



ONSINT

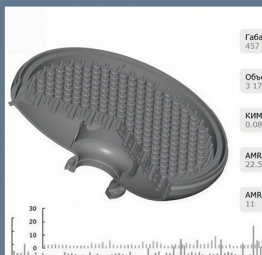
AM150

ИНЖЕНЕР ПРОТИВ ПРИНТЕРА

Читайте откровенный
взгляд от «ОНСИИТ» на с. 8

onsint.ru

Реклама



Экономическое обоснование применения аддитивных технологий

32



Аддитивное производство технической керамики: мировые тенденции, рыночная динамика и российская повестка.

36



Аддитивное строительное производство в России: тренды и возможности

52

VPG LASERONE

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).

RU СДЕЛАНО
В РОССИИ

ГИ
СП

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 QBH коннектор
- Самый компактный и легкий корпус из существующих
- КПД «от розетки» более 40%
- Долговременная нестабильность <1% за 8 часов



26-я международная
специализированная
выставка

12-15 | 05 | 2026


МЕТАЛЛООБРАБОТКА

Россия, Москва,
МВЦ «Крокус Экспо»

12+ Реклама

metobr-expo.ru

Организатор:
 **ЭКСПОЦЕНТР**

 Минпромторг
России



at

аддитивные
технологии

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.



24



48



70

Содержание

- 4** Экосистема аддитивной промышленности
- 7** TOP Additive — системы очистки от порошка деталей аддитивного производства
- 8** Инженер против принтера
- 13** Центр SLM-печати: скорость, качество, уникальность
- 16** «Фабрика Братьев Просвирниных»
- 18** AmPro расширяет возможности коммерческой аэрокосмической отрасли
- 19** Триботехнический фотополимер для изготовления износостойких деталей от HARZ Labs
- 20** AVP ZIAS — от оборудования к комплексным решениям. Как технология Binder Jetting трансформирует литейное производство
- 22** INTAMSYS FUNMAT PRO 610HT новое поколение крупногабаритной промышленной печати по технологии FDM
- 24** Точность, которой можно доверять: как современные 3D-сканеры меняют подход к инженерным задачам
- 27** Непланарный слайсинг и управление формированием слоя при лазерной проволоочной наплавке: специализированное ПО и прикладные кейсы
- 32** Экономическое обоснование применения аддитивных технологий
- 36** Аддитивное производство технической керамики: мировые тенденции, рыночная динамика и российская повестка. Аналитический обзор
- 42** Непрерывный контроль как гарант стабильности серийного аддитивного производства
- 48** Аддитивные технологии в ветеринарии
- 52** Аддитивное строительное производство в России: тренды и возможности
- 64** Аддитивное строительное производство: архитектурный потенциал от малых форм до уникальных зданий
- 70** Технологические аспекты получения металломатричных композитов
- 80** Выставка «3D-TEX – 2026»: развитие аддитивных технологий в России и ключевые тренды отрасли

Новые лазеры для аддитивного производства

Компания VPG LaserONE (кластер «СФ Тех» ГК Softline) впервые представила на выставке «Фотоника. Мир лазеров и оптики – 2026» новую линейку лазерных источников для замещения импортного оборудования в микроэлектронике, аддитивном производстве и прецизионной обработке материалов.

Среди ключевых новинок — лазерный источник GLPN-5-150-30 для импульсной обработки материалов с длиной волны 532 нм, энергией импульсов до 5 мДж и средней мощностью 30 Вт. Длительность импульсов до 150 нс обеспечивает минимальную зону термического влияния.

Непрерывный зеленый лазер GLR-535 мощностью 200 Вт разработан для аддитивных технологий и подходит для работы с медными сплавами и золотом. Излучение на длине волны 535 нм поглощается этими металлами

в 10 раз активнее инфракрасного, что снижает энергозатраты и повышает качество обработки.

Непрерывный УФ-лазер ULR-355-3-В мощностью 3 Вт предназначен для керамической 3D-печати, в том числе сложной геометрии. Новинка показывает высокую скорость печати, уверенную работу с вязкими и высоконаполненными керамическими суспензиями тугоплавких металлов. Качество пучка гарантирует высокий результат даже при формировании толстых слоев.

Также в портфеле компании — универсальные непрерывные одномодовые лазеры видимого диапазона серии VLM с длиной волны от 355 до 775 нм с перенастраиваемой длиной волны (шаг 0,1 нм) и мощностью 20 Вт. Эти источники используются, в частности, для бесконтактной литографии, локальной пайки, вскрытия контактных площадок и метрологии.

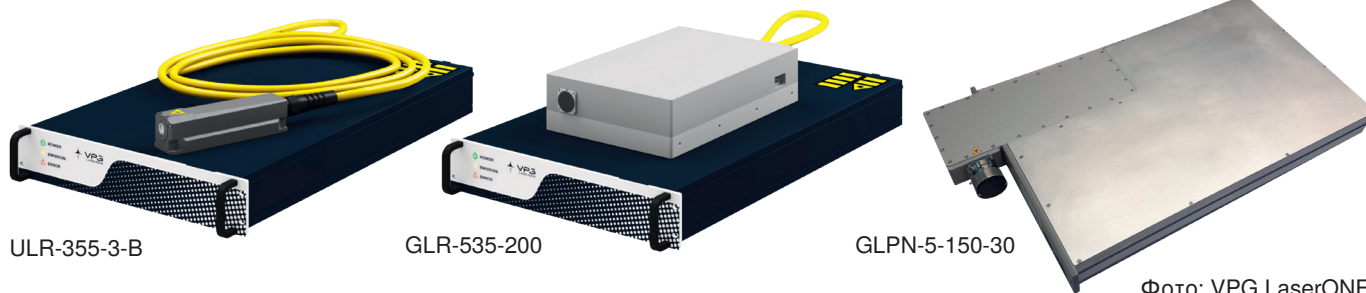


Фото: VPG LaserONE

Отрасль демонстрирует зрелость

Согласно отчету Wohlers Report – 2026, глобальная выручка от аддитивного производства в 2025 году достигла 24,2 миллиарда долларов США, что означает рост на 10,9% в годовом исчислении. Рынок аддитивного производства характеризуется увеличением использования установленных мощностей, региональной дивергенцией и динамикой внедрения, обусловленной государственной политикой, но не быстрым расширением системы.

На услуги печати приходилась наибольшая доля рынка — 48%, на продажи и обслуживание систем — 26%, на материалы — 20%, а на программное обеспечение — 6%. По прогнозам, к 2025 году объем продаж услуг аддитивно-

го производства вырос на 15,5%, в то время как продажи систем — на более скромные 3,6%.

Компании в Азиатско-Тихоокеанском регионе продолжали наращивать темпы роста, в среднем демонстрируя рост выручки на 19,8%. Компании в Северной и Южной Америке выросли в среднем на 12,6%, а компании в Европе, на Ближнем Востоке и в Африке — в среднем на 9%.

В отчете указывается, что эти цифры свидетельствуют о зрелости отрасли, где создание добавленной стоимости «все больше концентрируется в производстве и предоставлении услуг, а не в продажах нового оборудования».

Теперь в Telegram!  Присоединяйтесь!

РИТМ
МАШИНОСТРОЕНИЯ



t.me/ritm_magazine



t.me/additiv_tech

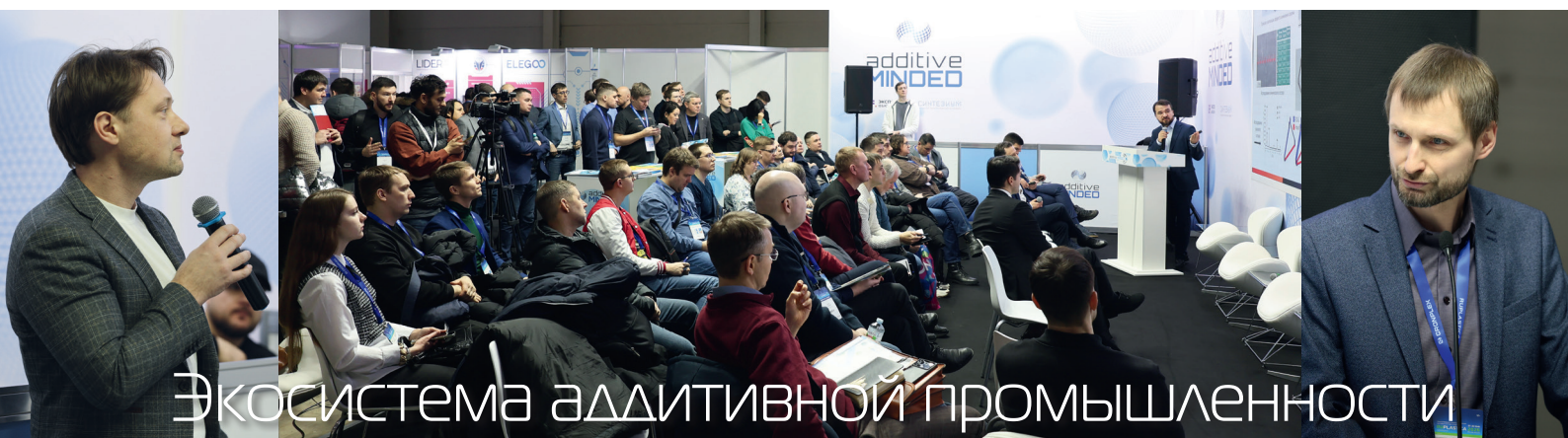


Тел.: 8 (4912) 51-19-41
8 (800) 444-29-41
+7 (930) 783-19-41
E-mail: 3d@3d-shop.ru

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



Дмитрий Трубашевский, Светлана Бакарджиева

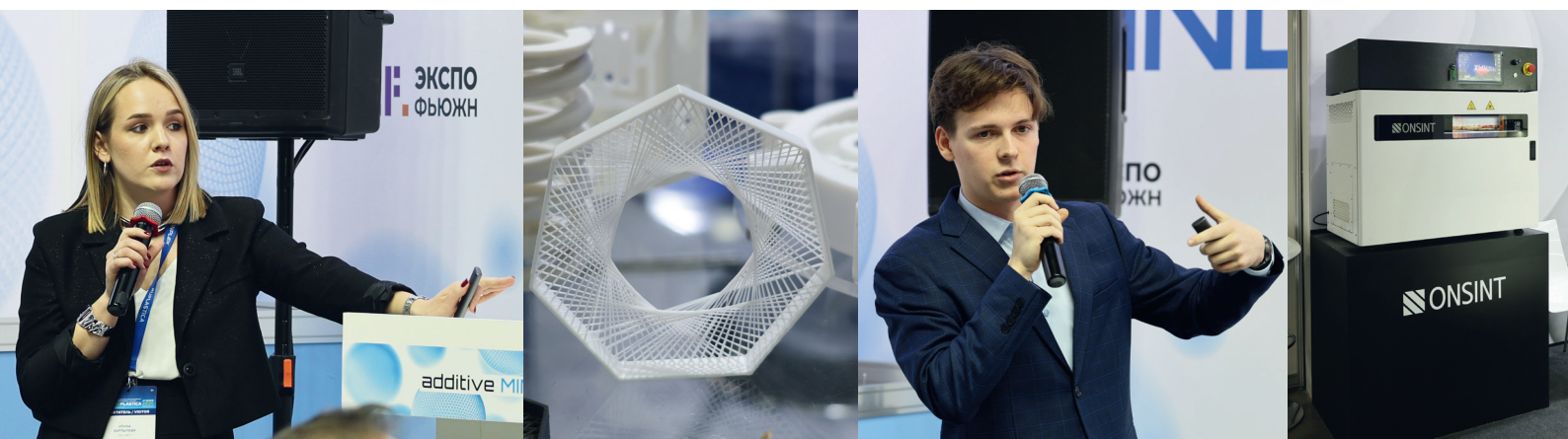
С 27 по 29 января в московском МВЦ «Крокус Экспо» в рамках крупнейшей выставки полимерной индустрии «Рупластика» (27–30 января) прошла конференция Additive Minded – 2026. Ее тема «Красиво, технологично, функционально: российский рынок аддитивных технологий на новом витке» отразила фокус на практических аспектах внедрения и масштабирования технологий в промышленности. Программа включила 10 тематических треков («Стратегия суверенитета», «Технологический полигон», «Экономика аддитивного производства», «Материалы следующих поколений», «Арена решений», «Цифровое бессмертие», «Предтечи умной фабрики», «Цифровой двойник» и специализированные треки), объединив более 60 экспертов из ведущих компаний, институтов и производственных объединений.

