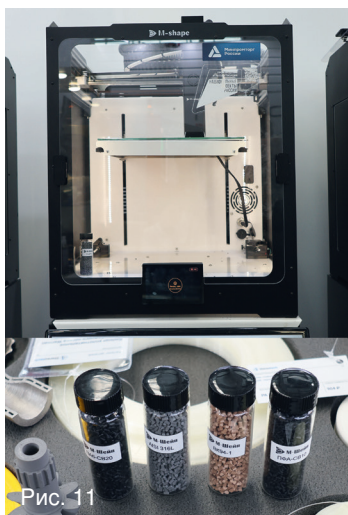


Рис. 11



Рис. 12



Рис. 13

го металлополимерной смесью (рис. 11). Как пояснил Максим Гудков, сооснователь и технический директор M-Shape, материал для печати металлами состоит на 91% из металла и на 9% из связующего. После того как изделие сформировано на 3D-принтере, оно помещается в печь, где связующее разлагается, а металлический порошок спекается, на выходе получается цельное металлическое изделие. Технология применима для 3D-печати алюминия, стали, титана, меди и вольфрама. Также она подходит и для керамики, только в этом случае металлический порошок заменяется на керамический. Для печати керамикой на рынке представлено не так много технологий, и они дорогие для мелкосерийного производства, поэтому компания видит высокий потенциал развития данного направления.

Еще хочется отметить оборудование, которое становится высоко востребованным по мере того, как 3D-печать металлами выходит на серийные выпуски. На стенде «A-TEX» представили систему очистки деталей от порошка TCB-100 компании TOP Additive (рис. 12). Данная серия установок предназначена для очистки сложных геометрических форм. Система имеет взрывозащищенную конструкцию, автоматическую систему управления, систему подачи инертного газа. Деталь можно вращать по двум осям на 360° для более эффективного удаления

порошка из внутренних полостей. Возможно программное и ручное управление поворотом детали. Для удаления порошка предусмотрен обдувочный пистолет и возможность подключения к вакуумному устройству.

Для аддитивных технологий особенно актуальны задачи качественной финишной постобработки, сглаживания внутренних каналов, полирования, удаления неровностей и доводки поверхностей деталей со сложной геометрией. Установка абразивно-экструзионного хонингования АЭХ/04 АО «Гидроабразив» (рис. 13) позволяет получить шероховатости до Ra 0,02, эффективно обрабатывать труднодоступные участки, которые сложно или невозможно довести традиционными методами.

Теперь о печати полимерами. На стенде компании «Стереотек» рассказали о новинках. Во-первых, на 5D-принтере собственного производства (технология FDM) была реализована непланарная печать (деталь покачивается, наклоняется в процессе печати, рис. 14). Это удобный режим с точки зрения подготовки к печати, слайсинга и самой печати. Он позволяет изготавливать деталь сложной формы без поддержек и для увеличения ее прочности укладывать нить филамента с взаимным пересечением. Вторая новинка реализована с китайскими партнерами: в недорогой китайский принтер был добавлен наклонно-поворотный модуль «Стереотек»,

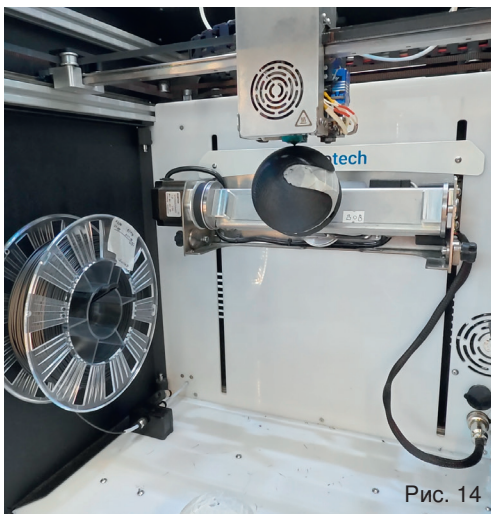


Рис. 14



Рис. 15

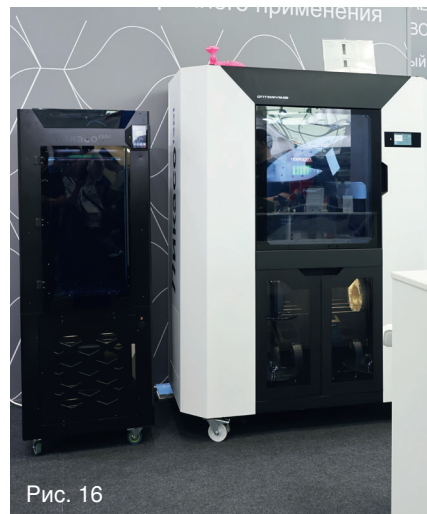


Рис. 16



Рис. 17



Рис. 18



Рис. 19

после чего он получил функционал изготовления тел вращения (демонстрировалась печать рабочего колеса насоса). Данное решение позволило сделать шаг в сторону клиента — увеличить зону построения и снизить цену востребованного оборудования. На другом принтере серии 540 демонстрировалась одновременная работа двух печатающих головок IDEX. Печать может идти в зеркальном режиме или в режиме копирования. В результате достигается двойная скорость. Оба принтера оборудованы активной термокамерой, обеспечивающей более стабильное течение процесса печати.

На стенде **компании «Ф2 Инновации»** посетители смогли в реальном времени оценить работу практически всего модельного ряда компании: FFF/FDM-3D-принтеров F2 Lite, F2 Kubo, F2 Quart и F2 Sparq, а также флагманского крупногабаритного FGF-3D-принтера F2 Gigantry (рис. 15), предназначенного для создания оснастки под выкладку и формование изделий из полимерных композиционных материалов. Все оборудование работало в режиме non-stop.

Новое оборудование от компании **«Пикасо 3Д»** — 3D-принтер из линейки «Первый» и обновленная профессиональная система 3D-печати Picaso 3D Optimum 600, ориентированная на производственные задачи и работу с инженерными материалами (рис. 16). Оборудование из линейки «Первый» показано впервые. Это система с открытой архитектурой и стандартизированными компонентами. Optimum 600 сочетает в себе двухсепельный принтер Picaso XL Pro S2 и интеллектуальную систему сушки и подачи пластика Dryer. Зона построения принтера 400×600×500 мм.

Компания Z-axis впервые в России представила публике две новинки аддитивного оборудования: FGF-3D-принтер King FGF800 и начальную модель линейки INTAMSYS — высокотемпературный FDM-принтер Funmat 310 Neo.

На выставке также было показано оборудование для изготовления песчано-полимерных литейных форм по технологии Binder Jetting (BJ). Ключевым экспонатом стенда **AVP ZIAS** стал промышленный 3D-принтер ZIAS BPrint Maxi. Другая линейка компании — печать восков для точного литья по выплавляемым моделям. Кроме того, на стенде были продемонстрированы образцы готовой продукции: сложные песчаные формы и стержни для литья, а также высокоточные формы из полиметилметакрилата. Вниманием посетителей пользовались и малые

архитектурные формы, изготовленные из кварцевого песка, пропитанного композитом. Фигуры покрашены и покрыты лаком. Данные архитектурные формы могут использоваться для выставок, благоустройства и т.д.

Компания «Роботех» также показала установку для печати песчано-полимерных литейных форм по технологии Binder Jetting — промышленный 3D-принтер Robotech SandMax 1200 (рис. 18) и образцы напечатанных форм. На рис. 19 представлена форма для изготовления рабочего колеса.

Образцы 3D-печати

Отличительной особенностью выставочной экспозиции стали многочисленные образцы, выполненные по различным аддитивным технологиям. Буквально несколько примеров.

На стенде **АО «ЦАТ»** среди многочисленных изделий привлекал особое внимание макет двигателя GD-10M для энергетической установки, представленный в масштабе 5:1. ЦАТ, в частности, производит для него с помощью АТ завихритель (рис. 20) — деталь массой около тридцати одного килограмма, выполненную из специального жаропрочного сплава. С помощью АТ также были произведены представленные беспилотные аппараты: самолетного типа «Птица» и «Перехватчик».

Целый ряд компаний показал свои возможности при изготовлении серийной продукции. В частности, на стенде **«Биоград» (3DLAM)** были показаны опытные образцы печати элементов турбореактивных двигателей, выполненные на новом принтере компании с зоной построения 300×400 мм. В этом году также запланирован выпуск машины с зоной построения 500×500 мм.

На стенде **«НПО «3Д-Интеграция»** было особенно интересно, поскольку демонстрировались возможности печати сразу нескольких технологий: EBM (на рис. 22 показан суставный имплантат, в отличие от SLM технология позволяет печатать в несколько слоев), SLM, SLS, промышленная SLA, MJB (корпус клапана, материал 316L — рис. 23), FDM, BJ и др.

На стенде компании **«ОНСИНТ»** демонстрировались завихрители для газотурбинной установки (61 шт. на платформе 350×350 мм, материал: ВЖ 159), клапан (материал: титан), радиатор (материал: бронза) и другие. Изделие «коллектор» (материал: нержавеющая сталь), спроектированное с помощью искусственного интеллек-

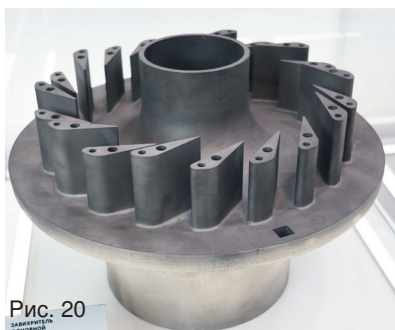


Рис. 20



Рис. 21



Рис. 22



Рис. 23



Рис. 24



Рис. 25



Рис. 27



Рис. 26

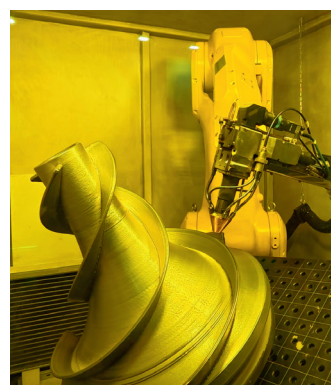


Рис. 24

та, не только было выполнено в соответствии с принципами бионического дизайна, но и с обеспечением технологичности изготовления (рис. 24). Форма отверстий в виде капли, предложенная ИИ, позволила осуществить печать без поддержек.

На стенде ГК «Иннфокус» рассказали о выходе новой версии собственного программного обеспечения Reditive Compensation 2.0 с расширенным функционалом для расчета предеформаций, а также представили образцы, выполненные по технологиям SLM, MBJ (рис. 25 — из карбида кремния), WAAM, FDM и FGF.

ИЛИСТ СПБГМУ представил возможности печати по технологии прямого лазерного выращивания (рис. 26).

На стенде **ООО «Инфаб»** привлекал внимание высокий кронштейн (используется в аэрокосмической отрасли) из титанового сплава размером 500×200×2350 мм, выполненный на установке BLT-B825S, время изготовления 500 часов, вес 27 кг (рис. 27).

Интересные образцы также демонстрировались на стендах АО «Лазерные системы», Аддитивного центра Syncam, НИИПМ Обуховского завода, НПК «ТЭТА», НИТУ МИСИС, ФГАОУ ВО «Самарский университет им. академика С.П. Королева» и др.

Материалы

Актуальность развития материалов для аддитивного производства обусловлена переходом отрасли от этапа прототипирования к полноценному серийному и промышленному производству. Ключевые драйверы этого процесса — масштабирование технологий и рост требований к свойствам изделий. На выставке направление было представлено лишь несколькими компаниями: ООО «НДМ», ГК «Гранком», «Русал», бизнес-направления «Росатома», «РЭК» и др.

Установку плазменной атомизации собственного производства демонстрировали на стенде **ООО «НДМ»** (рис. 28). Оборудование отличается оригинальной конструкцией, малыми габаритами, системой рекуперации аргона в базовой комплектации, уникальным плазмотроном с расходуемым катодом — проволокой. Установка позволяет получать сферические порошки с выходом фракции 10–63 мкм до 70% масс.

На стенде **ООО «Гранком»** показывали современные разработки в области порошковой металлургии (производитель широкой гаммы металлических порошков — ООО «Гранком», рис. 29), а также изделия, выполненные методами SLM и DED из собственных порошков (производитель — дочернее предприятие «Гранпринт»). Оба направления динамично развиваются. Из новых материалов на стенде отметили алюминиевый порошок ВАС 1 и медные порошки.

На стенде **компании «РЭК»** можно было ознакомиться с новыми филаментами и линейкой гранулированных композиционных материалов. Самый новый материал — PETG CF — выпускается в двух вариантах: с 5% и 30% наполнением. При 30% наполнении это уже ESD-материал, который можно использовать для производства корпусов, поскольку он токопроводящий и не накапливает статику. При 5% наполнении получается высокое



Рис. 28

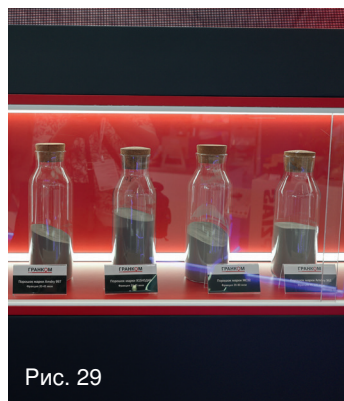


Рис. 29

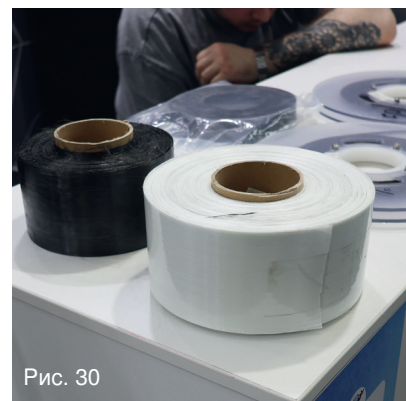


Рис. 30

качество поверхности, изделие выглядит как готовое, законченное. Плюс к этому оно обладает УФ-стойкостью, соответственно, его можно использовать на улице, чего раньше у PETG не было. Единственное ограничение остается только по температурной эксплуатации. Также в этом году на выставке из новых материалов показали: UD-ленты для выкладки (белая — из полипропилена со стекловолокном, черная — из PEEK с углеволокном — рис. 30), порошки для SLS-технологии (компания стала эксклюзивным дистрибьютором компании Kings), гранулы собственного производства, которые можно использовать как для литья, так и для печати на крупноформатных 3D-принтерах, и гранулы с длинным волокном, из которых можно лить максимально прочные изделия, причем прочные во всех плоскостях.

Сканеры

В связи с растущей ролью реверс-инжиниринга и переходом к цифровому производству наблюдается устойчивый рост востребованности 3D-сканеров. Эти устройства становятся неотъемлемым инструментом для предприятий, стремящихся ускорить разработку новых изделий, восстановить документацию на устаревшее оборудование или проконтролировать качество продукции. Данное направление было также представлено на выставке.

На стенде «НПО «ЗД-Интеграция» демонстрировали сканирование различных моделей, в том числе мотоцикла «Урал» (рис. 31). Компания является поставщиком 3D-сканеров нескольких известных брендов.

Группа «Кваливэд» с 2026 года является официальным представителем в России китайских брендов Scanology и 3DeVOK (рис. 32). Scanology позиционируется как решение метрологического класса, обеспечивающее измерение с точностью до микронного уровня в критических зонах допуска. 3DeVOK предназначен для задач профессионального обратного проектирования, где требования к точности допусков менее жесткие. Флагманом линейки Scanology считается универсальный беспроводной сканер KSCAN-E: точность, достаточная для контроля крупногабаритных лопаток, высочайшая детализация, адаптивная фотограмметрия и несколько режимов сканирования позволяют работать с деталями широкого диапазона. В последнее время стандартом для производства становится поставка автоматизированных решений. «Кваливэд» поставляет оптические автоматизированные измерительные станции, полностью готовые к работе. Это экосистема с коллаборативным манипулятором, поворотным столом, автоматизированной стойкой для трека и одним из сканеров Scanology, управляемым через ПО DefinSight-Automation.

Компания «ЗД Вижн Дистрибьюшен» работает с передовыми производителями промышленных метрологических сканеров, предлагающими высочайшую точность для самых требовательных инженерных и контрольных задач. На выставке была представлена широкая линейка сканеров и оптических координатно-измерительных систем ScanLine. Самое точное из представленных устройств — ScanLine StaticScan Q12 (рис. 33). Устройство оснащено четырьмя камерами по 12,3 Мп и синей светодиодной подсветкой, что обеспечивает прецизионную точность



Рис. 31



Рис. 32



Рис. 33. Фото: 3D Vision



Рис. 34. Фото: «Ф2 Инновации»



Рис. 35



Рис. 36

до 0,004 мм. Сканер интегрируется с интеллектуальной системой контроля геометрии, обеспечивая комплексную автоматизацию процессов.

ГК «Диполь» в этом году позиционировала себя как создателя Центра аддитивных технологий (ЦАТ). В экспозиции были задействованы 3D-принтер EP-M150 Pro и 3D-сканеры «Диполь Блик». На стенде демонстрировался процесс реверс-инжиниринга автомобиля Nissan Silvia.

Устройства для сканирования были представлены и на других стендах.

Услуги

Особенно хочется отметить рост количества компаний, которые предоставляют услуги 3D-печати. Это производители оборудования (АО «Лазерные системы», «НПО «ЗД-Интеграция» и др.), производители материалов (ООО «Гранком»), дилеры оборудования (ГК «Диполь» и др.), ЦАТ корпораций (АО «ЦАТ», ЦАТ ГК «Росатом» и др.), ЦАТ при вузах, частные центры («Металл-Спринт» и др.). Их создание знаменует переход от разрозненного использования 3D-принтеров к формированию полноценной, масштабируемой производственной экосистемы.

Специализированная экспозиция пользовалась большим интересом посетителей, в том числе организованных делегаций: от Минпромторга во главе с заместителем главы Минпромторга России Михаилом Ивановым (рис. 34), вузов и др.

Деловая программа

Тематическая деловая программа, собиравшая полные залы, включила целый ряд сессий: «Инновационные технологии и современные материалы для 3D-печати» (организаторы: АПАТ, АО «Экспоцентр»), «Аддитивные технологии и автоматизация как фактор роста производительности труда» (организаторы: АПАТ, АО «Экспоцентр»), «Подготовка профессиональных кадров». Сессия «Перспективы развития аддитивных технологий: инновации, возможности и вызовы будущего» (организаторы: Минпромторг России, ФГУП «ЦРП», АПАТ, АТЛас, АО «Экспоцентр») открылась выступлением Руслана Ахмедова, начальника отдела Департамента стан-

костроения и тяжелого машиностроения Минпромторга России, который напомнил о существовании комплекса мер государственной поддержки для производителей аддитивного оборудования и заинтересованности государства в развитии отрасли.

Важными событиями деловой программы стали подписания стратегических соглашений о сотрудничестве в сфере развития и внедрения аддитивных технологий, что говорит о консолидации сил в отрасли. Ассоциация развития аддитивных технологий подписала четыре соглашения с Алюминиевой ассоциацией, Ассоциацией производителей редких и редкоземельных металлов, Национальным объединением производителей стройматериалов, а также с Особой экономической зоной «Иннополис». Стороны договорились совместно развивать 3D-печать из алюминия и редкоземельных металлов, внедрять строительную 3D-печать, совместно работать над созданием нормативной базы, а также искать пути кооперации и взаимодействия для участников соглашений.

АО «ЦАТ» подписало соглашения о сотрудничестве с компаниями ООО «НПО «ЗД-Интеграция» (группа компаний «Ай 3Д») и НПЦ «Лазеры и Аппаратура» (рис. 37, 38). Для формирования единой технологической платформы АО «ЦАТ» создает конкурентную среду среди отечественных разработчиков, что позволит выбрать наиболее гибкие и выгодные технические решения. Кроме того, платформа охватит и другие направления 3D-печати, в том числе производство керамических и полимерных изделий совместно с компанией «ReTex». Роль АО «ЦАТ» в данном проекте состоит в статусе единого интегратора и основной площадки для апробации систем. На предприятии уже эксплуатируется оборудование «Лазеры и Аппаратура», а с «Росатомом» подписана дорожная карта по испытаниям их установок. Наряду с технологическими соглашениями АО «ЦАТ» заключило соглашение об индустриальном партнерстве с Московским государственным образовательным комплексом (МГОК) в сфере подготовки кадров для аддитивного производства.

Завершился блок деловой программы студенческим конкурсом перспективных проектов в аддитивных технологиях «Будущее отрасли: конкурс молодых ученых».



Рис. 37. Фото: АО «ЦАТ»



Рис. 38. Фото: АО «ЦАТ»

Студенты и молодые ученые ведущих вузов страны (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Уральский федеральный университет, Самарский университет, НИТУ МИСИС, СПбПУ, РТУ МИРЭА, СПбГМТУ) представили свои разработки и научные исследования в области 3D-печати, аддитивных технологий и новых материалов. По итогам конкурса лучшими работами были признаны:

- «Повышение механических характеристик материалов за счет получения биметаллических структур методом прямого лазерного выращивания», автор Алексеев Алексей из СПбГМТУ.
- «Исследование влияния режимов сканирования контуров на качество поверхности изделий, полученных методом СЛС», автор Вадим Хупутдинов из Самарского университета.
- Влияние частиц ZrN и AlN на формирование алюмоматричных композитов с помощью селективного плавления», автор Леонид Федоренко из НИТУ МИСИС.

От души поздравляем победителей и их наставников!

В итоге хочется отметить, что при всех существующих трудностях развития аддитивных технологий в России: барьерах внедрения, ограниченном рынке и высокой стоимости оборудования — прогресс наблюдается год от года. Выход на производство серийной продукции, позволяющий получить экономическую эффективность, освоение новых ниш и нахождение новых точек роста свидетельствуют об укреплении отрасли. Масштабирование центров аддитивных технологий, готовность к консолидации усилий со стороны различных структур и ведущих игроков, поддержка государства, внимание широкого круга потенциальных клиентов, несомненно, говорят о потенциале АТ и перспективах. Формирующиеся сегодня межотраслевые партнерства между разработчиками принтеров, производителями сырья и заказчиками позволяют закрывать полный производственный цикл внутри страны. Вектор развития задан, есть над чем работать, понятно, зачем работать. ■



Рис. 39. Фото: СПбГМТУ

Требование времени — практическая реализация инженерной инициативы



Индустрия аддитивного производства является относительно молодой и высокотехнологичной, что диктует специфические требования к специалистам. Работодатели зачастую ищут не просто операторов, а инженеров нового формата, способных решать нетривиальные проектные задачи, обладающих фундаментальными знаниями в области материаловедения, проектирования, в том числе с применением современных CAD/CAE-программ, а также навыками и опытом работы с оборудованием. Важны и личные качества: междисциплинарное мышление, склонность к анализу, обучаемость и адаптивность. Эти требования показывают, что подготовка специалистов в области аддитивных технологий должна становиться все более комплексной, практико-ориентированной и тесно связанной с реальными потребностями предприятий отрасли.

В Московском политехническом университете на кафедре «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» («ОМД и АТ») обучение по программе «Аддитивные технологии» было начато еще в 2014 году, соответственно, в этом году состоялся девятый выпуск бакалавров, желающих попробовать свои силы в области 3D-печати. И было очень интересно, с какими темами и

компетенциями будущие специалисты пришли к своей дипломной работе.

Например, проект Тимофея Баранова «Разработка методики проектирования и изготовления высокоточных СВЧ-волноводов с использованием аддитивных технологий» предполагал сравнительный анализ традиционного и современного производства СВЧ-волноводов, оригинальное решение в виде концептуальной структуры техпроцесса с помощью аналитических инструментов ТРИЗ (теория решения изобретательских задач), разработку техпроцесса по SLM-технологии, подбор материалов и режимов 3D-печати, технико-экономическое обоснование проекта и оценку его рентабельности. Проект Григория Аржанова, посвященный разработке нестандартной трубогибочной оснастки методом FDM-печати и реверс-инжиниринга, включал анализ существующих технологий изготовления оснастки, освоение методов обратного проектирования и получение цифровой модели ролика станка, разработку параметрической CAD-модели, обеспечивающей быстрое получение новых типоразмеров оснастки, выбор материала, изготовление опытных образцов, выполнение технико-экономического обоснования проекта, построение бизнес-модели про-



Рис. 1. Примеры выполненных изделий: художественные перила, инструмент для штамповки, контактное устройство для тестирования световодов, светильник, корпус для колонки, пульт для управления роботом

изводственного участка для изготовления оснастки и анализ инвестиционной эффективности решения.