Четыре специальных трека задали стратегический контекст. Два из них — от АО «ЦАТ» Объединенной двигателестроительной корпорации (ЦАТ ОДК) — «Современное отечественное оборудование для аддитивного производства» (модератор: Дмитрий Голубин, главный технолог АО «ЦАТ») и «Материалы для аддитивного производства: проблемы технического регулирования» (модератор: Юрий Авраамов, главный специалист по стандартизации и сертификации АО «ЦАТ»). Также была организована дискуссия НИИ СМиТ НИУ МГСУ «Строительная 3D-печать: начало эры или дорогая

игрушка?» (модератор: Алексей Адамцевич, директор Научно-исследовательского института строительных материалов и технологий НИУ МГСУ) и трек содружества производителей «ЦЕХ» «От прототипа к серийному производству: как аддитивные технологии меняют промышленность России».

Согласно статистике выставки, темой аддитивного производства интересуются 21,63% посетителей, среди которых 23,17% — генеральные директора и владельцы промышленных компаний и научно-исследовательских организаций, 26,06% — руководители департаментов и отделов, 19,12% — менеджеры и специалисты. Много ли это? Если рассматривать цифры как показатель KPI, то может показаться мало. Но в целом, глядя на вовлечение промышленников, можно с уверенностью сказать, что интерес растет из года в год.

По данным, представленным Дмитрием Трубашевским, генеральным директором инжиниринговой и IT-компании «Синтезиум» и основателем проекта «Логика слоя», российский рынок АТ 2025 года увеличился до 21,26 млрд рублей с перераспределением долей между импортом и локальным производством. Ключевым концептом стала экосистемность — взаимосвязь всех элементов: от подготовки кадров, разработки материалов и производства оборудования до конечных изделий и спектра сфер применения АТ.





Содружество производителей «ЦЕХ» представило аналитику на основе опросов 1200 участников из 60 регионов и 30 отраслей. По оценке респондентов, доминирующие вызовы — поиск новых рынков сбыта и удержание рентабельности на фоне растущих издержек. В АТ запрос сконцентрирован на практике — понимать, какие детали и оснастку выгодно печатать, и детальном расчете экономики внедрения.

Анзор Остахов, начальник отдела консультантской поддержки предприятий ФГУП «Центр развития базовых отраслей промышленности» Минпромторга России, обозначил аддитивное направление как приоритетное для развития, по которому существует конкретный набор финансовых инструментов господдержки в рамках национального проекта «Средства производства и автоматизации» — от субсидирования НИОКР для производителей оборудования до компенсации затрат заказчикам, грантов «Старт» для начинающих разработчиков и компенсации скидок при продаже на внутреннем рынке и экспорте. Дмитрий Кадников, начальник управления повышения производительности труда АНО «Мосстратегия», дополнил эту тему системным взглядом на внедрение технологий в контексте федерального проекта по повышению производительности труда, по которому был предложен пятиэтапный алгоритм внедрения АТ на срок до 2,5 лет с метриками успеха: средний рост производительности на 52%, сокращение времени процессов на треть.

Additive Minded – 2026 выстроила целостную картину трансформации аддитивной сферы и подтвердила: технологический суверенитет строится не на риторике, а на конкретных разработках. Российские производители оборудования предлагают

полные линейки установок — от настольных керамических 3D-принтеров до крупногабаритных систем прямого лазерного выращивания. Локализованные материалы демонстрируют международную конкурентоспособность. Отечественное программное обеспечение решает задачи, которые ещё недавно считались прерогативой зарубежных систем. Главным же результатом стало осознание того, что аддитивное производство (АП) — это не история про станки/принтеры/установки и материалы, это история про людей, процессы и культуру.

Сфера аддитивных технологий с демонстрацией возможностей и частыми вау-эффектами перерастает в сферу аддитивного производства, переходя от экспериментов к промышленной зрелости. Более 70% контрактной печати составляет серийное производство, экономика проектов становится прозрачной и просчитываемой, появляются стандарты и нормативы. Однако зрелость не означает замедления. Мультиматериальная печать, интеллектуальные материалы с эффектом памяти формы, интеграция искусственного интеллекта в проектирование и контроль — это уже не концепции будущего, а разработки, представленные на конференции.

Additive Minded – 2026 стала диагностикой состояния сферы АП и вектором дальнейшего отечественного развития. Мы находимся в точке перехода — от энтузиазма первопроходцев к промышленной дисциплине, от разрозненных экспериментов к связанной экосистеме, от технологического восхищения к трезвому экономическому расчету. Конференция показала: инструменты есть, компетенции растут, понимание углубляется. Теперь вопрос в системной работе, последовательности и готовности учиться как на успехах, так и на ошибках. ■

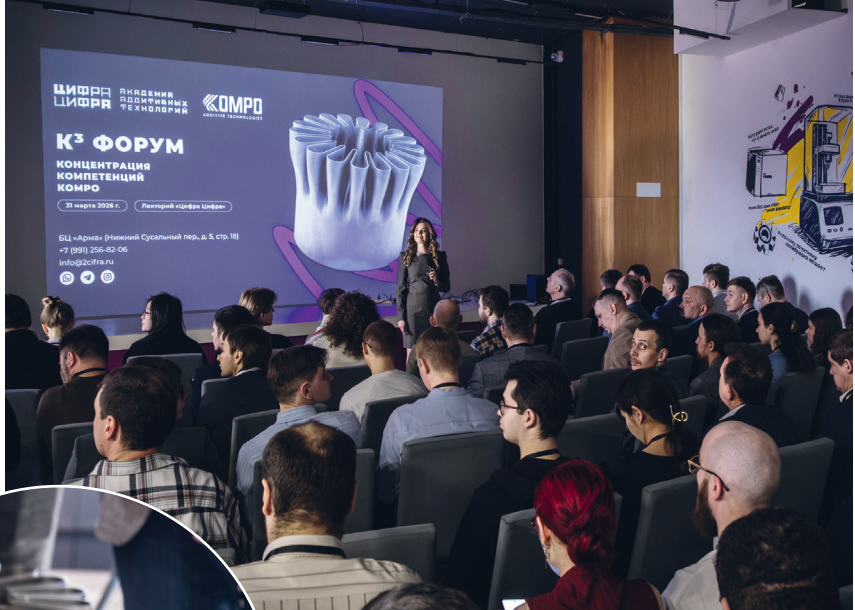


«К³ Форум»: концентрация компетенций КОМПО

В Москве состоялся «К³ Форум» — отраслевое мероприятие, посвящённое практическому применению аддитивных технологий в промышленности, которое объединило более 120 участников — представителей промышленных компаний, инженеров, технологов, разработчиков и интеграторов решений. Организаторами выступили компания КОМПО и Академия аддитивных технологий «Цифра Цифра».

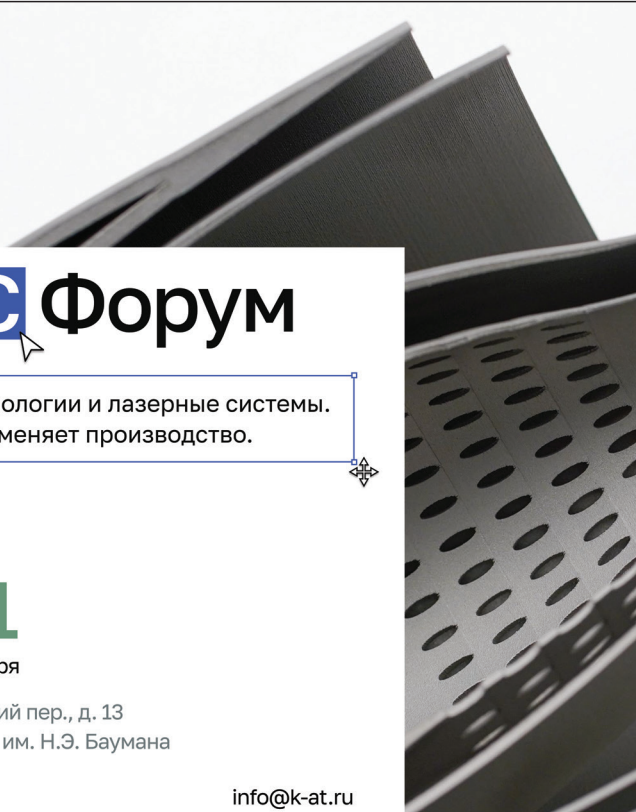
Программа форума охватила ключевые направления аддитивного производства: оборудование, материалы, программное обеспечение и практический опыт внедрения. В рамках мероприятия прошло 5 тематических секций, где участники обсудили реальные кейсы применения технологий, ограничения внедрения и подходы к интеграции аддитивных решений в производственные процессы. Особое внимание было уделено практической стороне: спикеры делились опытом внедрения, разбирали ошибки пилотных проектов и обсуждали, какие решения действительно дают бизнес-результат, а какие требуют доработки.


Форум прошёл в двухдневном формате. В первый день состоялась деловая программа с выступлениями



экспертов и отраслевыми обсуждениями. Второй день включал выезд на производство АО «Композит» в Королёве, где участники смогли ознакомиться с реальными производственными процессами и применением аддитивных технологий на практике.

По итогам форума участники отметили высокий уровень прикладной ценности контента, возможность прямого диалога с экспертами и практическую полезность разбора реальных кейсов. «К³ Форум» подтвердил устойчивый интерес промышленного рынка к аддитивным технологиям и необходимость площадок, где можно обсуждать не только потенциал, но и реальные сценарии внедрения.





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

TOP Additive – системы очистки от порошка деталей аддитивного производства



Одной из наиболее распространенных аддитивных технологий на основе металлов сегодня является технология селективного лазерного плавления (SLM). Поскольку она основана на плавке металлического порошка, одним из ключевых вопросов в условиях промышленного производства является удаление оставшегося порошка из деталей после завершения 3D-печати.



Внутренняя конструкция многих металлических деталей имеет сложную геометрическую форму, при построении деталей их внутренние каналы и полости заполняются порошком, который перед последующей обработкой необходимо удалить. Детали со сложными внутренними каналами, такие как теплообменники или детали газовых турбин, конформные каналы охлаждения, в литьевых формах расположенные по контуру детали, представляют большие сложности для удаления порошка — особенно когда детали большие и тяжелые.

У многих производственных компаний работы по удалению порошка, как правило, выполняются вручную. На первый взгляд, ручная очистка не требует каких-то ноу-хау и может быть выполнена с помощью промышленного пылесоса, обдува сжатым воздухом и очистки щеткой. Но в реальности ручная очистка очень часто не обеспечивает полного удаления порошка и требуемого качества очистки, являясь слабым звеном в процессе

аддитивного производства. Проблемы, с которыми сталкиваются пользователи, включают в себя взрывоопасность некоторых материалов, охрану труда, затраты на персонал, повторное использование порошка, качество очистки и повторяемость процесса.

Для решения этих задач компания TOP Additive — одно из ведущих китайских производителей оборудования для аддитивного производства — производит автоматизированные системы очистки деталей от порошка. Эти установки обеспечивают эффективное и качественное удаление порошка с воспроизводимыми результатами очистки. Детали очищаются в герметичной технологической камере с возможностью подачи инертного газа, используя автоматизированное вращение по двум осям.