По словам доцента кафедры «ОМД и АТ» Павла Петрова, подготовка студентов на современном этапе не должна быть узконаправленной, а должна обеспечивать комплекс знаний и навыков: «Грамотный инженер сегодня — это тот, кто может проанализировать задачу с разных сторон, предложить нестандартное решение и тем самым создать новое рыночное предложение, которое принесет компании конкурентное преимущество».

Студенты кафедры, применяя аддитивные технологии и методы ТРИЗ, разработали широкий спектр прикладных проектов. Среди них — концепция 3D-принтера с адаптивными габаритами, корпус для пульта управления роботами, элементы снаряжения дайвера, элементы штамповой оснастки, прототип системы для визуализации воздушного потока, проект участка аддитивного производства индивидуальных контактных устройств и оснастки для тестирования и использования микросхем, корпус для акустических колонок, новая концепция кофемашины.

Работы велись также по нескольким ключевым направлениям, где аддитивные технологии уже проявляют себя с максимальной эффективностью:

- Медицина. Студенты разрабатывали технологический процесс изготовления прототипов эндопротезов, проект участка для производства имплантатов для краниопластики, бытовые изделия для людей с ограниченными возможностями для их реабилитации.
- Дизайн и оформление интерьеров. Проекты включали создание и производство моделей картинных рам,

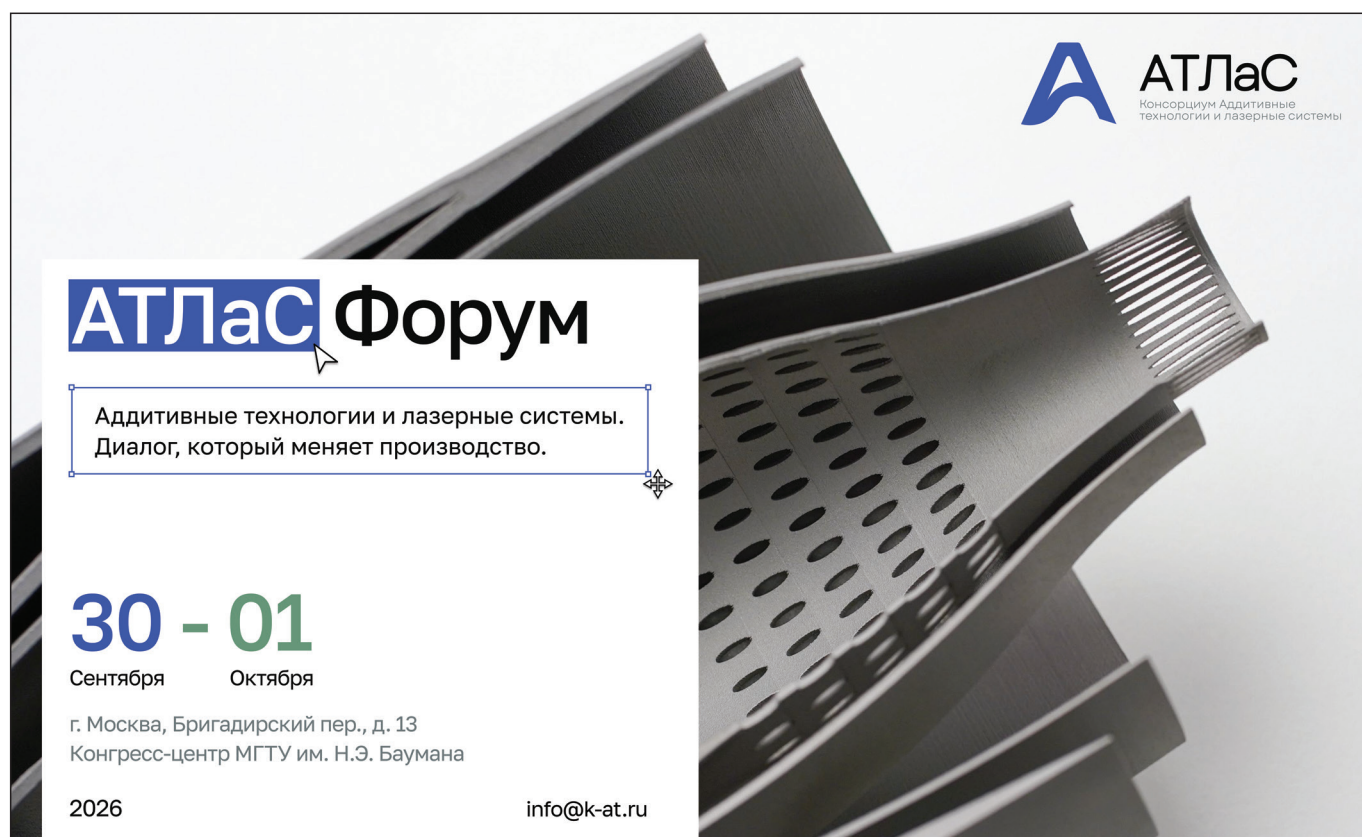
оригинального светильника и бизнес-модели его индивидуального производства, сложных художественных перил для лестниц.

Отдельно стояли темы по разработке режимов пост-обработки изделий из ТПУ-пластика и формированию учебного курса по проектированию изделий для аддитивного производства.

Анализ представленных на защите проектов позволяет отметить разноплановость решаемых студентами прикладных задач, актуальных для предприятий, на которых проходила преддипломная практика; фундаментальность подхода, когда проект прорабатывается от идеи, технологического и экономического обоснования до проектирования производственного участка и реализации готовой продукции. Важными результатами стали участие студентов в публикациях статей по итогам выполненных работ и высокие оценки от руководителей и промышленных партнеров — большинство студентов получили рекомендации для продолжения учебы в магистратуре. А внимание к задачам подготовки кадров для отрасли подчеркивалось онлайн-присутствием на защите дипломов специалистов отрасли.

Преподаватели кафедры внимательно следят за тенденциями развития в области аддитивных технологий и гибко реагируют на запросы, понимая, что постоянный поиск и внедрение новых педагогических средств и приемов в рамках проектно-ориентированного обучения являются залогом повышения эффективности образовательных программ и формирования у студентов высокого уровня профессиональных знаний и навыков. ■

Татьяна Карпова



АТЛас Консорциум Аддитивные технологии и лазерные системы

АТЛас Форум

Аддитивные технологии и лазерные системы.
Диалог, который меняет производство.

30 - 01
Сентября Октября

г. Москва, Бригадирский пер., д. 13
Конгресс-центр МГТУ им. Н.Э. Баумана

2026 info@k-at.ru

Реклама

Постобработка в аддитивных технологиях: от заготовки-полуфабриката до рабочего изделия



Евгений Бронщиков,
генеральный директор АО «Гидроабразив»

3D-печать металлом часто воспринимают как технологию, которая сразу выдаёт готовую деталь. На экране — сложная модель, в установке — лазер, порошок, послойное построение изделия, которое невозможно было бы изготовить традиционными способами. Однако многие ошибочно думают, что процесс заканчивается при выходе детали из принтера. На самом деле печать — всего лишь первый этап.

При всех преимуществах аддитивной печати у этой технологии есть серьёзный недостаток — поверхность изделий получается существенно шероховатой: Ra12-Ra20; чтобы снизить её до нужных значений Ra3,2 и ниже при сохранении геометрических размеров, необходимо затратить усилий в разы больше, чем сама печать.

После аддитивного производства деталь почти всегда требует постобработки, особенно если речь идёт не о демонстрационном образце, а о рабочем изделии: детали газотурбинного двигателя, элементе авиационной техники, медицинском компоненте, инструментальной оснастке, теплообменнике, форсунке или детали со сложными внутренними каналами.

Постобработка аддитивных деталей системно решает задачи получения качественного изделия: финишная обработка поверхности, очистка внутренних полостей, снижение шероховатости, удаление остатков порошка, обработка труднодоступных каналов и доводка изделий сложной формы до нужной шероховатости.

И если наружную поверхность изделия можно обработать механическим инструментом, то с внутренней поверхностью возникают большие сложности.

Структура внутренней поверхности аддитивного изделия:

- пересекающиеся каналы;
- сквозные отверстия сложной формы;
- охлаждающие полости;
- лабиринтные каналы;
- тонкие внутренние проходы;
- полости с остатками металлического порошка;
- участки с повышенной шероховатостью;
- микрозаусенцы и дефекты поверхности;

- зоны концентрации напряжений.

Обычный инструмент не сможет проникнуть и обработать внутренние полости. Нельзя взять шлифовальный круг и обработать внутренний канал сложной формы. Нельзя качественно отполировать скрытую полость. Нельзя гарантированно удалить остатки порошка из канала сложной геометрии продувкой либо промывкой.

Поэтому для таких задач применяются специальные технологии постобработки: абразивно-экструзионное хонингование, гидроабразивная прокатка, гидроабразивная обработка, электрохимия, ультразвук и другие методы финишной доводки.

Одна из ключевых технологий постобработки аддитивных изделий — абразивно-экструзионная обработка, или Abrasive Flow Machining (AFM).

Процесс абразивно-экструзионной обработки заключается в экструзии через обрабатываемую поверхность вязкоупругой пасты, наполненной абразивными зёрнами. Поток упругой абразивной среды под давлением прини-



Рис. 1. Установка абразивно-экструзионного хонингования АЭХ/4

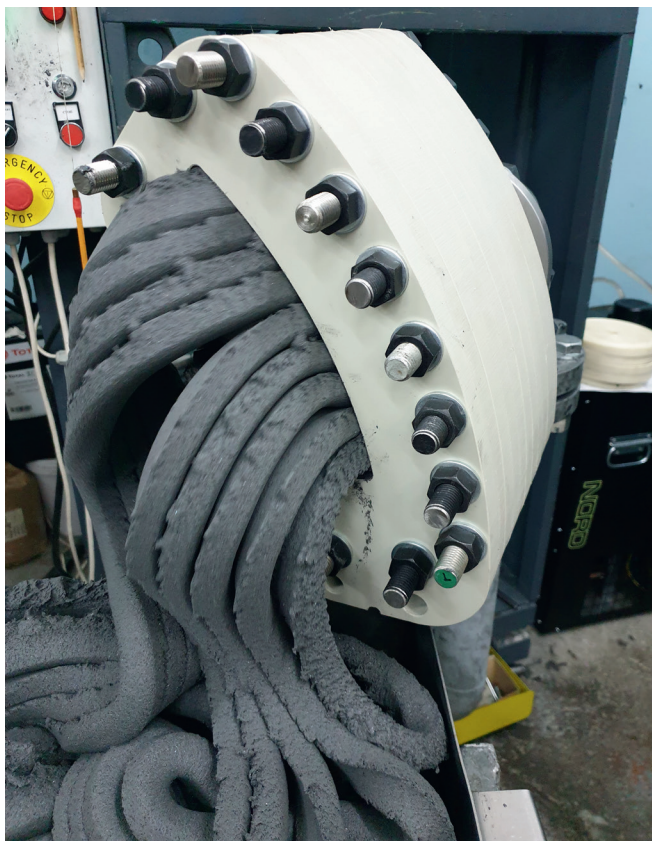


Рис. 2. Экструзионная обработка сегмента авиадвигателя

мает форму прокачиваемого канала либо плотно облегают обрабатываемое изделие, обеспечивая плотный контакт между обрабатываемой поверхностью и абразивными частицами, возникает процесс шлифования, хонингования.

Абразивно-экструзионное хонингование (АЭХ) аддитивных изделий решает сразу несколько задач:

1. Удаление остатков порошка и различных загрязнений, что особенно важно для внутренних каналов, где частицы порошка могут остаться и повлиять на работу изделия.

2. Снижение шероховатости. Поверхность после аддитивного производства часто имеет выраженный грубый микрорельеф. Для внешних поверхностей это вопрос внешнего вида и подготовки под покрытие, а для внутренних каналов — вопрос гидравлического сопротивления, ресурса и стабильности работы детали.

3. Ликвидация заусенцев, рисков, удаление дефектного поверхностного слоя. В местах повышенной нагрузки такие дефекты могут становиться центрами будущего растрескивания.

4. Формирование фасок нужного радиуса, плавных переходов переходных диаметров, скругление кромок отверстий.

Требования к снижению шероховатости аддитивных изделий по большей части укладываются в диапазон от $Ra\ 12$ до $Ra\ 3,2$, для проточной части турбин — $Ra\ 0,32$, форсунок — $Ra\ 0,1$.

Отсутствие теоретических основ процесса, разнообразие обрабатываемых изделий из различных материалов и конфигураций не даёт возможности вывести



Рис. 3. Процесс подачи пасты через изделие

математическую модель и произвести расчёты получаемых результатов. Однако благодаря целенаправленной работе, на основании многочисленных исследований в АО «Гидроабразив» разработана методология обработки с большей степенью вероятности получения необходимого результата (рис. 1–3). Определены зависимости необходимой вязкости абразивной среды от площади обрабатываемого канала, величины съёма основного материала, шероховатости материала, фракции, формы, концентрации абразива, давления гидравлики, количества циклов. Добиться существенного снижения шероховатости, вплоть до $Ra\ 0,02$, возможно за несколько этапов обработки, меняя пасту, регулируя давление и количество циклов.

Инструментом в установках АЭХ является абразивная паста (рис. 2), она имеет различную вязкость и упругость, наполнена абразивами из разных материалов и разной фракции в зависимости от требуемой задачи. Основа пасты состоит из вязкоупругого полимера, при этом вязкоупругий полимер выступает в качестве несущей среды, а абразивные частицы — в качестве режущего инструмента, который удаляет материал с заготовки.

Паста обладает необычными свойствами: упругость, абразивная способность, отсутствие адгезии к обрабатываемой поверхности, что позволяет её легко удалять из изделия. Вязкость пасты подбирается в зависимости от проходного сечения канала. Стойкость пасты составляет 100–200 час. рабочего времени, один цикл обработки — 5–10 мин. Установки АЭХ имеют замкнутый цикл кругооборота пасты (рис. 3). Одновременно могут обрабатываться несколько деталей, суммарная площадь каналов которых меньше либо равна площади выходного коллектора пасты. При непрерывной работе абразивная паста нагревается из-за процесса трения и может снижаться вязкость и соответственно производительность процесса, поэтому установки оснащены системами охлаждения пасты.

Особо важную роль для достижения заданного качества поверхности играет оснастка, назначение которой — направить пасту в нужный канал, обеспечить необходимую скорость потока.

Эндоскопический контроль внутренней поверхности после гидроабразивной прокачки

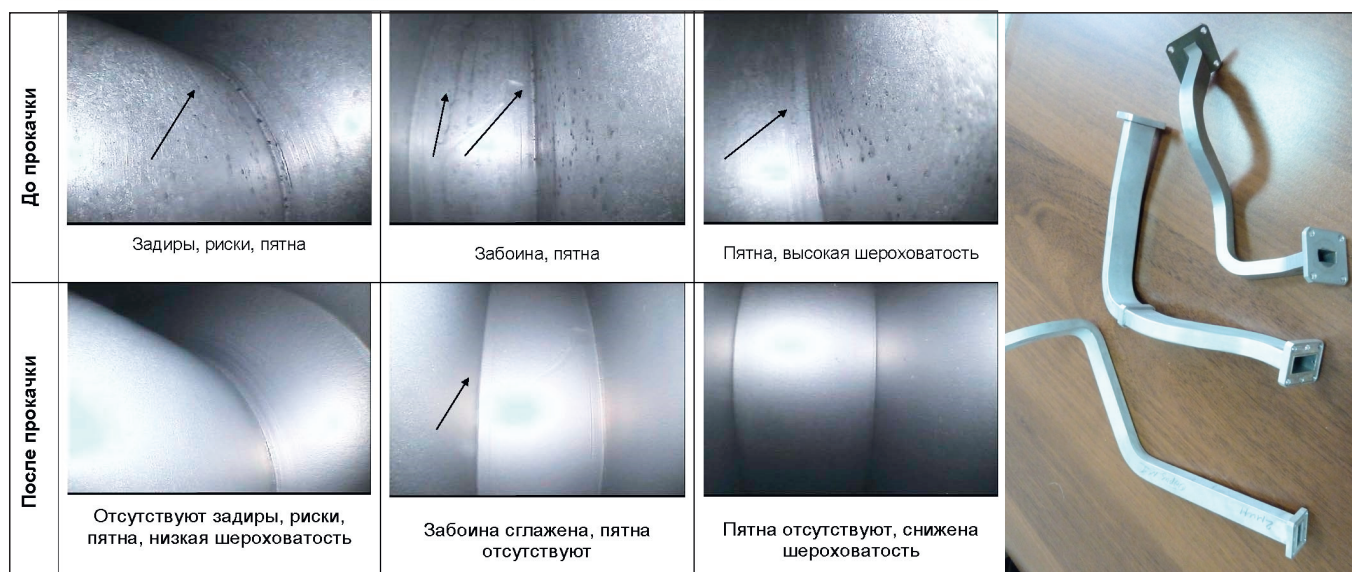


Рис. 4. Качество поверхности детали — волновода СВЧ после АЭХ

Аддитивные технологии дают инженерам свободу формы. Но сама по себе 3D-печать металлом не даёт готовую промышленную деталь — 3D-принтер создаёт геометрию, а постобработка делает деталь рабочей. Без этого этапа деталь не соответствует эксплуатационным требованиям.

Данная технология реализована в оборудовании абразивно-экструзионного хонингования АО «Гидро-

абразив» с однонаправленным и реверсивным движением абразивной пасты (рис. 5–7). Она помогает решать одну из самых сложных задач современной промышленной 3D-печати — финишную доводку поверхностей и внутренних каналов изделий сложной формы до желаемого результата, качества поверхности, точности и функциональности металлических изделий, изготовленных аддитивным способом. ■

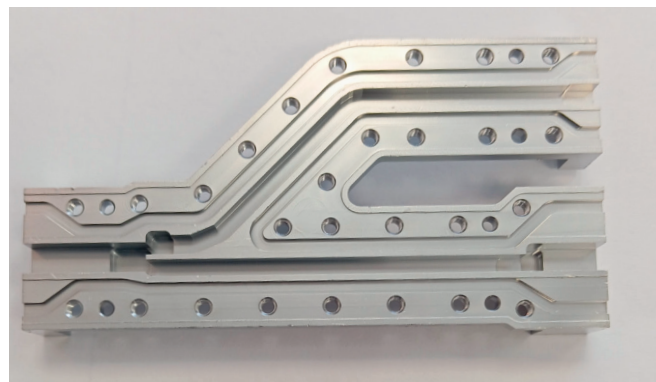
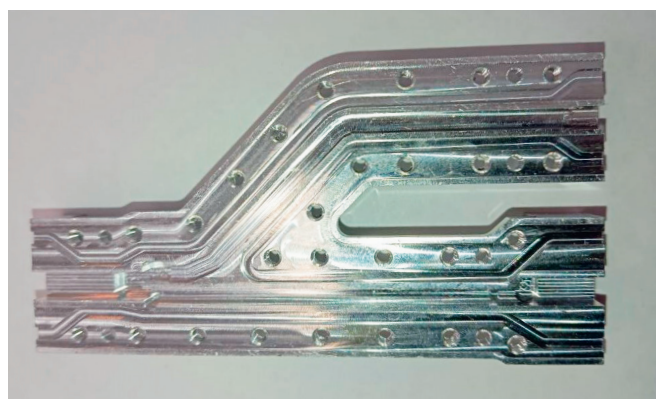


Рис. 5. Фрезерованная алюминиевая деталь, шероховатость каналов Ra 10 до и Ra 0,6 после обработки АЭХ

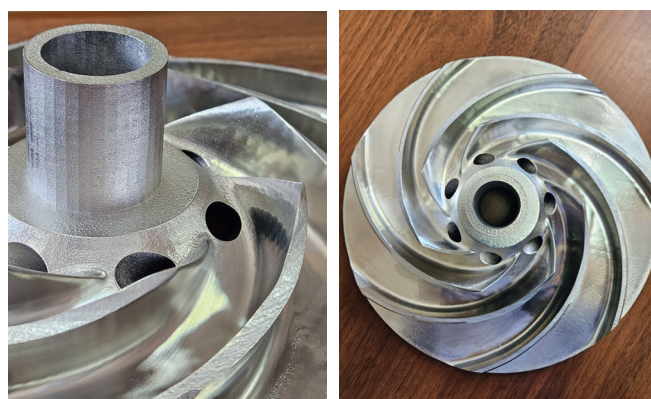


Рис. 6. 3D-печать, шероховатость импеллера Ra 1,6 после обработки АЭХ



Рис. 7. Сегмент авиадвигателя. 3D-печать, Ra 0,8 после обработки АЭХ



АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: Россия в числе лидеров

Инновационные технологии, которые работают и на которых зарабатывают в строительстве, обсуждали на конференции «ИнноСтрой-2026», проходившей 16 апреля в отеле «Москва Марриотт Империл Плаза». Главными темами стали: управление сроками, внедрение инноваций, BIM- и AI-технологии, снижение стоимости строительства, цифровой двойник стройки, аддитивные технологии.

Остановимся на аддитивных технологиях, которые стали быстро растущим трендом в мировой строительной отрасли. Модератором секции выступил Алексей Адамцевич, директор НИИ СМиТ НИУ МГСУ, спикерами: генеральный директор «АМТ» Александр Маслов, заместитель директора ФАУ «ФЦС» Юрий Шуркалин, генеральный директор «ЗД Арт» Роман Павленко, генеральный директор «СмартБилдСервис» Михаил Шиленков, генеральный директор «РВС-ЗД» Роман Архангельский, руководитель отдела компании «Три оси» Евгений Маркелов (на фото слева направо). Это те люди, которые большими буквами пишут историю новой строительной реальности.

Почему развитие аддитивных технологий в строительстве имеет большой потенциал?

На этот вопрос российское профессиональное сообщество отвечает многочисленными проектами, показывая целый ряд преимуществ. Это кратный рост скорости строительства зданий и сооружений, возможность создавать уникальные сложные формы без удорожания проекта, архитектурная свобода, снижение затрат на материалы и рабочую силу, оптимизация рабочих ресурсов, минимизация отходов, возможность работы в экстремальных условиях и др.

На текущий момент технология проявляет свои лучшие стороны в условиях массовой застройки, при создании

сложной архитектуры, опалубки и временных конструкций, интерьерного декора, при реставрации зданий. Развитие наблюдается в малоэтажном строительстве, сельском хозяйстве, туризме, социальной и муниципальной сфере. Возможности 3D-печати демонстрируют как уникальные постройки, так и оборудование для реализации самых смелых проектов. Первый в Европе напечатанный жилой дом от «Спецавиа» (теперь «АМТ», рис. 1) построен в Ярославле. Мировой известностью пользуются проекты, выполненные компанией «ЗД Арт», — «Дом кошка» (рис. 2), центр «Мелля» в Татарстане и др. По оборудованию «АМТ» можно проследить эволюцию от первых в мире российских серийных полевых принтеров «Спецавиа» до новейших роботизированных принтеров на самоходных шасси от Rogue (входит в группу «АМТ») на базе пикапа для строительства одноэтажных зданий, на гусеничном ходу — для многоэтажных. Завершение инжиниринга и сертификация самого большого в мире порталного принтера компании «АМТ», который сразу был выставлен в открытую продажу, говорит о зрелости отрасли. Технические характеристики поражают масштабом: одна установка этого комплекса позволяет напечатать более 2500 квадратных метров площади. Это уже не лабораторный образец, а полноценная строительная машина, способная закрывать потребности целых микрорайонов. Тот факт, что такие машины производятся серийно и они доступны для заказа, ставит Россию в один ряд с немногими мировыми производителями тяжелого строительного «железа». Российские инженеры умеют решать задачи любой сложности.

Что делается для дальнейшего развития?

По мнению **Юрия Шуркалина**, популяризация и, как следствие, масштабирование технологии позволят снизить стоимость возведения вертикальной бетонной



Рис. 1. Первый в Европе жилой дом от «АМТ»



Рис. 2. «Дом кошка» от «3Д Арт»

В планах ФАУ «ФЦС» выполнить и подготовить на 2026 год:

- ✓ НИР «Анализ существующего рынка строительной 3D-печати в России для выявления типовых конструктивных решений и актуальных направлений стандартизации».
- ✓ НИОКР «Разработка новых методов проектирования пустотелых бионических 3D-печатных балок».
- ✓ НИОКР «Исследование защитных свойств несъемной 3D-печатной опалубки для армированных бетонных конструкций с целью нормирования параметров защитного слоя при проектировании несущих конструкций».
- ✓ НИР «Мониторинг и классификация бионических и пространственных конструктивных решений для формирования базы типовых требований к проектированию объектов аддитивного строительного производства».
- ✓ НИОКР «Исследования структуры и свойств геополимерных бетонов для аддитивных технологических процессов в строительстве».
- ✓ ГОСТ Р «Смеси сухие строительные на гипсовом и гипсоцементно-пуццолановом вяжущих для аддитивного производства. Технические условия».
- ✓ ГОСТ Р «Смеси дисперсно-армированные строительные бетонные для аддитивного производства. Технические условия».