Порошок, оставшийся во внутреннем пространстве деталей сложной формы, трудно удалить только путем переворачивания, вакуумного отсасывания и продувки. Поэтому в процессе вращения деталей применяется также ударное воздействие («встряхивание») и вибрация, благодаря которой порошок легко высыпается, что значительно улучшает эффективность очистки. Поскольку форма и размер различных деталей отличаются, для эффективной очистки необходимо использование разных режимов и частот вибрации. Вибрационное устройство может работать в высокочастотном и низкочастотном режимах, которыми можно управлять независимо, а в зависимости от геометрии детали можно выбрать комбинацию режимов для повышения эффективности очистки.

Благодаря эффективным и воспроизводимым результатам при использовании установок TOP Additive удается решить проблему качественной очистки при изготовлении больших и сложных деталей и легче достичь требований серийного производства.

ООО «А-ТЕХ»
www.a-tekh.ru, info@a-tekh.ru

Литература

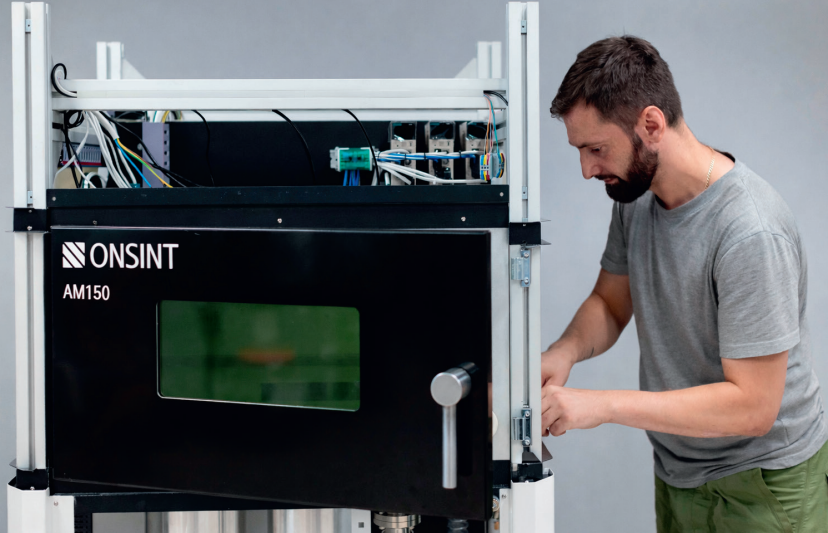
Каталог TOP Additive, 2023.

Посетите наш стенд на выставках в Москве:

«Металлообработка» — 12–15 мая,
павильон 2, зал 8, стенд 8F060

«Росмолд» — 16–19 июня,
павильон 1, зал 2, стенд 2B31

Инженер против принтера



В одном из подмосковных цехов стоит немецкий 3D-принтер стоимостью многие миллионы рублей. Стоит уже который год, накрытый пленкой. Директор предприятия купил его на волне энтузиазма после выставки аддитивных технологий, искренне веря, что машина сама решит проблему дорогой оснастки и длительных сроков изготовления прототипов или пилотных партий продукции. Технолог попытался запустить первую деталь, потратил две недели на настройку параметров печати, испортил несколько килограммов импортного дорогого порошка и в итоге получил изделие, которое треснуло при первом же нагружении. После этого принтер стал самым дорогим предметом интерьера в цехе. Занавес...

Эта история повторяется чаще, чем хотелось бы признать, и она рассказывает не о плохом оборудовании или нерадивых операторах. Она о фундаментальном непонимании природы аддитивного производства. Промышленный 3D-принтер — это как качественная и дорогая скрипка в мире технологий: сам по себе инструмент совершенен, но без виртуозного музыканта, понимающего его акустические тонкости, без правильно подобранного смычка и нот он останется просто прекрасным предметом интерьера. Аддитивное производство требует не покупки, а сложной инженерной экспертизы.

Производители оборудования демонстрируют на выставках безупречные изделия, программное обеспечение обещает автоматизацию всех процессов, а маркетинговые материалы рисуют картину производственной революции в пределах досягаемости кредитной линии. Реальность оказывается более многослойной, причем в смысле, далеком от того процесса, который происходит в рабочей камере принтера. Всем пора бы уже знать, что успешное внедрение — это длительный путь экспедиции

к неизведанной территории, где оборудование — лишь транспорт и снаряжение.

Возьмем селективное лазерное спекание полимеров (PBF/SLS) — технологию, которая кажется относительно простой. Лазер расплавляет только верхний/наружный слой каждой порошинки, тем самым спекая в массе каждый слой. Только вот температура плавления полиамида PA12 составляет около 180 градусов Цельсия, но рабочая камера должна прогреваться до 170 градусов. Казалось бы, десять градусов разницы — чепуха. На практике эта десятиградусная дельта определяет, получится ли у вас функциональная деталь или хрупкая поделка. Если камера перегрета хотя бы на три градуса, порошок начинает спекаться самопроизвольно и вы получаете брак. Если недогрета — деталь деформируется от внутренних напряжений при охлаждении.

Компания «ОНСИИТ», разрабатывая свою линейку SLS-принтеров от компактного SM200 до промышленного SM800, столкнулась с тем, что каждый миллиметр увеличения рабочей камеры требовал переосмысления



Промышленная линейка аддитивных систем ONSINT — оборудование для SLM-печати (печать металлом) AM450, AM350, AM150

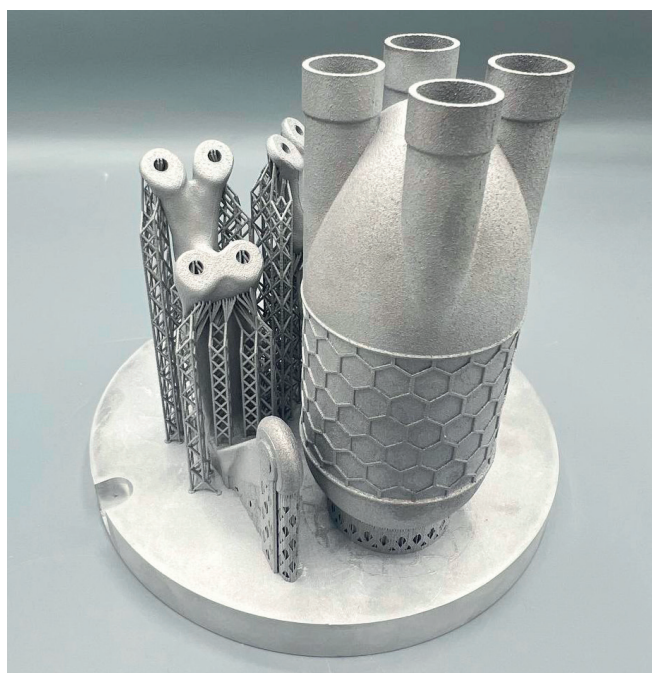
системы термостабилизации. Недостаточно просто масштабировать решение: законы теплопередачи нелинейны, и то, что работает в камере 230×230 мм, категорически не работает в объеме 560×560×570 мм. Инженеры потратили месяцы на разработку системы, которая повышает температурную стабильность по всему объему камеры. Эти месяцы исследований не видны в технических характеристиках оборудования, но именно они превращают «металлический шкаф» в надежный производственный инструмент.

Материальное воплощение идей требует глубокого понимания взаимосвязи между конструкцией, материалом и процессом. Современные промышленные принтеры открывают доступ к работе с широким спектром материалов — от специализированных пластиковых порошков на основе полиуретанового эластомера до высокопрочных титановых и жаропрочных стальных сплавов. Но выбор оптимального материала для конкретной задачи — это целая наука, где инженерная экспертиза выступает в роли переводчика между языком конструктора и языком технологии.

Деталь для робототехники, испытывающая динамические нагрузки, требует совсем другого подхода, чем корпус прибора для электроники, нуждающийся в стабильности размеров, или персонализированный имплант для медицины, где критична биосовместимость. Тот же полиамид PA12, купленный у разных поставщиков, ведет себя по-разному. У одного поставщика порошок с морфологией частиц ближе к сферической, у другого — более вытянутой. Разница в микронах, но она влияет на текучесть порошка, а значит, на равномерность формирования слоя. Требуется корректировка десятков параметров печати: мощности лазера, скорости сканирования, стратегии заливки, температуры подогрева. Каждый новый материал — это неделя экспериментов, килограммы испорченного порошка, десятки тестовых образцов на растяжение, изгиб, ударную вязкость.

Когда предприятие покупает 3D-принтер, оно обычно не учитывает, что приобретает не законченное решение, а полуфабрикат производственной системы. Принтер — это ядро, вокруг которого нужно выстроить инфраструктуру: системы подготовки порошка, постобработки изделий, контроля качества, утилизации отходов. Аддитивные технологии — не изолированный остров, а новый континент, который должен быть соединен мостами с материками традиционных процессов: механической обработки, контроля качества, логистики.

Возьмем металлическую печать по технологии L-PBF/SLM. Титановый порошок после печати нельзя просто высыпать обратно в бункер — он насыщается кислородом, меняет гранулометрический состав, и его характеристики уже другие. Нужна система просеивания, система анализа, протоколы смешивания свежего порошка с переработанным. Без этого вы либо будете печатать только свежим порошком, теряя до 40% материала при каждой печати, либо получать непредсказуемый результат. Профессиональная интеграция требует переосмысления целых цепочек: как спроектировать деталь, чтобы она оптимально печаталась и лишь выборочно фрезеровыва-



Двухконтурный жидкостный теплообменник с внутренней гироидной структурой; топологическая оптимизация кронштейнов. Применение: Космическая отрасль. Материал: RS-320 (AlSiCu). Время печати: 19 часов

лась? Как организовать постобработку? Как обеспечить стабильное качество от партии к партии?

Еще сложнее обстоит дело с проектированием под аддитивное производство. Инженер-конструктор, всю жизнь работавший с традиционными технологиями, мыслит категориями толщин стенок, уклонов, радиусов скруглений. В его голове существуют ограничения: нельзя сделать внутренний канал диаметром меньше сверла, нельзя отлить тонкую решетчатую структуру, нельзя создать полость без технологических отверстий. Аддитивное производство снимает эти ограничения, но вводит свои: углы нависания, необходимость поддержек, направление роста структуры, анизотропия свойств.

Научиться мыслить аддитивно, как сегодня модно говорить, — это не просто освоить новое программное обеспечение. Это переучить мозг видеть структуру материала иначе — не как сплошной монолит, а как систему нагруженных траекторий, между которыми можно и нужно оставлять пустоты (ячейки или топологию). Когда компания «ОНСИНТ» работает с новыми заказчиками, особенно из авиационной и медицинской отраслей, первым этапом идет не обучение работе с принтером, а переосмысление конструкторских подходов. Кронштейн, который в традиционном исполнении весит 800 граммов и требует трех операций механической обработки, можно переделать с помощью топологической оптимизации, получив вес 240 граммов при той же прочности. Но для этого конструктору предстоит не просто освоить новый инструмент — а переосмыслить саму логику проектирования: от монолитных форм к нагруженным траекториям, от привычных допусков — к свободе, которую дает послойный синтез.



ONSINT SM400 — промышленная SLS-система для печати полимера

Сертификация продукции, напечатанной на 3D-принтере, — квест уровня сложности, который большинство предприятий недооценивает. Сертификационные органы привыкли работать с традиционными технологиями, где есть ГОСТы, накопленная статистика, понятные процедуры контроля. Для аддитивного производства многие стандарты только формируются. Как сертифицировать деталь с внутренней решетчатой структурой? Как контролировать пористость в объеме изделия, если разрушающий контроль означает уничтожение единственного экземпляра? Как контролировать процесс печати для обеспечения гарантии отсутствия внутренних дефектов изделий? Требуется выстраивание новых методик, согласование с регуляторами, проведение серий испытаний. «ОНСИИТ», работая с медицинскими заказчиками над персонализированными имплантами, вместе с ними проходит весь путь разработки протоколов валидации производственного процесса — от настройки принтера до финальной стерилизации изделия.