на 2027 год:

ГОСТ Р «Смеси бетонные геополимерные для аддитивного производства. Технические условия».

на 2028 год:

ГОСТ Р «Покрывают защитные декоративные для конструкций, изготовленных с применением технологии аддитивного строительного производства. Общие технические требования».

СП «Конструкции строительные, выполненные с применением аддитивных технологий. Правила проектирования».

конструкции до 50–90% и станет толчком к массовому строительству.

Еще один важный аспект для масштабирования технологии, которому уделяется внимание, это создание нормативной базы. Минстрой России с 2023 года активно включился в работу в рамках реализации «Стратегии развития аддитивных технологий до 2030 года». Так, в 2026 году запланировано проведение пяти прикладных НИР/НИОКР и подготовка двух новых стандартов; в 2027 году — девяти НИР и одного стандарта; в 2028 году — одного стандарта и полноценного свода правил на проектирование строительных конструкций, выполненных с применением аддитивных технологий. Данный план работ, размещенный на сайте ФАУ ФЦС, может быть доработан с учетом предложений от специалистов отрасли.

Кроме того, по словам **Романа Павленко**, для достижения лидерства в массовом сегменте необходимо строить единую цифровую цепочку.

В настоящий момент барьерами к развитию являются:

- ✓ При проектировании: разные стандарты BIM, отсутствие адаптации под 3D-печать, сложная геометрия, которая требует экспертизы.
- ✓ При моделировании: отсутствие универсальных слайсеров, ручная подготовка G-кода, ошибки в траекториях печати.
- ✓ При печати: несовместимость оборудования, нехватка квалифицированных операторов, высокий процент брака.

Требуется:

- ✓ Проектирование зданий с учетом особенностей строительной 3D-печати;
- ✓ Создание специализированного строительного софта для проектирования и моделирования зданий, слайсеров и др.
- ✓ Интеграция оборудования и программного обеспечения (ПО).
- ✓ Контроль среды (всепогодные купола).
- ✓ Адаптированные материалы.



Рис. 3. Модульный дом от «СмартБилдСервис» (на выставке «3ДМосПринт-2026»)

✓ Применение искусственного интеллекта для контроля качества экструзии (цель — убрать оператора с площадки ради безопасности и точности).

«Тот, кто первым создаст бесшовную связку “BIM-проект — строительный слайсер — робот-принтер — ИИ-контроль”, определит стандарты мировой строительной отрасли следующего десятилетия», — считает спикер.

Александр Маслов в своем выступлении развил тему цифровой природы аддитивных технологий. Так, для конструирования и моделирования объектов в строительной 3D-печати используется идентичное ПО, существует возможность вывода трехмерной модели и оперативной корректировки проекта и кода принтера, минуя бумажную фазу. BIM-модель при 3D-печати, как и при традиционных способах, включает в себя стадии проектирования, строительства и эксплуатации. Однако при очевидной близости цифровых инструментов до сих пор не реализован ни один проект 3D-печати по BIM-технологии, застройщики ограничиваются конструктивом здания, инженерными системами, разделом смет и строительным контролем. В компании «АМТ» считают важным использование всех возможностей и планируют создать такой прецедент уже в этом году.

Как важное достижение для масштабирования технологии можно отметить появление сети учебных центров. Особенно в этом направлении успешна деятельность компании «СмартБилдСервис», создающей центры роботизации и строительства по всей России (5 центров работают уже сейчас). Кроме того, **Михаил Шиленков** выделил как перспективное направление деятельности — модульное домостроение (рис. 3). Например, модуль компании с габаритами 4×6 м (внутри 3,6×5,6 м) с высотой 3 м печатается за 16 часов, стоимость модуля — 95 тыс.р. за 1 кв. м. При печати достигается высокое качество поверхности, не требующей финишной обработки. Возможна кастомизация без дополнительных расходов.

Роман Архангельский отметил успешное развитие печати малых архитектурных форм — кастомизированных изделий оригинального дизайна, которые уже сейчас востребованы в парковых и общественных пространствах по всей стране. Например, время печати уникальной вазы — 10 минут вместо 8–24 часов при создании



Рис. 4. Печать МАФов на принтере «РВС-3Д» (на выставке «3ДМосПринт-2026»)

ее литьем в опалубку, кувшина (рис. 4) — 2,5 часа. Для окрашивания можно добавить в бетон определенный пигмент в автоматическом режиме, причем при желании создать даже градиентное окрашивание, регулируя подачу пигмента. Народные умельцы раскрашивают изделия вручную.

И еще одно перспективное решение, которое имеет отношение к организации коммуникаций и продвижению продукции и услуг. **Евгений Маркелов** представил разработку компании «Три оси» — интернет-платформу Zosi.ru, которая позволит в одном месте объединить информацию о поставщиках оборудования и материалов, характеристиках предлагаемой продукции, исполнителях заказов и выполняемых проектах. На сайте есть разделы: домостроение, формы, дизайн, технологии, мероприятия, партнеры и др. Приобретение продукта или услуги возможно в автоматическом режиме. Партнерами проекта могут стать производители, архитекторы, стартапы, новаторы, строительные компании, предприниматели, муниципальные учреждения, индивидуальные заказчики.

Переход к индустрии зрелых решений

Развитие аддитивных технологий в российском строительстве переходит из стадии смелых экспериментов в фазу зрелой промышленной отрасли. Это подтверждается не только теоретическими преимуществами метода, но и реальными архитектурными проектами, а также серийным выпуском строительного оборудования мирового уровня. Однако сохранение этого технологического потенциала требует перехода от точечных успехов к системной работе. Дальнейшее закрепление лидерства напрямую зависит от консолидации усилий государства, науки и бизнеса, где ключевым фактором масштабирования становится реализация инициативных пилотных проектов при активной государственной поддержке. Именно такой подход позволит наглядно продемонстрировать рынку экономическую эффективность 3D-печати, сформировать устойчивый спрос со стороны девелоперов и частных заказчиков, а также создать необходимую нормативную базу для массового внедрения технологий. ■

Татьяна Карпова

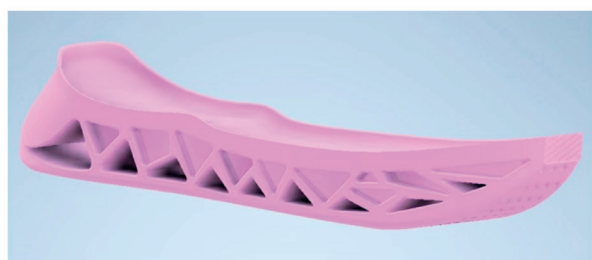
Разработка и оптимизация адаптивной подошвы спортивной обуви методом селективного лазерного спекания

К.И. Калашникова, М.А. Петров,
Московский политехнический университет

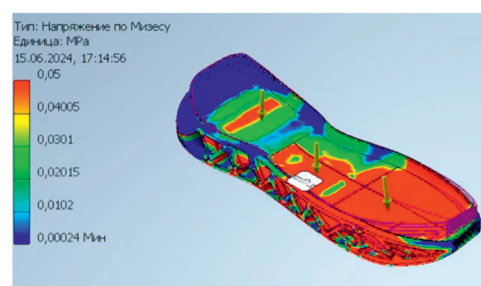
Персонализация при изготовлении спортивной обуви становится трендом. Аддитивное производство, в отличие от традиционных методов, позволяет создавать сложные геометрические структуры внутри подошвы, зонировать жёсткость и амортизацию, встраивать функциональные элементы, ускорять производство изделия. В работе рассматриваются особенности нагружения подошвы спортивной обуви с учётом биомеханики стопы. Выполнен анализ распределения нагрузок при различных режимах эксплуатации, включая ходьбу, бег и статическое положение. Обоснована необходимость разработки адаптивных конструкций подошв, способных учитывать неравномерный характер нагружения. Показана перспективность применения технологии селективного лазерного спекания (SLS) для реализации сложных структур с управляемыми механическими свойствами. Научная новизна заключается в обосновании взаимосвязи между характером биомеханического нагружения стопы и требованиями к внутренней архитектуре подошвы, а также в формировании подхода к проектированию адаптивных конструкций с учётом технологических ограничений аддитивного производства.

Современная спортивная обувь должна обеспечивать не только комфорт при эксплуатации, но и эффективное перераспределение нагрузок, возникающих в процессе движения человека. Наиболее нагруженным элементом обуви является подошва, воспринимающая ударные и циклические воздействия при ходьбе, беге и других

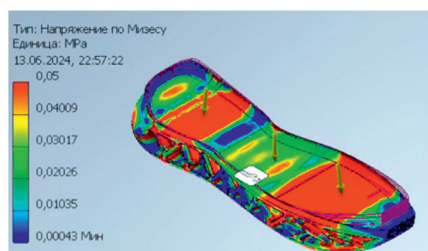
видах физической активности. В условиях динамического нагружения требования к подошве существенно возрастают: конструкция должна обладать амортизационными свойствами, устойчивостью к деформациям и способностью адаптироваться к различным фазам шага (рис. 1).



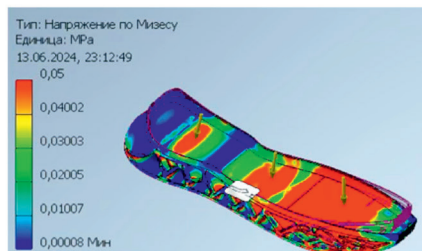
3D-модель подошвы



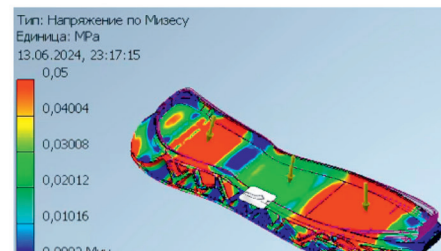
Результаты нагружения подошвы при беге в случае стопы с патологией



Результаты нагружения подошвы при ходьбе



Результаты нагружения подошвы при беге



Результаты нагружения подошвы при спокойном состоянии

Рис. 1. Конструкторско-технологическая проработка

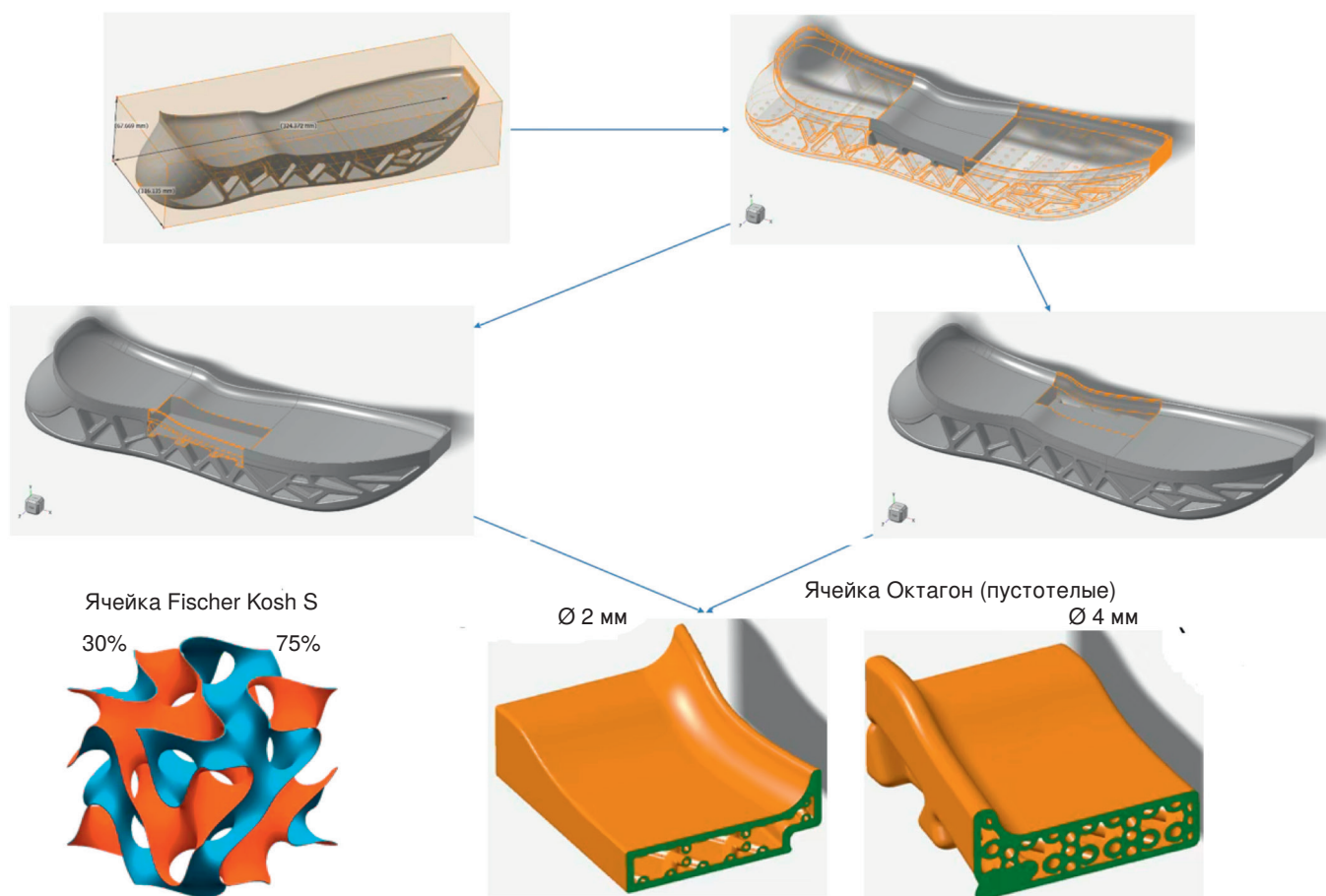


Рис. 2. Прототипирование и печать ячеистой структуры вставки для упрочнения подошвы

Традиционные методы производства обуви имеют ограничения при создании изделий со сложной внутренней геометрией и переменными механическими характеристиками. В связи с этим особый интерес представляет применение аддитивных технологий, в частности селективного лазерного спекания (SLS). Данная технология позволяет изготавливать изделия со сложными внутренними ячеистыми структурами, обеспечивающими локальное изменение жёсткости и амортизационных свойств.

В ходе исследования был проведён анализ полимерных материалов, применяемых в SLS-печати. Основное внимание уделялось материалам, обладающим высокой гибкостью, устойчивостью к циклическим нагрузкам и способностью сохранять эксплуатационные характеристики в условиях динамического нагружения. Рассматривались полиамидные материалы PA11 и PA12, поликарбонат, PET и термопластичный полиуретан (TPU).

Проведённый сравнительный анализ показал, что TPU наиболее полно соответствует требованиям, предъявляемым к материалам для изготовления подошв спортивной обуви. Данный материал сочетает в себе достаточную механическую прочность, высокую эластичность и устойчивость к истиранию. Дополнительным преимуществом TPU является возможность создания внутренних ячеистых структур различной плотности, что особенно важно при изготовлении адаптивных элементов обуви методом SLS.

После выбора базового типа материала был проведён анализ существующих марок TPU, предназначенных для

селективного лазерного спекания. Сравнение выполнялось по следующим критериям: жёсткость по Шору, стабильность параметров при печати, совместимость с промышленными SLS-принтерами и поведение материала в ячеистых структурах. По результатам анализа в качестве основного материала был выбран BASF Ultrasint TPU 88A, обладающий оптимальным сочетанием гибкости, прочности и устойчивости к деформациям.

На следующем этапе исследования была получена цифровая геометрия стопы человека. Для повышения точности моделирования использовался слепок стопы, сформированный в условиях контакта с опорной поверхностью. Такой подход позволил корректно зафиксировать анатомическое и функциональное положение стопы, а также определить зоны максимального давления.

Трёхмерное сканирование выполнялось с использованием ручного 3D-сканера RangeVision Neopoint Max. После завершения процесса сканирования была получена цифровая модель в виде облака точек. Далее проводилась очистка данных от шумов и артефактов, сглаживание поверхности и преобразование модели в твердотельный CAD-формат, пригодный для дальнейшего инженерного проектирования.

На основе полученной геометрии была разработана параметрическая 3D-модель подошвы спортивной обуви. Конструкция подошвы включала внутреннюю ячеистую структуру, обеспечивающую сочетание амортизационных свойств, устойчивости и энергоотдачи (рис. 2). Геометрия

ячеек и их пространственное расположение подбирались с учётом биомеханических особенностей распределения нагрузки на стопу.

При проектировании учитывались основные фазы шага: начальный контакт, полная опора и отталкивание. В фазе начального контакта основная нагрузка приходится на пяточную область, в фазе полной опоры нагрузка перераспределяется на среднюю часть стопы, а в фазе отталкивания максимальные напряжения возникают в переднем отделе подошвы. Указанные особенности были учтены при разработке внутренней структуры изделия (рис. 3).

Для оценки работоспособности конструкции было проведено компьютерное моделирование напряжённо-деформированного состояния подошвы при различных вариантах нагружения. В качестве расчётной нагрузки была принята сила 600 Н, соответствующая массе человека около 60 кг. Распределение нагрузки между функциональными зонами стопы задавалось в соответствии с биомеханическими особенностями ходьбы, бега и статического положения.

Результаты моделирования показали, что максимальные напряжения возникают в пяточной области и переднем отделе подошвы, что соответствует реальным условиям эксплуатации спортивной обуви. При этом ячеистая структура обеспечивает снижение локальных

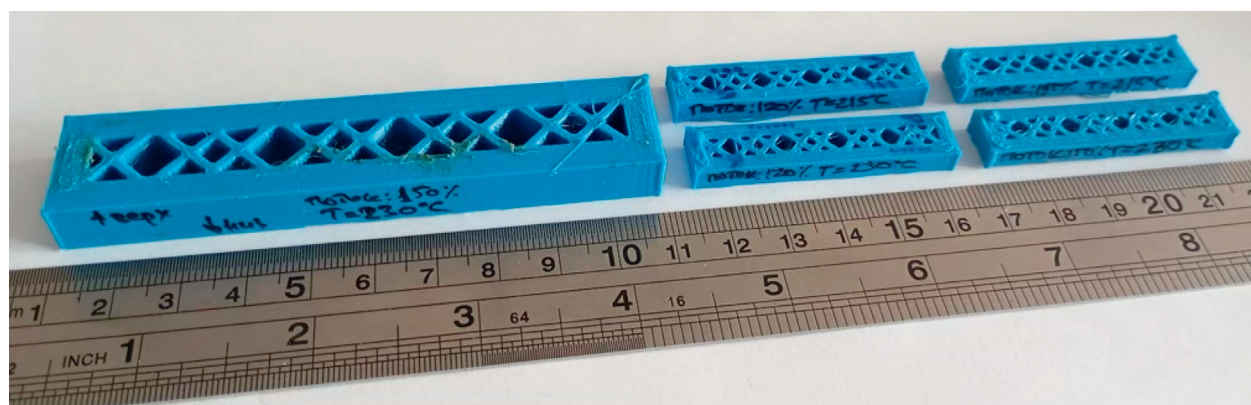


Ø4 мм Ø2 мм 75% 30%
Ячейка Октагон Ячейка Fischer Koch S

Рис. 3. Прототипирование и печать ячеистой структуры методом SLA

напряжений и способствует равномерному распределению нагрузки по всей поверхности изделия.

Дополнительно было проведено моделирование нагружения подошвы при наличии патологии стопы — супинации. Полученные результаты показали смещение зон максимальных напряжений и изменение характера деформации конструкции. Это подтверждает необходимость адаптации подошвы к индивидуальным биомеханическим особенностям пользователя.



Поток: 150% T=230°C

Поток: 120% T=215°C

Поток: 120% T=230°C

Поток: 150% T=215°C

Поток: 150% T=230°C

Поток: 150% T=230°C

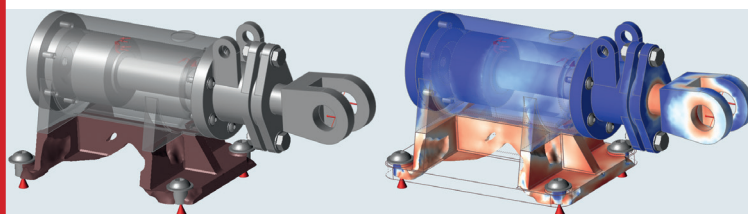
Рис. 4. Прототипирование и печать ячеистой структуры методом FDM



Кафедра «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Московского политехнического университета специализируется на компьютерном проектировании технологии и создании ее цифрового двойника (digital twin). Задача специализации — получение наилучшего совпадения результатов моделирования с результатами натуральных экспериментов. В своей работе сотрудниками кафедры применяется современное российское и зарубежное программное обеспечение.

ОСНОВНЫМИ НАПРАВЛЕНИЯМИ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТОК КАФЕДРЫ ЯВЛЯЮТСЯ:

- исследование технологических свойств материалов для аддитивных технологий и выбор термомеханических режимов 3D-печати;
- разработка технологий и оборудования для аддитивного производства;
- обратный инжиниринг и топологическая оптимизация для решения задач обработки давлением и аддитивного производства;
- листовая и объемная штамповка, прокатка — разработка, исследование, внедрение технологий на опытное или серийное производство;
- разработка, исследование, внедрение технологий изготовления метизных и крепежных изделий;



- специальные процессы штамповки: изотермическая штамповка и штамповка с кручением черных и цветных сплавов;
- повышение стойкости штамповой оснастки и кузнечно-штамповочного оборудования;
- разработка моделей материалов для компьютерного моделирования технологий обработки давлением.

КАФЕДРОЙ ВЕДЕТСЯ ПОДГОТОВКА КАДРОВ ПО СЛЕДУЮЩИМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМ ПРОГРАММАМ:

- «Машины и технологии обработки материалов давлением» (очное, бакалавриат, 15.03.01 Машиностроение);
- Оборудование и технологии аддитивного производства» (очное, бакалавриат, 15.03.01 Машиностроение);
- «Аддитивные технологии» (очное, бакалавриат, 27.03.05 Инноватика);
- «Цифровые технологии аддитивного и заготовительного производства» (очное, магистратура, 15.04.01 Машиностроение).



Контактная информация:

115280, г. Москва,
ул. Автозаводская, д. 16
Тел.: +7/495/ 223-05-23, доб. 2344,
e-mail: omd.at@mospolytech.ru



Сайт: <https://old.mospolytech.ru/index.php?id=883>



Рис. 5. Вставки, напечатанные на SLS-принтере

В практической части работы были изготовлены экспериментальные образцы изделий методом FDM (рис. 4) и SLS-печати (рис. 5). Для сравнительного анализа был разработан и напечатан ледоступ. Образцы, изготовленные по технологии SLS, продемонстрировали более высокое качество поверхности, лучшую детализацию и повышенную прочность по сравнению с FDM-аналогами.

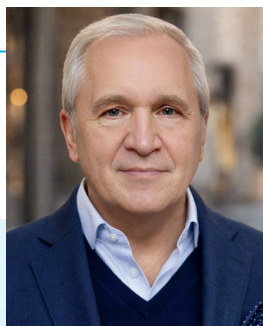
Также были изготовлены вставки для упрочнения подошвы и поддержки стопы. Полученные результаты подтвердили возможность изготовления сложных функциональных элементов методом селективного лазерного спекания.

Таким образом, проведенное исследование подтвердило перспективность применения технологии селективного лазерного спекания для разработки адаптивных подошв спортивной обуви. Использование материала TPU 88A и внутренних ячеистых структур позволяет создавать конструкции с заданными амортизационными и прочностными характеристиками. Разработанная модель подошвы и результаты компьютерного моделирования продемонстрировали возможность эффективного перераспределения нагрузок при различных режимах эксплуатации, включая ходьбу, бег и статическое положение.

Проведенный анализ показал, что применение цифрового проектирования в сочетании с аддитивными технологиями позволяет учитывать биомеханические особенности стопы уже на этапе разработки изделия. Это создаёт предпосылки для повышения комфорта эксплуатации обуви, снижения локальных нагрузок и улучшения амортизационных свойств подошвы.