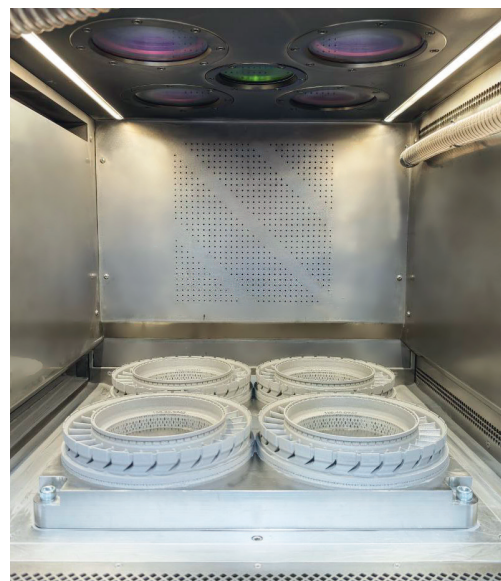
Экономика аддитивного производства тоже обманчива. На первый взгляд калькуляция проста — это сумма стоимости порошка, амортизации оборудования, электричества, работы квалифицированного оператора, оптимизация заполнения камеры и варианты расположения изделий в ней... На практике это лишь верхушка айсберга. Реальная стоимость владения включает также расходные материалы (ролики, ракели, фильтры), зарплату всех квалифицированных специалистов (конструктор, технолог, слесарь, специалист ОТК и др.), брак на стадии освоения, расходы на эксперименты и неизбежные итерации.

Понимание полной стоимости владения и способов ее оптимизации — критически важная часть инженерной экспертизы. Именно поэтому гибкие форматы сотрудничества, такие как лизинг, становятся стратегическим инструментом. Они позволяют предприятию сначала осторожно опробовать новую технологию в своем производственном пространстве и масштабировать использование по мере накопления опыта и уверенности. Для многих деталей 3D-печать экономически целесообразна

только при малых сериях или высокой кастомизации. Попытка заменить аддитивным производством отлаженное массовое литье чаще всего проваливается по экономическим показателям.

Парадокс аддитивного производства состоит в следующем: чем сложнее задача, тем очевиднее его преимущество перед традиционными методами. Стартап RST Space, разрабатывающий космические аппараты малого класса и ракетносители для вывода полезной нагрузки в верхние слои атмосферы, использует промышленные решения «ОНСИИТ» для изготовления методом SLM узлов ракетной техники — турбин, корпусов газогенераторов и камер сгорания. Здесь одновременно предъявляются требования, которые традиционное производство выполняет с трудом или не выполняет вовсе: сложная внутренняя геометрия с охлаждающими каналами, работа при экстремальных температурах и давлениях, жесткие допуски и минимизация массы. Селективное лазерное сплавление позволяет получить цельную металлическую деталь, отвечающую всем этим требованиям, и одновременно сократить количество сборочных операций. «ОНСИИТ» обеспечивает полный технологический контур: печать, контроль параметров плавления и плотности материала, термообработку и механическую доводку. Изготовленные детали проходят испытания и готовятся к установке на испытательный стенд — этап, который переводит технологию из области расчетов в область инженерной проверки реальности.

Не менее показательная ситуация в отраслях, где импортозамещение из политического лозунга превратилось в производственную необходимость. В электронике и приборостроении аддитивные технологии закрывают разрыв там, где поставки зарубежных компонентов и оснастки прекратились: корпусные детали, теплоотводящие элементы, несущие конструкции приборов изготавливаются малыми сериями точно под спецификацию, без ожидания минимальной партии от литейщика. В производстве БПЛА, где геометрия планера меняется от



Печать на 4-х лазерном принтере AM350-4 соплового аппарата



Изделия сложной геометрической формы: 1 — радиатор охлаждения из медного сплава, 2 — камера сгорания ракетного двигателя из жаропрочного сплава, 3 — жидкостный теплообменник из алюминиевого сплава

версии к версии быстрее, чем успевают перестроиться цепочка поставщиков, 3D-печать стала штатным инструментом конструкторского бюро: итерация занимает дни, а не месяцы.

Центральным элементом успеха становится **человеческий капитал**. Самая совершенная машина без команды, понимающей ее философию, потенциал и ограничения, — просто железо. Процесс внедрения — это всегда параллельный процесс обучения и развития компетенций, и здесь недостаточно курсов повышения квалификации на неделю.

Оператор 3D-принтера должен понимать физику процесса, чувствовать машину, замечать малейшие отклонения в работе. Движение лазерного сканатора, равномерность нанесения слоя порошка, температурный градиент при охлаждении — опытный оператор считывает эти параметры интуитивно, предотвращая брак на ранней стадии. Специалисты должны научиться не только нажимать кнопки, но и мыслить аддитивно, предвидеть поведение материала в камере построения, анализировать данные с датчиков принтера для предиктивного обслуживания. Это превращает технологов в инженеров-исследователей, а операторов — в хранителей высокотехнологичного процесса.

Такая квалификация нарабатывается годами. Именно поэтому предприятия, успешно внедрившие аддитивное

производство, стараются удерживать обученных специалистов — каждый ушедший оператор уносит с собой невербализованное знание, которое не записано ни в одной инструкции. Это знание о том, какие маркеры свидетельствуют о качественной работе принтера, когда процесс идет правильно, какой оттенок должна иметь поверхность только что напечатанной детали, и многое другое.

Сервисное сопровождение оборудования — еще один скрытый фактор успеха. Лазер в SLS- или SLM-принтере имеет ресурс, механика подвижных осей изнашивается, уплотнения теряют герметичность, ПО обновляется и улучшается. Все это нормальный износ, но если поставщик оборудования находится на другом континенте, а запчасти идут месяцами через таможню, простой принтера превращается в производственную катастрофу. «ОНСИИТ», будучи российским производителем, обеспечивает сервис на месте, складской запас критичных компонентов, удаленную техническую поддержку. Это кажется мелочью на этапе покупки, но оказывается критично в эксплуатации.

Развитие аддитивного производства на предприятии редко останавливается на одном принтере. Начав с печати прототипов, компания понимает возможности технологии и расширяется: добавляется оборудование для других материалов, для больших габаритов, для



Линейка SLM оборудования ONSINT — AM650, AM350–4



Линейка SLS оборудования ONSINT — SM500, SM800

серийного производства. Выстраивается экосистема: инженерный отдел переобучается на проектирование под 3D-печать, технологи осваивают новые материалы, создается участок постобработки, внедряются системы контроля качества. Это органический рост, и его невозможно купить вместе с принтером — он выращивается экспертизой, ошибками, накопленным опытом.

Именно на этом этапе компании, предлагающие комплексный подход, демонстрируют свою ценность. «ОНСИИТ», поставляя оборудование, не ограничивается пусконаладкой и базовым обучением. Специалисты компании погружаются в задачу заказчика, вместе с технологами предприятия проводят серии экспериментов, подбирают параметры, обрабатывают постобработку, помогая адаптировать под новое оборудование бизнес-процессы — от прототипирования до мелкосерийного производства. Потому что принтер сам по себе — это просто железо и программа. Работающая производственная ячейка создается знанием и опытом.

Инженерная экспертиза при внедрении аддитивных технологий начинается задолго до покупки принтера. Это экспедиция, где нужен картограф в лице эксперта по проектированию под аддитивное производство, геолог-материаловед, опытный проводник — интегратор технологий и хорошо обученная команда. Нужен аудит производства: какие детали вы производите, какие объемы, какие требования по механическим свойствам, какие

сроки, в каких условиях работает деталь, какие имеются сопряжения в узле. Из тысячи позиций номенклатуры для 3D-печати могут подойти двадцать, но именно эти двадцать могут дать критическое конкурентное преимущество.

Затем идет выбор технологии и оборудования — и здесь решение определяется не характеристиками из брошюры, а тем, насколько принтер встраивается в существующий производственный процесс, насколько доступен сервис, насколько широка линейка материалов. После установки принтера начинается самое интересное: разработка технологических режимов для конкретных деталей. Это не берется из инструкции — это эмпирический процесс, где опыт инженера критичен.

Когда директор того подмосковного предприятия задался вопросом, почему его дорогой принтер не работает, ответ был не только в технических причинах. В этот момент необходимо задаться вопросами: «А кто мог настроить режимы печати для вашей специфической номенклатуры? Кто адаптировал конструкции деталей под аддитивное производство? Кто разработал систему входного контроля порошка?» Казалось бы, принтер был куплен как готовое решение, а получилась дорогая головоломка без инструкции по сборке.

Будущее производства определяют не владельцы дорогостоящего оборудования, а те, кто способен превратить технологии в инновации благодаря инженерной экспертизе. Российские компании, такие как «ОНСИИТ», предлагают не просто принтеры, а отраслевые технологические решения для авиации, медицины и машиностроения. Аддитивное производство — это не приобретение техники, а трансформация производственной культуры, где оборудование служит инструментом в руках знающих специалистов. Синергия инженерии, дизайна и материаловедения превращает затраты в инвестиции в новые продукты и рынки. Без инженерного сопровождения промышленный 3D-принтер — лишь дорогостоящий артефакт. ■



Центр аддитивного производства ОНСИИТ

ONSINT

onsint.ru

Реклама

Центр SLM-печати: скорость качество уникальность



В области аддитивного производства объем услуг на мировом рынке превышает объем производства оборудования и материалов. В России центры аддитивных технологий только начинают развиваться, но уже есть понимание, что их работа востребована и обеспечивает эффективное решение промышленных задач ускоренными темпами. За счет чего это происходит, как организована работа коммерческого центра аддитивных технологий на примере своей компании редакции рассказал генеральный директор ООО «МЕТАЛЛ-СПРИНТ» Арсений Ульченков.

Арсений Михайлович, Вы сделали ставку на аддитивные технологии. Почему? И какова специализация центра?

С середины 2000-х годов в бурных и продолжительных спорах с товарищем — директором серьезного завода, который производил для сборочного производства все, кроме стекла, резины и двигателей, я отстаивал точку зрения, по которой аддитивные технологии всегда будут иметь лишь ограниченную нишу применения. Но на волне многолетнего интереса к тематике аддитивных технологий был накоплен довольно большой объем знаний, поэтому в 2018 году, когда встал вопрос об инвестировании, я уже понимал, что российский рынок аддитивных технологий (АТ), все еще отстающий от зарубежного, в какой-то момент начнет бурно расти. В связи с этим были приобретены две двухлазерные машины SLM-280 компании SLM Solutions. И именно они изначально определили направление деятельности компании «МЕТАЛЛ-СПРИНТ» как производителя металлических деталей сложной формы методом селективного лазерного плавления. Компания продолжает работать по этой технологии все эти годы.

Мало того, получив опыт работы с данным оборудованием, в 2021 году, когда компания SLM Solutions ушла с российского рынка, мы взяли на себя смелость проводить сервисное обслуживание практически всех ее машин, которые работают в России.

С тех пор Ваше производство расширилось? Какое оборудование у вас представлено?

Дополнительно были приобретены по две SLM-машины китайских компаний ZRapid Tech и Kings, которые рас-

ширили наши возможности по крупногабаритной печати, а также позволили увеличить серийность партий и ускорить перестройку оборудования под печать различными материалами. Максимальный габарит наших изделий на текущий момент 420×420×470 мм. Мы работаем с четырьмя видами алюминия, четырьмя видами нержавеющей стали, с большим разнообразием жаропрочных сплавов, тремя видами титана (BT1, BT6 обычный и медицинский), бронзой, медью и так далее, т.е. можем предложить заказчику большой спектр материалов.

А отечественные порошки используете?