Полученные результаты могут быть использованы при создании персонализированной спортивной и ортопедической обуви, а также служить основой для дальнейших исследований, направленных на оптимизацию ячеистых структур, экспериментальные испытания изготовленных образцов и разработку технологий серийного производства адаптивных подошв с использованием аддитивных технологий. ■

Разработка складного контейнера на основе монококовых панелей и интегрированных аддитивных узлов с применением платформы GOAPS™



А.В. Мойсеенко
Инновационный центр Сколково / Инжиниринговая группа Flat-Packed Container-Smart.
Компания ООО «Смарт Фолд Логистик», г. Донецк, ДНР. <https://cargofold.ru>

В статье рассматривается актуальная проблема мировой логистики — возврат и хранение порожних контейнеров. Предложено инновационное конструктивное решение складного контейнера типа Flat-Packed с монококовыми несущими элементами. Ключевая особенность — монококовых несущих элементов — функция шарнира реализована не за счёт навесных элементов, а путем локального замещения жёсткого сердечника в сэндвич-панели на структурированный эластомер-материал с решётчатой или ламинарной структурой (полиуретан, силикон, EPDM-пенополимеры) и генеративные силовые АМ-узлы и опоры, при сохранении непрерывности внешних и внутренних композитных обкладок. Локальные концентраторы нагрузок (угловые фитинги, шарниры, опоры) выполняются в виде аддитивно выращенных узлов (АМ-узлов) с генеративной решетчатой структурой. Для реализации предложенной конструкции разработана замкнутая **цифровая экосистема GOAPS™+ML (Generative Optimized Advanced Production System + Machine Learning)**, объединяющая этапы инжиниринга, топологической оптимизации, адаптации под производство, автоматизированной печати, постобработки и накопления данных в самообучающейся библиотеке.

Введение

Контейнеризация грузов за последние десятилетия стала основой мировой торговли. Однако активный рост объёмов перевозок обнажил системную проблему — дисбаланс грузопотоков. До 20% контейнеров, транспортируемых по морю, и до 40% по суше, перевозятся в порожнем состоянии [1]. Грузовым портам, терминалам и перевозчикам приходится содержать огромные парки

пустой тары, занимающей складские площади и требующей дополнительного топлива при транспортировке.

Одним из перспективных направлений решения проблемы являются **складные контейнеры** (foldable/flat-packed containers). Четыре таких контейнера в сложенном состоянии занимают объём одного стандартного 20-футового контейнера [2]. Пионером в этой области выступает компания Holland Container Innovations (Нидерланды), предложившая конструкцию из стеклопластика

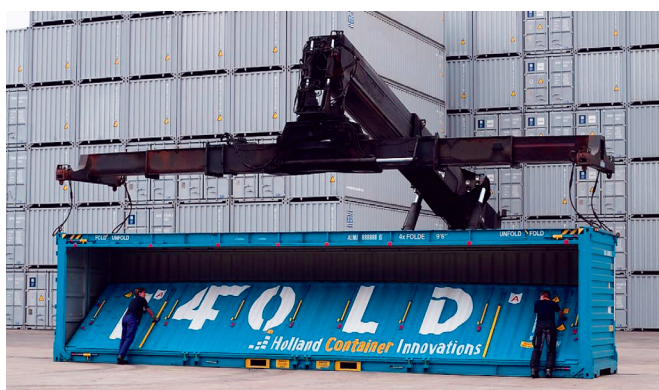


Рис. 1. Складной контейнер Holland Container Innovations

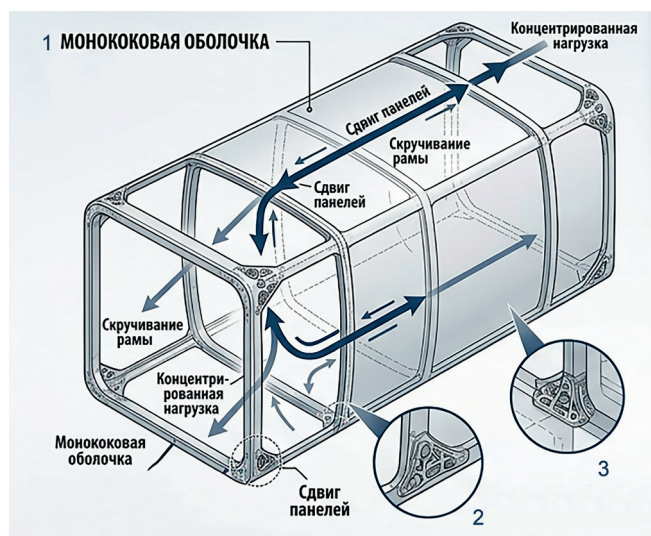


Рис. 2. Силовая архитектура монококового складного контейнера: 1 — монококовые панели; 2 — АМ-узлы (шарниры, кронштейны, опоры); 3 — угловые интерфейсы

и алюминия массой 1800 кг (против 2200 кг у стального аналога) [3].

Однако существующие решения обладают рядом недостатков:

- использование отдельных шарнирных узлов, что снижает общую жёсткость;
- наличие разрывных соединений, требующих герметизации;
- повышенная масса за счёт крепёжных элементов;
- ограниченный ресурс подвижных частей.

1. Анализ существующих решений

Стандартный ISO-контейнер представляет собой сварную пространственную раму из стального проката, обшитую гофрированным листом. Несущая функция полностью возложена на раму; обшивка выполняет ограждающую роль. Такая схема не допускает складной трансформации без потери прочности.

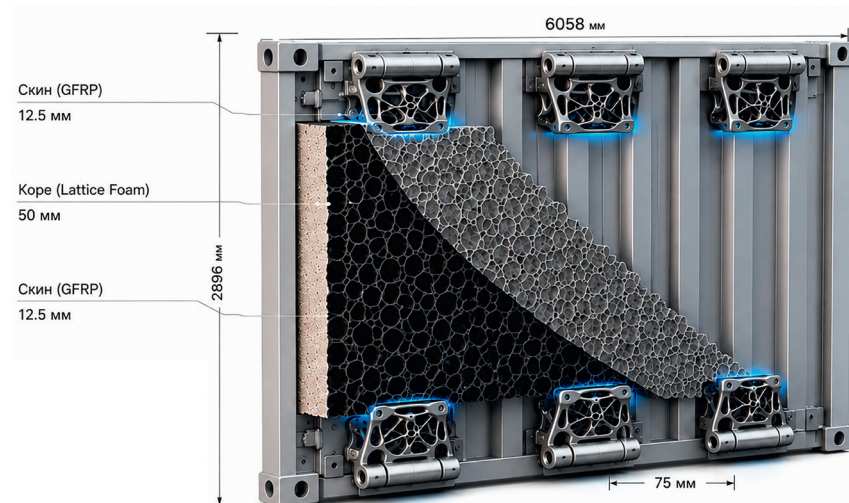


Рис. 3. Структура панели

Расчет FEM трех шарнирных узлов на панели

▲ AISI 316L ($E \sim 200 \text{ GPa}$)

▲ PTFE ($E \sim 0.5 \text{ GPa}$)

▲ EPDM ($E \sim 5 \cdot 10^{-2} \text{ MPa}$)

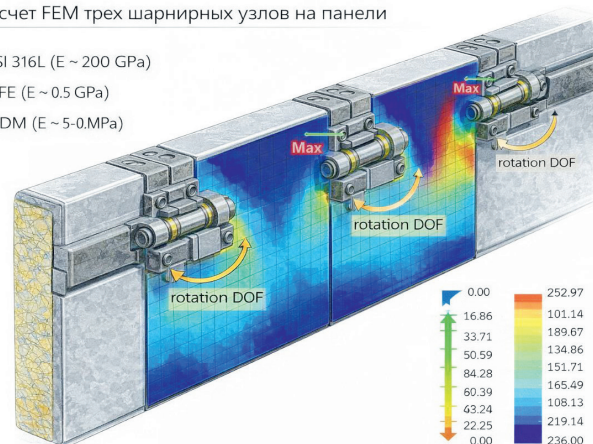


Рис. 4. FEM-модель распределения напряжений в зоне шарнира

В конструкции Holland Container Innovations используются отдельные шарнирные петли, соединяющие разрезные панели (рис. 1). Это позволяет складывать контейнер, но создаёт зоны концентрации напряжений и требует дополнительных уплотнителей. Масса снижена за счёт применения стеклопластика, но технология остаётся трудоёмкой в производстве [4].

Существующие складные контейнеры решают проблему возврата порожней тары, но не лишены недостатков, связанных с конструкцией шарниров и дискретностью силовых элементов. Требуется переход к **интегральной несущей структуре**, где трансформация обеспечивается не стыками, а локальным изменением свойств материала панели и шарниров.

2. Предлагаемая конструкция

Предлагаемый контейнер (рис. 2) построен по **принципу Frame-Shell Hybrid**, где:

- основная несущая функция реализована монококовыми панелями;
- локальные концентрации нагрузок воспринимаются аддитивными силовыми узлами (АМ-узлами);
- трансформация контейнера обеспечивается интегрированными шарнирными зонами, встроенными в структуру панелей.

Ключевой элемент новизны — **непрерывная монококовая панель**, в некоторых местах соединённая со смежными панелями, функция шарнира реализована локальным замещением жёсткого сердечника (РЕТ-пена, соты) на эластомерный материал с решётчатой или ламинарной структурой (полиуретан, силикон, EPDM). Внешние композитные обкладки (скины) остаются непрерывными по всей длине панели (6058 мм), включая шарнирную зону (рис. 3).

Технические параметры:

- Материал скинов: стекло/углепластик ($E \sim 50\text{--}200$ ГПа).
- Материал сердечника в жёсткой зоне: РЕТ-пена ($E \sim 0.2\text{--}0.5$ ГПа).
- Материал сердечника в шарнирной зоне: полиуретан/силикон/EPDM ($E \sim 0.5\text{--}50$ МПа).
- Толщина панели: 75–150 мм.

Для валидации предложенной конструкции выполнено конечно-элементное моделирование (FEM) в среде Ansys. Рассматривались три типа нагружения (рис. 4):

- вертикальная нагрузка при штабелировании (6 ярусов);
- изгибающий момент при подъёме краном;
- циклические нагрузки в шарнирной зоне при складывании/раскладывании.

Результаты моделирования подтвердили:

- максимальные эквивалентные напряжения не превышают предела текучести для выбранных материалов (запас прочности 2.5);
- деформации в шарнирной зоне находятся в упругой области для эластомера;
- непрерывность внешних слоёв обеспечивает герметичность при всех режимах нагружения.

Особенности:

- Узлы не прикручены и не приварены к панели, а являются частью силовой оболочки (монокот + узел).



Рис. 5. Генеративные АМ-узлы: а — шарнир; б — кронштейн; в — опора



Рис. 6. Этапы складывания контейнера: 1 — разложен, 2 — сложен



Рис. 7. Замкнутый цикл цифровой экосистемы GOAPS™+ML

• Интеграция узла в панель достигается за счёт клевого соединения с оптимизированной площадью контакта либо гибридного производства (панель формируется вокруг напечатанного узла).

Принцип трансформации представлен на рис. 6:

- боковые панели перемещаются навстречу;
- торцевые панели складываются пополам (шарнирная зона);
- крыша и днище складываются пополам к боковым панелям.

3. Замкнутая цифровая экосистема GOAPS™+ML

Предложенная конструкция реализуется в рамках собственной технологической **платформы GOAPS™ (Generative Optimized Advanced Production System)**. В отличие от разомкнутых решений [5–10], GOAPS™ объединяет все этапы жизненного цикла изделия — от инжиниринга до утилизации — в единую цифровую экосистему с обратной связью и самообучающейся базой знаний (Machine Learning). Процесс включает пять последовательных этапов (рис. 7):

Этап 1. Инжиниринг и топологическая оптимизация

Взаимодействие: цифровой двойник (Digital Twin) + генеративный дизайн.

Инженер загружает исходную геометрию детали (например, шарнира или кронштейна) и техническое задание (нагрузки, материал, точки крепления). Система GOAPS™, используя алгоритмы топологической оптимизации, создаёт несколько вариантов геометрии, удаляя материал из ненагруженных зон и добавляя его в зонах пиковых нагрузок.

Решаемая проблема: традиционные детали перетяжелены, проектируются с избыточным запасом прочности.

Эффект: снижение веса детали на 30–50%; сокращение цикла НИОКР на месяцы за счёт валидации в цифровом двойнике.

Этап 2. Адаптация под производство (подготовка к печати)

Взаимодействие: оптимизация поддержек + база знаний (библиотека деталей).

Система анализирует геометрию и адаптирует её под конкретный материал. Автоматически рассчитывается

оптимальная ориентация детали в пространстве и минимизируется количество временных опорных структур (поддержек).