Российские порошки довольно дорогие, кроме, пожалуй, алюминия, поэтому в основном используем китайские порошки от проверенных поставщиков, чью продукцию протестировали изначально на состав, текучесть и так далее. Поскольку различие в цене достигает 3 и более раз, заказчик обычно согласен с нашим выбором. Но, если у заказчика есть требование использовать отечественный порошок, мы его выполняем; российские производители устраивают во всех отношениях — за исключением, как было упомянуто, цены.

Какой еще спектр услуг Вы оказываете на базе своего центра или у партнеров? Вы упомянули ГИП...

Мы считаем, что обязательной термообработки требует только титан. Это довольно сложный материал, и, если сохраняются остаточные напряжения, то деталь может просто разбиться — например, при падении. Все остальные материалы обрабатываются по запросу заказчика. Если термообработка не очень сложная, не требует вакуума или охлаждения потоком газа, мы делаем ее



у себя. У нас есть хорошая муфельная печь. Что касается ГИП, то это процедура более дорогостоящая и редкая. Но, если заказчик заинтересован в ГИП, мы готовы это сделать. У нас есть несколько контрагентов, которые с этим помогают. Конечно, в данном случае нужно понимать, зачем это делается. Например, в ходе ГИП, алюминий довольно сильно теряет в прочности, но при этом приобретает существенную пластичность. Если говорить про трёхсотый алюминий, то в нем вместо удлинения на разрыв 12%, появляется удлинение на разрыв 40%; но и предел прочности снижается на 15–20%. Нужно ли это?

На технологические исследования Вы тоже готовы?

Когда мы создавали компанию, хотели ограничиться чисто производством, никакой инженерии, науки. Но — к лучшему или к худшему — так не получается. Мы достаточно близко сотрудничаем с университетами МИСИС, МАИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана и др. Для них мы строили образцы из различных материалов в разных режимах, отработывали оптимальные режимы. Научные и околонаучные задачи нам сейчас не менее интересны, чем производственные.

Какие преимущества у Вашего центра?

Мы работаем на высокотехнологичном оборудовании и имеем большой опыт производства, поэтому обеспечиваем быстрое и качественное изготовление деталей,

в том числе уникальных, беремся за реализацию сложных проектов, предлагаем оптимальные цены. В нашем демонстрационном зале можно получить исчерпывающую консультацию и ознакомиться с выполненными образцами. Показывая заказчику возможности технологии и анонсируя свои возможности, мы в тоже время ведем просветительскую работу. И, главный момент, мы ориентированы на серийное производство. Возьмем для примера компанию, у которой одна машина. В случае большой серии она занята одним материалом и 3–4 месяца других изделий производить не может. Из наших шести машин одна всегда выделена под титан, другие могут быть распределены по необходимости, например, две — под алюминий, две — под инконель, одна — под жаропрочный сплав. Бывает, что оборудование ломается и требует ремонта, мы имеем возможность перевести срочный заказ на другую установку. Мы показали себя надёжным поставщиком.

Можете привести примеры изделий, которые отражают ваши технологические возможности?

Самые-самые — не могу. Но вот, например, у нас был заказ на некие расходные изделия для промышленной тяжёлой швейной машины. Мы их делали сотнями. Заказчик был очень доволен, а потом еще нашёл способ, как увеличить их ресурс за счет нанесения специального покрытия. В результате они по сравнению с немецкими, которые держались по две недели, выдерживают по несколько месяцев. Получили изделие лучше оригинального. В этой связи, конечно, можно вспомнить про импортозамещение.

Или попросили нас сделать шестерни с высокой нагрузкой на зуб для относительно компактного механизма. Эта шестерёнка так хорошо себя показала, что единственным минусом стал напильник, стертый во время ее доработки.

Кто Ваши главные заказчики?

Среди заказчиков есть и малые, и крупные предприятия. Три-четыре компании делают 80% нашей выручки.

Они не хотят купить свою машину?

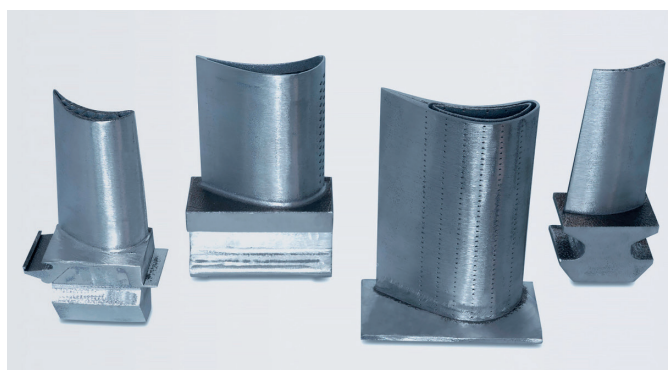
Во-первых, мы выставляем такие цены, что им, в общем-то, выгоднее покупать у нас, чем делать самим. Во-вторых, у них большая номенклатура изделий, и за



Импеллер. Материал — TiAl6v4



Кронштейн-подставка. Материал — AlSi10Mg



Макеты турбинных лопаток, Материал — AlSi10Mg.

счет покупки одной машины не получится оптимизировать экономику процесса. То есть, они размышляют, но пока пользуются нашими услугами.

За счет чего в ЦАТ оптимизируется цена?

Есть несколько факторов. Во-первых, за счёт понимания экономики. К сожалению, когда люди рассматривают покупку 3D-принтера, у них зачастую существует несколько искаженное представление об экономике процесса. Например, неприятным сюрпризом становится то, что на килограмм изделий надо потратить гораздо больше порошка, чем килограмм.

Также мы можем лавировать между нашими машинами. Например, мы убедились, что китайские машины чуть медленнее строили изделия, которые ранее производились на немецких машинах. Мы считаем время для различных установок и выбираем ту, которая будет работать быстрее и эффективнее. И, как было упомянуто, одна из самых больших возможностей оптимизации производства в скорости смены материала. Если, например, идёт большая серия из трёхсотого (AlSi10Mg) алюминия, и возникает небольшой заказ на триста двадцатый (AlSi11Cu) алюминий, надо сменить на короткое время марку алюминия. У нас такой переход занимает два часа. Это удорожает заказ, но не на много, и заказчик на это удорожание зачастую готов пойти. Если переход делать дольше, эффективность работы падает, стоимость растёт.

А задачи реверс-инжиниринга вы решаете только в части 3D-печати или работаете с заказчиком от детали, которую нужно произвести?

Мы предпочитаем, чтобы сканирование, моделирование выполняла более профессиональная компания. С их результатами работать легко и приятно, но как правило, их услуги дороги. Если для заказчика стоимость критична, можем сами сделать.

А для себя вы что-то печатаете, например, запчасти к машинам?

Бывает; например, напечатали сопло для машины SLM Solutions, через которое идет инертный газ. Оно изначально по каким-то причинам было из пластика. Разумеется, пластик при повышенной температуре выдерживал пару лет и начинал трескаться. Мы изготовили



Рабочее колесо. Материал — AlSi10Mg

сопла — на обе машины — из алюминия; думаем, теперь они выдержат весь срок эксплуатации принтеров.

Вы готовы к масштабированию?

Конечно, мы готовы к масштабированию. Вопрос только в наличие крупных твердых заказов по договорам «Take or Pay» или даже с созданием СП. Мы уже по количеству машин увеличились в три раза. Скорее всего две-три машины прибавим в течение этого года. Процесс налажен, и новых людей мы также регулярно принимаем и обучаем.

Готовы ли вы закупать отечественное оборудование?

Для меня критерий качества машины — ее способность работать с титаном. Насколько я себе представляю, оборудование российской компании с титаном пока ещё работает не очень хорошо. Титан вообще достаточно сложный материал. У нас, например, две немецкие машины одной компании. Одна строит хорошо, а другая не очень, хотя, казалось бы, почти одинаковые. Поэтому мы только присматриваемся к российскому оборудованию.

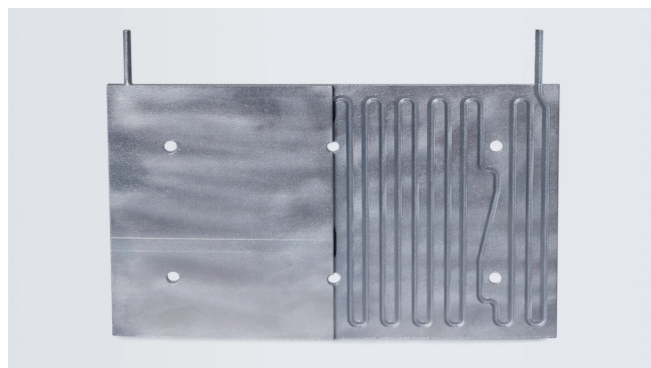
Российский рынок 3D-печати довольно мал.

Как Вы оцениваете его потенциал?

Он, может быть, и не очень велик, но растёт быстро. Скорость роста гораздо выше, чем была бы в нормальной ситуации. Многие заказчики готовы, как минимум, рассматривать для применения непривычные для них технологии. Хотя все зарегулированные отрасли, конечно, более консервативны, чем хотелось бы видеть. Но я пока, во всяком случае, не припомню такой истории, чтобы можно было бы сказать, что наши технологии где-то категорически не подошли — по причине отличной от цен (да, наши технологии недешевы). Я говорю всем заказчикам, у нас такой же металл, только лучше — лучше проката, лучше литья и других способов изготовления. Поэтому мой прогноз развития рынка позитивный. ■

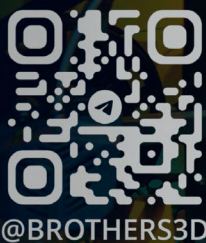
МЕТАЛ СПРИНТ

Россия, 141004, Московская обл., г. Мытищи,
ул. Силикатная, д. 19с14
Тел.: +7 (499) 286-32-23,
info@metal-sprint.com, https://metal-sprint.com/



Плоский теплообменник толщиной около 3.5 мм с внутренним сложным каналом, Материал — AlSi10Mg

ФАБРИКА БРАТЬЕВ ПРОСВИРНИНЫХ



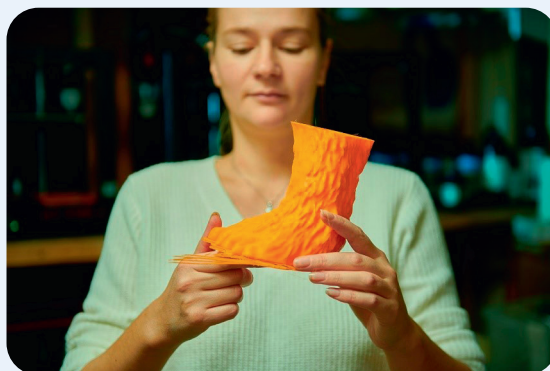
@BROTHERS3D

Первая и крупнейшая
в России ферма 3Д печати

Первый коммерческий детский технопарк с шестью принтерами, открытый в 2015 году в Москве командой бауманцев, предпринимателей и новаторов, стал отправной точкой амбициозного проекта по созданию уникального промышленного пространства. Здесь разрабатываются инновационные решения, которые ускоряют производство, повышают точность и качество изделий, предлагаются эффективные инструменты для индустрии будущего.

«МЕРИТОГРУПП» сегодня

- Лидеры, которые не повторяют, а задают стандарты.
- Первая и крупнейшая в России ферма 3D-печати
- Мыслят как инженеры, действуют как лидеры
- Выявляют потребности и создают возможности.
- Воплощают любой замысел в готовую продукцию.



24 000+
Выполнили заказов
1500+
Принтеров
3 000 000+
Изготовили изделий

Широкий спектр предложений

Услуги 3D-печати: FDM, SLA, SLS — разнообразие технологий для решения задач любой сложности; использование материалов от стандартных (PLA, PETG, ABS) до специализированных композитов и нейлона.

Постобработка и покраска: достижение идеального внешнего вида и функциональности изделия.

Инжиниринг и 3D-моделирование: создание уникальных проектов с учетом ваших требований.

3D-сканирование и литье в силиконовые формы: точные копии объектов и малосерийное производство.

Преимущества лидера

- Производство нового типа: от прототипов и интерьерных решений до деталей для БПЛА, корпусных элементов, плафонов и медицинских фиксаторов.
- Скорость и масштаб: реализация объектов длиной 16 метров за 30 дней, тиражи от 1 до 15 000 штук — всё с контролем качества и полной повторяемостью.
- Инженерный подход: собственное КБ с выпускниками МГТУ им. Баумана, глубокая проработка изделий, реверс-инжиниринг, замена литья и мехобработки.
- Серийное и контрактное производство: от стартапов до крупного ритейла. Печатаем не детали — печатаем правила игры.
- Импортозамещение: оперативное воспроизводство недоступных компонентов — от сельхозтехники до корпусов электроники и оборонных изделий.
- Локальное присутствие: активная работа с клиентами из Москвы, Санкт-Петербурга, Нижнего Новгорода и Тулы.
- Минимальный заказ от 5000 рублей и четкая ценовая политика.



Проекты 2025 года, которыми можно гордиться

- «Космолёт» — экспозиционный объект длиной 16 м для павильона Башкортостана на выставке «Россия» на ВДНХ.
- Серийное производство дизайнерских светильников и плафонов для федеральных сетей.
- Изготовление 20 макетов вагонов метро за 7 дней к 90-летию Московского метро — с внутренней подсветкой.
- Оснастка для БПЛА и оборудование для измерительной техники.

Миссия

Создание экосистемы, где инновации становятся доступными для каждого. Цель — сделать 3D-технологии неотъемлемой частью производственных, дизайнерских и образовательных процессов.

С «МЕРИТОГРУПП» вы можете рассчитывать на экспертность, качество и надежность в каждом проекте. Специалисты компании готовы к новым вызовам, чтобы помочь вам реализовать самые амбициозные идеи.



AmPro расширяет возможности коммерческой аэрокосмической отрасли

Применение 3D-печати металлом в аэрокосмической промышленности становится новым стандартом в отрасли, 3D-печать способствует экономии средств и значительно повышает эффективность производства.

Компания AmPro использовала крупногабаритное металлическое оборудование для 3D-печати — 3D-принтер SP600 для печати компонентов многослойных сопел с регенеративным охлаждением, совершив технологический прорыв! Размер сопла достигает 400x400x600 мм, а время печати — всего 168 часов, при чрезвычайно высокой стабильности печати.

AmPro SP600 SLM-3D-принтер

Предназначен для изготовления индивидуальных изделий и функциональных прототипов большого размера, а также средне- и крупносерийного производства изделий.

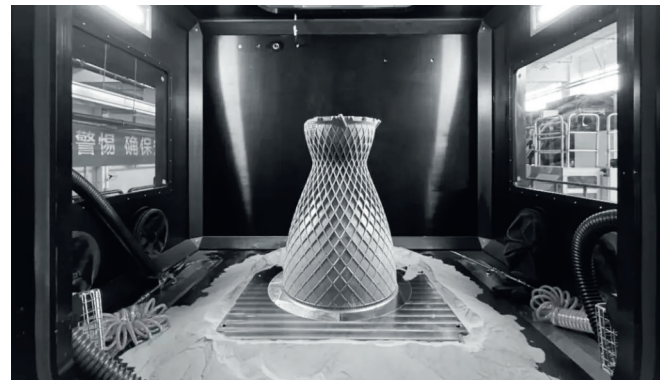
- Камера построения 600x600x800 мм.
- Подходит для опытных, средних и больших производств, исследовательских и инжиниринговых центров.
- Шесть 500-ваттных IPG-лазеров.
- Настраиваемые параметры печати для металлических порошков от любых производителей.
- Автоматическая система подачи металлического порошка в больших количествах.
- Специально разработан для высокоавтоматизированного производства.



Оборудование AmPro SP600 оснащено передовой мультилазерной системой, которая использует самостоятельно разработанную технологию мультилазерного сканирования и алгоритм калибровки, который позволяет точно контролировать и планировать траекторию мультилазерного сканирования. Технология Dynamic Iar, обеспечивая эффективность печати, гармонизирует весь формат печати и позволяет избежать неточностей при печати, вызванных круговым сканированием лазера.

Оборудование AmPro SP600 также оснащено встроенной полностью автоматической системой циркуляции порошка, которая обеспечивает эффективную транспортировку порошка, интеллектуальную систему его восстановления и автоматическое просеивание, что значительно повышает производительность оборудования,

т.к. процесс печати идет постоянно и в автоматическом режиме. Ручная замена порошка обычно отнимает много времени и может даже привести к прерыванию процесса печати. Кроме того, система AmPro работает в среде инертного газа, что значительно повышает безопасность производства.



Сопло ракеты в камере построения 3D-принтера AmPro SP600. Фото AmPro

Технология двустороннего интеллектуального нанесения порошка с регулируемой скоростью также является ключом к эффективной печати на оборудовании AmPro SP600. По сравнению с традиционной односторонней подачей порошка конструкция двусторонней подачи сокращает время недопустимого возвратно-поступательного перемещения планки разравнивания. Кроме этого, в процессе нанесения порошка можно автоматически регулировать скорость его нанесения, что позволяет ускорить процесс печати до 20%. Таким образом, компания AmPro благодаря передовому техническому процессу SLM-печати успешно реализовала печать сложных сопел ракет за 168 часов, продемонстрировав широкие возможности и перспективы SLM-3D-печати металлом для коммерческой аэрокосмической отрасли.

Технология 3D-печати металлом сулит значительные экономические выгоды коммерческим аэрокосмическим компаниям, повышая их конкурентоспособность, а также способствует непрерывным инновациям в аэрокосмической отрасли.

Компания «Аврора Карбон Технолоджи» — официальный партнер компании AmPro в России и странах Таможенного союза.

Триботехнический фотополимер для изготовления износостойких деталей от HARZ Labs

Технология настольной фотополимерной 3D-печати позволяет изготавливать изделия с высокой точностью, детализацией и качеством поверхности. Благодаря этому она представляет интерес для производства малогабаритных деталей механизмов, работающих в узлах трения, например, зубчатых колес.

Однако традиционные фотополимерные материалы, как правило, не обладают высокой износостойкостью. Многие представленные на рынке материалы при работе в узлах трения быстро изнашиваются и теряют работоспособность. В связи с этим был разработан фотополимер с антифрикционным наполнителем, предназначенный для подобных задач.



Рис. 1. Машина трения для проведения испытаний

В качестве основы использовался фотополимер, близкий к полиамиду по механическим свойствам и характеризующийся повышенной ударной вязкостью, значительным удлинением при растяжении и более высокой трещиностойкостью.

Триботехнические свойства материала оценивали по стандарту ASTM G99 методом «пин-диск».

По результатам испытаний образца HARZ Labs Industrial Low Friction линейный износ составил 200 мкм при пути трения 5760 метров (табл. 1).

Для сравнения были приведены данные для немодифицированных фотополимеров (табл. 2).

Полученные результаты показывают, что при пути трения, близком к 6 км, износ образца составил всего 200 мкм, что значительно меньше по сравнению с обычными фотополимерами.

Дополнительно для подтверждения износостойкости материала было проведено испытание на истираемость по Таберу, по стандарту ASTM D4060–19 (табл 3).

Таблица 3

Циклов	Нагрузка, г	Абразив	Потеря массы, мг
5000	2x1000	CS17	30±20

Примеры использования материала

В качестве примера практического применения компания Cube 3D апробировала материал при изготовлении шестерней картриджа принтера. По отзывам компании, материал отличается высокой детализацией и представляет интерес для инженерных применений. Также были изготовлены шестерни различных механизмов автомобилей, которые показали работоспособность в эксплуатации.



Рис. 2. Шестерни картриджа принтера от Cube 3D

Материал HARZ Labs Industrial Low Friction уже доступен в линейке продуктов и может быть приобретен на сайте harzlabs.ru или у партнеров.

Таблица 1

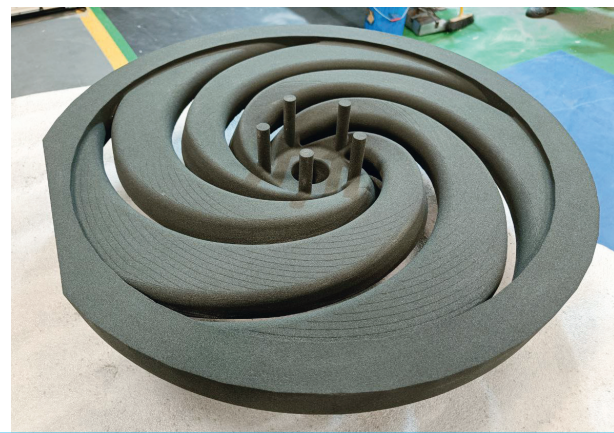
Материал пина	Линейный износ h, мкм	Путь трения L, м	Коэффициент трения покоя	Коэффициент трения скольжения средний
HARZ Labs Industrial Low Friction	200	5760	0,614	0,461

Таблица 2

Материал пина	Линейный износ h, мкм	Путь трения L, м	Коэффициент трения покоя	Коэффициент трения скольжения средний
Гибкий фотополимер	3102,9	4943,2	0,616	0,576
Твердый фотополимер	2584,0	2885,8	0,686	0,696

AVP ZIAS — от оборудования к комплексным решениям.

Как технология Binder Jetting трансформирует литейное производство



В условиях глобальной технологической конкуренции и курса на импортозамещение российские предприятия ищут пути кардинального повышения эффективности производства.

Сегодня литейные предприятия сталкиваются с принципиально новыми требованиями: мало получить современное оборудование — нужен надёжный технологический партнёр, способный сопровождать весь жизненный цикл проекта. Рынок перешёл от разовых сделок к запросу на долгосрочное сотрудничество, основанное на глубоком понимании специфики литейных производств, их ограничений и точек роста.

Именно на этот вызов отвечает компания **AVP ZIAS** — российский разработчик промышленных 3D-принтеров и технологический интегратор для литейной отрасли.

«Мы не просто поставляем оборудование. Мы становимся частью вашего производственного процесса, беря на себя ключевые этапы и обеспечивая предсказуемый результат», — отмечает генеральный директор ООО «АВП Инновации» Александр Неткачев.

Для реализации стратегии комплексного сервиса AVP ZIAS последовательно переносит ключевые этапы производства внутрь компании. Это позволяет выстроить замкнутый цикл контроля и минимизировать риски, связанные с внешними поставщиками.

Компания не только разрабатывает технологии, но и самостоятельно изготавливает опытные и серийные отливки. Это даёт возможность:

- тестировать новые материалы и режимы в реальных условиях;
- отрабатывать технологии под конкретные задачи заказчика;
- гарантировать качество конечного продукта на всех этапах.

В группе компаний организовано изготовление модельно-стержневой оснастки для комбинированных решений — сочетания аддитивных и традиционных методов. Результат:

- снижение зависимости от внешних поставщиков оснастки;
- сокращение сроков подготовки производства;
- гибкая адаптация под изменения в конструкции детали.

Специалисты компании ведут НИОКР в области:

- подбора и синтеза новых связующих для литейных форм;
- адаптации песчаных смесей под специальные жаропрочные сплавы;
- оптимизации режимов сушки и обжига для повышения точности геометрии.

Стратегия полного цикла: почему это работает?

Современному предприятию недостаточно просто приобрести 3D-принтер. Успешное внедрение аддитивных технологий требует гарантированного доступа к качественным расходным материалам, глубокой инженерной поддержки на этапе интеграции и оперативного сервисного сопровождения на протяжении всего жизненного цикла оборудования.

Именно на этом принципе строит свою работу компания AVP ZIAS.