Решаемая проблема: неправильная ориентация и избыток поддержек ведут к перерасходу материала, увеличению времени печати и сложной постобработке.

Эффект: экономия материала на поддержки до 15%; сокращение времени печати до 20%.

Этап 3. Автоматизация производственного цикла

Взаимодействие: интеграция с MES + генерация ЧПУ-программ.

GOAPS™ интегрируется с MES-системой предприятия. Производственное задание ставится автоматически: система выбирает свободный принтер, назначает время старта и генерирует управляющие программы не только для 3D-принтера (LPBF/DED), но и для последующей механообработки на станках с ЧПУ.

Решаемая проблема: разрыв между цифровой моделью и физическим производством, потери времени на ручное планирование и перепрограммирование.

Эффект: сокращение времени подготовки производства до 50%.

Этап 4. Производство и постобработка

Взаимодействие: 3D-печать металла (LPBF/DED) + гибридные методы.

Реализуется непосредственное выращивание детали. Для узлов контейнера применяется гибридный подход: печать (LPBF) сложной внутренней решётки (lattice), затем наплавка (DED) внешних слоёв или нанесение композита.

Решаемая проблема: невозможность изготовления сложных внутренних полостей и решётчатых структур традиционными методами.

Эффект: консолидация сборок (вместо 10 деталей — одна), исключение слабых мест (сварных швов, болтовых соединений), дополнительное снижение веса на 10–15%.

Этап 5. Обратная связь и база знаний

Взаимодействие: анализ проектов + машинное обучение + библиотека деталей.

Готовая деталь проходит контроль геометрии (3D-сканирование) и механических испытаний. Данные о реальном весе, времени печати, возникших дефектах

Таблица 1. GOAPS™+ML vs DAPS™

Критерий	DAPS™ (Divergent)	GOAPS™+ML (предлагаемая система)
Архитектура	Разомкнутая цепочка (дизайн → печать → сборка)	Замкнутая экосистема с обратной связью
База знаний	Статическая библиотека	Самообучающаяся ML-библиотека , накапливающая данные о каждом проекте
Цифровой двойник	Используется на этапе дизайна	Интегрирован на всех этапах жизненного цикла
Управление производством	Частичная интеграция	Полная интеграция с MES/ERP , автоматическое планирование
Подготовка кадров	Не предусмотрена	Встроенный образовательный модуль на базе библиотеки реальных кейсов

Таблица 2. Сравнительный анализ конструкций

Параметр	Традиционный ISO-контейнер	Holland 4FOLD [3]	Предлагаемая конструкция
Масса, кг	2200–2400	1800	1500–1700
Материал рамы/панелей	Сталь	Стеклопластик + алюминий	Композит + титан/алюминий (AM)
Количество деталей	>100	50–70	10–15
Шарнирный узел	Отсутствует	Отдельные петли	Интегрирован в панель
Герметичность	Высокая	Требует уплотнителей	Абсолютная (непрерывные скины)
Снижение веса (к стальному)	0%	18–20%	30–32%

Таблица 3. Сводная таблица эффективности процесса GOAPS™

Этап	Технология	Решаемая проблема	Экономия / Эффект
1. Инжиниринг	Digital Twin, топологическая оптимизация	Перетяжелённые конструкции	Снижение веса детали — 30–50%
2. Подготовка	Оптимизация поддержек, база знаний	Перерасход материала на поддержки	Экономия материала — 15%, времени — 20%
3. Автоматизация	Интеграция с MES, ЧПУ	Разрыв данных, ручное планирование	Сокращение времени подготовки — 50%
4. Производство	3D-печать металла (LPBF/DED)	Невозможность сложной геометрии	Интеграция функций, исключение сборок
5. Аналитика	ML-библиотека, обучение	Потеря накопленных знаний	Ускорение новых проектов — 30–40%

загружаются обратно в систему, пополняя библиотеку деталей и служа основой для обучения модели машинного обучения. Это ключевое отличие GOAPS™ — самообучающаяся экосистема.

Решаемая проблема: каждый новый проект начинается с нуля, накопленный опыт теряется.

Эффект: ускорение будущих разработок на 30–40% (система предлагает готовое решение из библиотеки); снижение затрат на кадры (обучение студентов на реальных кейсах).

4. Сравнительный анализ GOAPS™+ML и DAPS™ (таблица 1)

5. Результаты и преимущества (таблицы 2 и 3)

Эксплуатационные преимущества

- Возможность штабелирования четырёх сложенных контейнеров в одном стандартном слоте.
- Снижение расхода топлива при транспортировке порожней тары до 25% [2].
- Полная коррозионная стойкость (композит + титан/алюминий).
- Плавучесть в аварийных ситуациях.

Заключение

1. Предложенная архитектура складного контейнера с монококовыми панелями и интегрированными AM-узлами решает ключевую проблему логистики — возврат порожней тары — за счёт снижения массы на 30% и воз-



Рис. 8. Перспективные конструкции умных складных экодомов-трансформеров Smart met house

возможности штабелирования четырёх контейнеров в одном слоте.

2. Ключевая конструктивная новизна — реализация шарнирной функции путём локального замещения жёсткого сердечника на эластомер при сохранении непрерывности внешних композитных обкладок, что обеспечивает абсолютную герметичность и исключает концентраторы напряжений.

3. Разработанная платформа GOAPS™+ML обеспечивает замкнутый цифровой цикл производства, интегрируя топологическую оптимизацию, генеративный дизайн, аддитивный синтез, автоматизированную постобработку и самообучающуюся базу знаний.

4. Сравнение с DAPS™ [4] показывает преимущества GOAPS™: замкнутая экосистема, ML-библиотека, полная интеграция с MES и встроенный образовательный модуль обеспечивают дополнительное сокращение времени подготовки производства на 50% и ускорение новых разработок на 30–40% за счёт повторного использования накопленных данных.

5. Количественные эффекты от внедрения технологии подтверждены моделированием и анализом: снижение веса деталей до 50%, экономия материала до 15%, сокращение цикла НИОКР на месяцы.

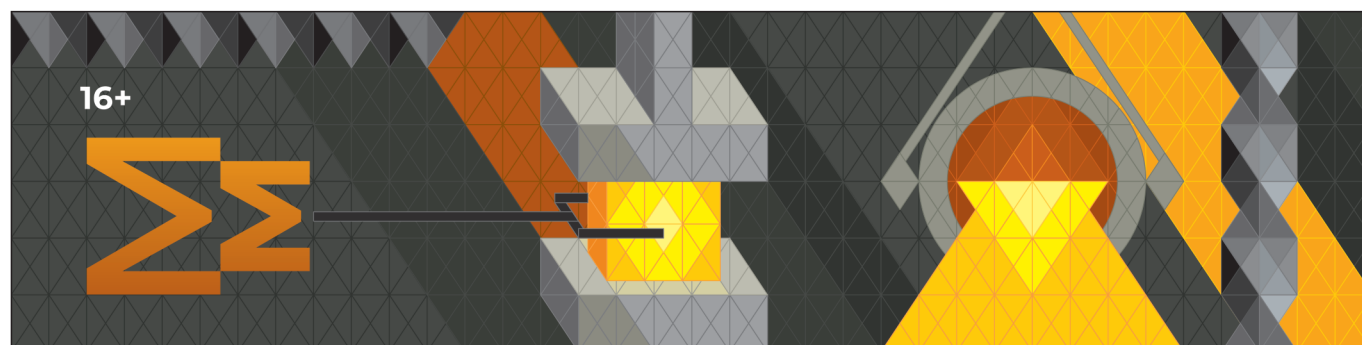
Дальнейшие исследования будут направлены на физическую реализацию прототипа и валидацию конечно-элементных моделей в натурных испытаниях.

Разработанная технология апробирована не только на складных контейнерах, но и на линейке мобильных домов-трансформеров Smart MET House. Использование монококовых панелей и генеративных узлов, спроектированных в платформе GOAPS™, позволило снизить массу конструкций дома на 28%, обеспечить складное

состояние «плоский пакет» и сократить время монтажа на площадке до 30 минут. Это подтверждает универсальность предложенных технических решений для различных классов складных пространственных конструкций. (рис. 8). ■

Литература

1. UNCTAD. Review of Maritime Transport 2025. — United Nations, 2025. — 130 p. <https://maritimemediation.com/review-of-maritime-transport-2025-global-shipping-at-a-turning-point/>
2. Holland Container Innovations. 4FOLD Collapsible Container: White Paper. — Rotterdam, 2024. — 24 p. <https://4foldcontainers.com/>
3. Patent NL 2023456 B1. Foldable freight container / J. van der Pol. — 2023. <https://patents.google.com/patent/US20100133264A1/en>
4. Divergent Technologies Inc. DAPS™ — Digital Adaptive Production System: Technical Divergent Technologies Inc. Divergent Announces \$290 Million Series E to Scale Digital Manufacturing Platform and Meet Growing US Defense Production Demand (2025). https://www.divergent3d.com/company/news/story/divergent-series-e_20250915
5. Czinger K. The Divergent 3D Story: Reinventing Manufacturing. 3D Printing Meets High Performance in Czinger Hypercars
6. Глен Снедден, Майкл Брукс. Consolidation of Assemblies via Generative Design and Metal AM. https://www.researchgate.net/publication/353439471_Metal_additive_manufacturing_in_aerospace_A_review
7. ASTM F3301–24. Standard Guide for Additive Manufacturing. <https://store.astm.org/f3301-18.html>
8. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies. — Springer, 2021. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-56127-7>
9. Gebhardt A., Hötter J. S. Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-44282-7_4
10. This car company set new track records to prove its 3D printing tech Kevin and Lukas Czinger have a new way of making cars, and it's starting to catch on. <https://arstechnica.com/cars/2022/10/turning-powdered-aluminum-into-supercar-parts-with-divergent-3d/>



Металлообработка. Металлургия

19-я выставка современных технологий, оборудования, материалов для машиностроения, металлообрабатывающей промышленности, подготовительного и литейного производства

22–25 сентября 2026
Пермь

Масштабный проект,
аналогов которому
нет на территории ПФО



телеграм-
канал

@expometal



(342) 204-04-53
ochkina@proexpo.ru

metal.proexpo.ru



10-13 НОЯБРЯ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ,
КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»**

При поддержке:

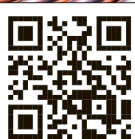
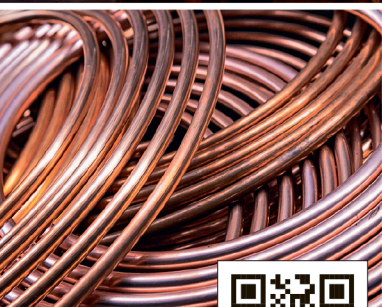


Минпромторг
России



32-я Международная
промышленная выставка

МЕТАЛЛ ЭКСПО 2026



12+

Генеральный
информационный партнер:



Металлоснабжение и сбыт

Организатор:



Оргкомитет выставки:
тел./факс +7 (495) 734-99-66

www.metal-expo.ru



**НМФ
ЭКСПО**

Национальный
Металлообрабатывающий
Форум

КЛЮЧЕВАЯ ОСЕННЯЯ ВЫСТАВКА ПО МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ

6-9 ОКТЯБРЯ 2026
Москва. Крокус Экспо

**СТАРТАП-ЗОНА
АДДИТИВНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

СПЕЦИАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ МОЛОДЫХ КОМАНД

- ⚙ Покажите печать металлом реальным заводам
- ⚙ Предложите новые порошки и материалы
- ⚙ Демонстрируйте топологическую оптимизацию для 3D-печати
- ⚙ Расскажите про постобработку и контроль качества

СТАТЬ ЭКСПОНЕНТОМ



Реклама

ОРГАНИЗАТОР ВЫСТАВКИ



Национальный союз производителей и поставщиков
оборудования и инструмента для металлообработки

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПАРТНЕР

РИТМ
МАШИНОСТРОЕНИЯ



ПРИ ПОДДЕРЖКЕ



NMF-EXPO.RU

nsh@nmf-expo.ru

ПОДПИСНАЯ КАМПАНИЯ — 2026



Ведущее отраслевое
периодическое
издание в сегменте
металлообработки



www.ritm-magazine.com
info@ritm-magazine.com

Стоимость: 1000 р. за номер.
Периодичность: 8 номеров в год

Уникальный журнал,
посвященный передовым
достижениям и инновациям
в области 3D-печати и
аддитивного производства



www.additiv-tech.ru
info@additiv-tech.ru

Стоимость: 1000 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год