Мы разрабатываем и производим установки серии ZIAS BPrint, обеспечиваем их расходными материалами, проверяем технологии на собственном литейном производстве и предоставляем сервисную поддержку любого уровня. Такой подход позволяет создавать не просто





оборудование, а готовые, отлаженные производственные процессы, которые заказчик может запустить у себя под ключ.

Мы сами используем то, что производим, тестируя каждое решение на собственном производстве. Это даёт нам уникальный практический опыт и позволяет понимать все тонкости технологии изнутри.

3D-принтеры ZIAS BPrint работают по технологии Binder Jetting, которая уже много лет служит отраслевым стандартом на европейских литейных предприятиях. Её широкое применение обусловлено рядом ключевых преимуществ:

- существенное сокращение сроков изготовления детали: форма изготавливается за 1–2 дня вместо 2–4 недель традиционным;
- свобода геометрии, не достижимая при классическом моделировании;
- снижение зависимости от ручного труда.

Кроме того, цифровая модель гарантирует идентичность каждой детали в серии, а неиспользованный песчаный порошок возвращается в производственный цикл, обеспечивая экономию материалов.

Оборудование AVP ZIAS уже доказало свою эффективность в реальных производственных условиях. 3D-принтеры серии ZIAS BPrint успешно работают на ведущих литейных предприятиях России и Белоруссии. Все установки оснащены собственным ПО, поддерживают интеграцию с корпоративными ERP-системами

и адаптированы к работе с отечественными расходными материалами, что критически важно для предприятий аэрокосмического и оборонного комплексов.

В 2025 году компания AVP ZIAS совершила знаковый шаг, запустив собственное литейное производство. Предприятие готово принимать заказы на высокоточные металлические отливки, предлагая полный производственный цикл «от идеи до готовой детали».

В эпоху, когда технологический суверенитет перестал быть лозунгом и стал условием конкурентоспособности, такой шаг звучит особенно весомо. AVP ZIAS не просто поставляет решения, а доказывает их работоспособность на собственном примере.

AVP ZIAS демонстрирует, как сочетание отечественной инженерной мысли, производственной дисциплины и клиентоориентированного сервиса позволяет создавать решения, выходящие далеко за рамки стандартной поставки оборудования. Такой подход становится надёжным фундаментом для технологической трансформации производств в нашей стране и за её пределами.

На одной из ключевых отраслевых площадок — международной выставке «Металлообработка – 2026» в «Крокус Экспо», г. Москва — компания AVP ZIAS представит свой технологический флагман: **промышленный 3D-принтер ZIAS BPrint Maxi**. Приглашаем на наш стенд **1C 080** обсудить перспективы развития и партнерство.

zias-machinery.ru



Реклама

INTAMSYS FUNMAT PRO 610HT: новое поколение крупногабаритной промышленной печати по технологии FDM



- Максимальная температура экструдера **500°C**
- Камера с постоянной температурой **до 300°C**
- Крупногабаритная камера печати **610×508×508 мм**

FUNMAT PRO 610HT — флагманская модель в линейке 3D-принтеров INTAMSYS.

Его высокотемпературная камера печати обеспечивает постоянную температуру 300°C и имеет два экструдера с нагревом хотэнда до 500°C.

Благодаря двум экструдерам FUNMAT PRO 610HT идеально подходит для печати крупногабаритных изделий из функциональных полимеров, таких как PEEK, ULTEM™ (PEI), PPSU и других.

Основные характеристики

- Объем печати до 610×508×508 мм, что позволяет печатать крупные детали или изделия мелкой серией.
- Высокотемпературная камера печати — до 300°C, что позволяет избежать деформации деталей, т.е. высокую повторяемость изделий.
- Высокотемпературные сопла, выдерживающие температуру до 500°C.
- Открытая система материалов: FUNMAT PRO 610HT может работать практически с любыми высокопроизводительными термопластичными материалами, представленными на рынке, включая PEEK, PEKK, PAEK, ULTEM™, PPSU, ПК, ПА, ASA, АБС и другие.



- Отсек для четырех больших катушек филамента с подогревом.

Интуитивно понятный интерфейс с сенсорным экраном, что упрощает навигацию и настройку параметров.

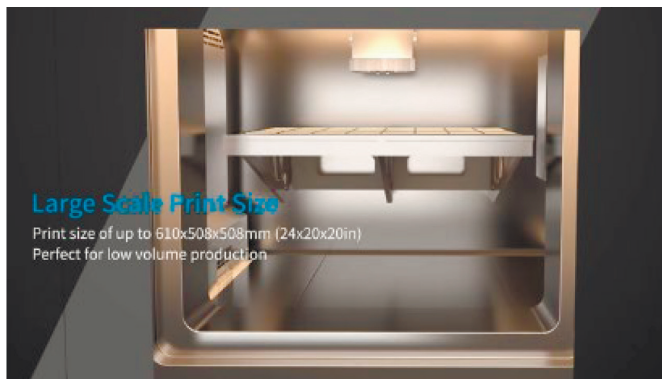
Печать филаментами от любого производителя, включая российских



FUNMAT PRO 610HT — это 3D-FDM-принтер, ориентированный на высокопроизводительные материалы.

Однако, как и любой другой 3D-принтер INTAMSYS, он может работать с филаментами любого бренда, представленного на рынке.

Промышленный 3D-принтер с крупногабаритной камерой печати



FUNMAT PRO 610HT имеет зону построения объемом 610×508×508 мм.

3D-принтер с интеллектом

Funmat 610HT имеет систему предупреждения о замятии филамента и его отсутствии, производит автоматическую калибровку, самостоятельный перевод печати с одной катушки на другую, что важно, когда принтер рассчитан для работы 24/7.



Automatic Reloading of Filament
Allows for days of continuous printing

Четыре отсека для катушек филамента с регулируемой температурой

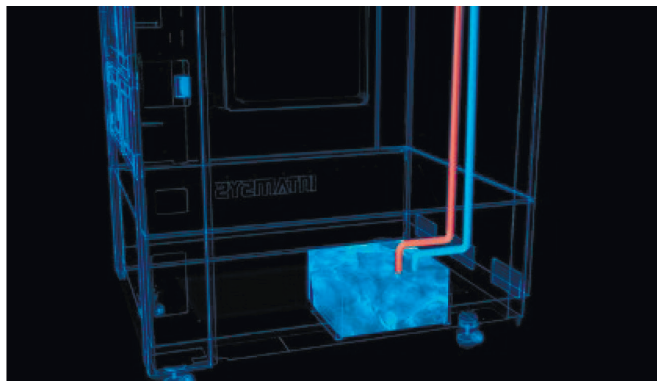
Активная система сушки для обеспечения оптимального качества печати филаментов непосредственно перед печатью.



Four Filament Chambers
Active drying system to ensure optimal print quality

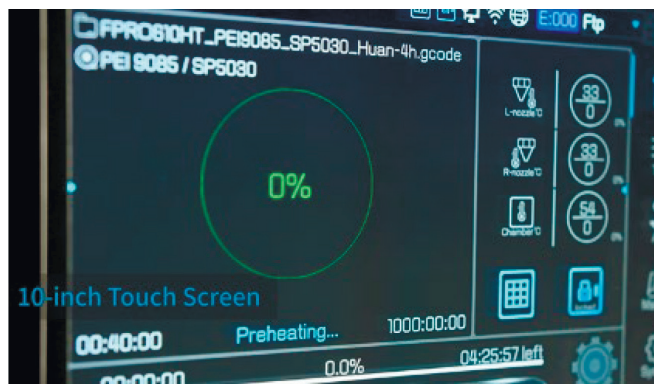
Система жидкостного охлаждения

Позволяет избежать перегрева печатной системы при рабочей температуре камеры построения до 300°C



10-дюймовый сенсорный экран с удобным интерфейсом

Интуитивно понятный интерфейс сенсорного экрана упрощает навигацию и настройку параметров.



Технические характеристики INTAMSYS FUNMAT 610HT

Технология печати	FDM (FFF)
Объем камеры печати	610×508×508 мм
Прижим подложки стола	С помощью вакуума
Выравнивание стола	Автоматическое
Толщина слоя печати	0,05–0,5 мм
Скорость печати	XY: макс. 500 мм/с; Z: макс. 300 мм/с
Количество экструдеров	2 высокотемпературных экструдера
Температура экструдера	Макс. 500 °C
Температура в камере печати	Макс. 300 °C
Температура в отсеке филамента	Макс. 70 °C
Типы файлов	STL, OBJ
Диаметр филамента	1,75 мм/2,85 мм
Точность хода	XY: 12 мкм; Z: 7 мкм
Система привода экструдера	Высокоточная сервосистема
Интеллектуальная система управления	Автоматическая очистка сопел, предупреждение о замятии и отсутствии нити филамента, автопозиционирование после сбоя питания, водяное и активное воздушное охлаждение печатной системы, защита от перегрева
Сертификаты безопасности	FCC и CE
Возможность подключения	Wi-Fi, интернет, USB
Поддерживаемые материалы	Практически все известные материалы, включая PEEK, PEEK+CF, PEKK, ULTEM (PEI), PPSU, ПК, сплавы ПК, PA, PA+CF, ABS, с наполнителем из углеродного волокна, с металлическим наполнителем, с наполнителем из стекловолокна, ASA, PETG, ESD-безопасный, HIPS, TPU, PLA, PVA и т. д.

По вопросам демонстрации, включая тестовую печать всеми материалами в Москве, обращаться в компанию Z-axis, которая является официальным партнером INTAMSYS в странах Таможенного союза.

www.z-axis.ru

INTAMSYS в России под брендом KOSIGNUM

www.kosignum.ru

Точность, которой можно доверять: как современные 3D-сканеры меняют подход к инженерным задачам



Еще десять лет назад процесс измерения сложной детали и сбора исходных геометрических данных для проектирования новых корпусных элементов требовал значительных временных затрат, а также предполагал проведение ручных обмеров с нерегламентированной погрешностью, построение эскизных чертежей по визуальным оценкам и приводило к систематическим ошибкам сопряжения на этапе подгонки. Сегодня цифровизация физических объектов стала повседневным инструментом инженера. Там, где раньше царили штангенциркули и лекала, теперь работают портативные 3D-сканеры, превращающие реальный мир в точные полигональные модели.

На российском рынке эту трансформацию поддерживают две линейки оборудования от мирового лидера в производстве профессиональных 3D-сканеров — компании Scantech: 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 являются менее жесткими. Группа «Кваливэд» с начала 2026 года выступает официальным представителем этих брендов в России. Мы не просто поставляем приборы. Мы помогаем встраивать их в реальные производственные процессы, обучаем команды и делимся опытом, накопленным годами работы с инженерными предприятиями. Сегодня хочется рассказать об этих технологиях не сухими строками спецификаций, а через призму задач, которые они помогают решать каждый день.

Когда речь заходит о 3D-сканировании, многие представляют себе облака точек и сложные алгоритмы, но за ними всегда стоят люди: инженеры, которым нужно быстро воссоздать чертеж сломанной шестерни без

исходной документации; контролеры, проверяющие геометрию сварного узла; конструкторы, проектирующие в виртуальном пространстве новый корпус оборудования, чтобы исключить коллизии до запуска в серию. Мы в «Кваливэд» давно заметили: лучший сканер — не тот, который впечатляет цифрами на слайде, а тот, что становится незаменимым помощником в цеху или лаборатории. Оборудование Scanology и 3DeVOK создавалось именно с такой мыслью. Оно не требует сложной калибровки или длительного обучения. Оно просто работает — быстро, точно и повторяемо.

Возьмем одно из самых распространенных применений — реверс-инжиниринг (или обратное проектирование). Представьте ситуацию: на заводе работает уникальный импортный узел, который внезапно выходит из строя. Запчасти ждать месяцами, чертежей нет, а производственные линии простаивают. Инженер берет портативный сканер, сканирует при помощи него поверхность детали, и уже через несколько минут на экране появляется чистая, готовая к последующей обработке полигональная модель. Не многочасовые обмеры с набором штангенциркулей, микрометров и шаблонов для



образмеривания объекта, а быстрый сбор данных с одним компактным прибором и несложным программным обеспечением. Кстати, о ПО: DefinSight обеспечивает построение моделей в реальном времени: вы проводите сканером над поверхностью объекта, а программа сама выполняет автоматическую регистрацию облаков точек. Один из наших клиентов, занимающийся обслуживанием промышленных насосов, обладатель Scanology Simscan, рассказывал, как с помощью такого подхода они за два дня воссоздали крыльчатку сложной формы, которую раньше измеряли неделями. Обратное проектирование перестало быть экзотикой и превратилось в стандартный инструмент восстановления и модернизации оборудования, позволяя не зависеть от поставщиков и сокращать цикл разработки в разы.

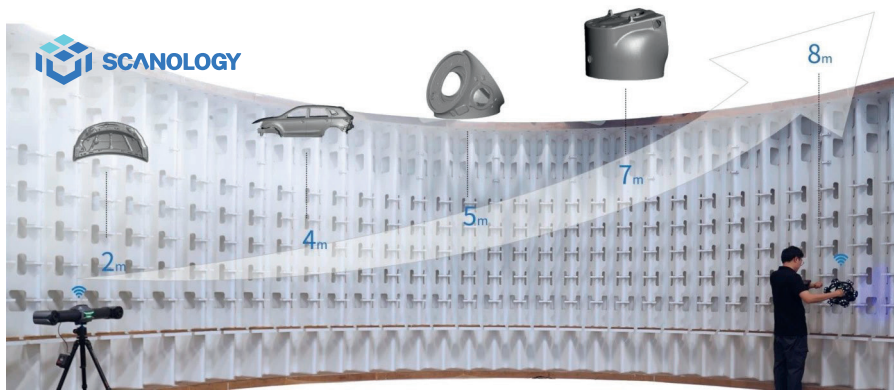
Не менее важна сфера трехмерного метрологического контроля. Здесь на первый план выходят точность, повторяемость и абсолютная уверенность в результате. Флагманом линейки Scanology по праву считается KSCAN-E. Это универсальный беспроводной сканер, который задает стандарт для промышленной метрологии. Вспомним историю одного турбостроительного предприятия, где требовалось проверить геометрию лопаток турбины после планового ремонта. Раньше это означало

долгую подготовку перед измерениями, и проводить работу было необходимо в идеальных лабораторных условиях на дорогостоящем роботизированном комплексе. С KSCAN-E специалист выходит прямо в цех, обклеивает деталь маркерами, включает прибор и за считанные минуты получает полную карту отклонений от эталонной CAD-модели. Точность до 0,020 мм, достаточная для контроля крупногабаритных лопаток, высочайшая детализация, адаптивная фотограмметрия и несколько режимов сканирования — от сверхбыстрого до высокоточного — позволяют работать с деталями очень широкого диапазона. Но главное — это достоверность данных. Мы всегда уделяли особое внимание повторяемости, а новые модели Scanology теперь еще и сертифицируются по ISO 10360-13, VDI/VDE 2634 Part 3 и JJF1951 на сферичность и плоскостность, что является уникальным предложением на нашем рынке.

Отдельного разговора заслуживают трекерные системы. Когда деталь слишком велика для ручного обхода, а клеить маркеры нельзя или просто нецелесообразно, на помощь приходят серии NimbleTrack и Trackscan. Это уже другой уровень свободы. Компактный трекер и сканер работают в паре без проводов, без внешних источников питания и, что особенно ценно, без маркеров.

Мы не раз наблюдали, как эти системы превращают набор хаотичных замеров крупногабаритных рам или корпусов в четкую, готовую к анализу цифровую копию. Особенно впечатляет их роль в задачах виртуальной сборки и компоновки. Представьте, что конструкторы разрабатывают новый корпус для высокоточного станка





или определяют пространственные координаты точек крепления ракетного двигателя. Вместо того чтобы ждать изготовления прототипов и сталкиваться с нестыковками на этапе сборки, они сканируют существующие узлы, новые компоненты и собирают все в виртуальном пространстве. Программное обеспечение автоматически совмещает облака данных, проверяет зазоры, выявляет потенциальные коллизии и позволяет скорректировать конструкцию еще до запуска в производство. Это экономит сотни часов и исключает дорогостоящие ошибки. Трекерные системы Scanology идеально подходят для таких задач благодаря исключительной стабильности позиционирования, способности работать на больших расстояниях без потери точности и гибкости в выборе точки обзора.

Любой сканер — лишь половина дела. Вторая половина — это программа, в которой оживают данные. DefinSight разрабатывалась с глубоким пониманием того, что инженеру не нужны лишние кнопки, скрытые меню и долгие ожидания обработки данных. Ему нужен результат. Поэтому интерфейс здесь интуитивный, а предварительная обработка происходит в реальном времени. Отдельного внимания заслуживает мобильное приложение DefinSight Mobile. Оно превращает персональный телефон в полноценный пульт управления: можно запускать сканирование, переключать режимы, проверять качество данных и корректировать траекторию, не подходя к компьютеру. А для тех, кто мыслит категори-

ями серийного производства, существует модуль DefinSight-Automation. Он интегрируется с роботами-манипуляторами и позволяет проводить контроль без остановки производства, превращая разовые замеры в непрерывный процесс.

Именно здесь мы подходим к автоматизированным решениям, которые постепенно становятся стандартом для современных производств. Системы — это оптические автоматизированные измерительные станции, которые «Кваливэд»

поставляет полностью готовыми к работе, под ключ. Это не просто набор железа, а продуманная экосистема: коллаборативный манипулятор, поворотный стол, автоматизированная стойка для трека и, конечно, один из сканеров Scanology, управляемый через DefinSight-Automation. Конструкторы приходят к нам с задачей: нужно проверить по 200 корпусов в смену без участия оператора. Мы приезжаем на площадку, изучаем логику, подбираем конфигурацию, настраиваем траектории движения роботов и обучаем персонал. AM-CELL разворачивается быстро, работает стабильно даже в условиях промышленного цеха и генерирует готовые отчеты автоматически. Модульная архитектура позволяет адаптировать ячейку под разные детали, а встроенные системы безопасности гарантируют защиту как оборудования, так и людей. Это решение для тех, кто понимает, что качество должно быть не исключением, а правилом, и готов инвестировать в процессы, которые окупаются за счет их предсказуемой эффективности.

В «Кваливэде» мы верим, что технологии должны служить людям, а не наоборот. Поэтому мы не просто отгружаем оборудование со склада — мы смотрим, как устроены ваши процессы, помогаем подобрать режимы сканирования под конкретные материалы и формы, обучаем операторов не просто нажимать кнопки, а понимать логику работы системы. Мы знаем, как важно в современных условиях быстро внедрять и активно эксплуатировать новые системы. За каждым прибором Scanology и 3DeVOK стоит история инженеров, которые годами искали баланс между точностью, скоростью и удобством. За каждым проектом — наша готовность разделить ответственность за результат. Мы партнеры, которые говорят на языке производства, понимают, как устроены лаборатории и сборочные линии, и готовы делиться опытом, чтобы ваши задачи решались быстрее и надежнее.

Если вы ищете не просто сканер, а надежный инструмент для обратного проектирования, метрологического контроля или компоновочных задач — мы всегда рядом. Давайте вместе создавать точные цифровые копии, сокращать цикл разработки, контролировать качество на новом уровне и строить будущее, где высокая точность — это не роскошь, а повседневная норма. ■



www.qualived.ru

Реклама

Непланарный слайсинг и управление формированием слоя при лазерной проволочной наплавке: специализированное ПО и прикладные кейсы



Дмитрий Трушников,
директор ООО «Иксвелд»



Андрей Рипецкий,
генеральный директор
ООО «Аддитивные технологии»



Сергей Зеленов,
технический директор
ООО «Аддитивные технологии»

Развитие аддитивных технологий обычно связывают с выбором источника энергии, присадочного материала, производительностью и свойствами получаемого металла. Однако при переходе от лабораторных экспериментов к промышленному применению становится ясно: программное обеспечение (ПО) для подготовки траекторий играет не меньшую роль. Для проволочной наплавки это особенно актуально. В отличие от порошковых процессов послойного сплавления, где изделие формируется тонкими слоями, здесь каждый проход напрямую влияет на заполнение объёма, локальное тепловложение, перекрытие валиков, сплошность материала, качество поверхности и объём последующей механической обработки. Качество детали, получаемой проволочной наплавкой, зависит не только от оборудования и режимов, но и от того, насколько точно геометрическая модель превращается в реальную траекторию движения головки. По сути, слайсинг перестаёт быть просто преобразованием STL-модели в набор линий — он становится частью самой технологии изготовления детали. От алгоритма генерации траектории зависит не только форма изделия, но и распределение тепла, длина проходов, термические циклы и в конечном итоге структура материала.

Особенно остро эта проблема встаёт при работе со сложной геометрией, переменным сечением, пространственно искривлёнными элементами или наплавкой на неплоские поверхности. Стандартный плоский послойный подход в таких случаях часто оказывается недостаточным. Требуется непланарное формирование траекторий, управление ориентацией инструмента, адаптация ширины заполнения и согласование программы с реальным поведением расплавленного металла.

В статье рассматривается специализированное ПО, разработанное совместно с ООО «ИксВелд», в основе которого лежит программный комплекс «Глайсер» ООО «Аддитивные технологии», более десяти лет применяемый для решения различных задач аддитивного производства. Важно, что это не универсальный слайсер «на все случаи», а инструмент, изначально заточенный под реальную технологию лазерной проволочной наплавки с системой обратной связи по подаче проволоки.

Структура и функциональные возможности разработанного программного комплекса

Разработанный программный комплекс включает модуль «Неплоский слайсер» и дополнительный модуль моделирования роботизированных и многокоординатных процессов наплавки. Его базовая задача состоит в генерации траекторий движения рабочего инструмента в процессе аддитивного производства наплавкой проволочных материалов.

Базовый функционал включает загрузку объектов в формате STL, линейные преобразования моделей, а также послойное отображение траекторий в режиме ломаных с нормальными и в виде объёмного заполнения. Однако основное значение имеют расширенные функции технологической подготовки. В программном комплексе предусмотрены задание постоянной и переменной высоты слоя, в том числе для неплоского случая; задание базовой поверхности наплавки, включая плоскую поверхность рабочего стола или произвольную неплоскую поверхность; различные способы деления модели на слои, включая планарные и непланарные; регулирование ширины слоя и шага

между соседними рабочими проходами; задание отступа между внешним контуром и внутренним заполнением; смещение периметров внутрь модели; автоматическое дозаполнение пустот; задание угла наклона рабочего инструмента в различных режимах; автоматизированная постобработка траекторий; различные схемы заполнения замкнутых контуров; формирование периметров с ручным или автоматическим выбором точки начала; задание жертвенных слоёв; автоматическое формирование пропусков под последующую механическую обработку.

Поддерживаются режимы 2+1 ось, 2+1+3 оси и 6 осей. Дополнительный модуль позволяет также реализовывать режимы 3+1 и 3+2 оси, осуществлять визуализацию движения рабочего инструмента и процесса заполнения, загружать параметры оборудования и модели исполнительных механизмов, а также отображать параметры процесса наплавки, включая скорости перемещения инструмента и подачи металла.

С инженерной точки зрения наиболее важной особенностью данного ПО является то, что оно ориентировано не только на построение формально корректной траектории, но и на подготовку траектории, пригодной для реального многокоординатного проволочного процесса.

Непланарный слайсинг как технологически необходимое решение

Одна из главных особенностей разработанного ПО — возможность непланарного слайсинга. В этом режиме слой формируется не как плоское сечение по оси Z, а как поверхность, эквидистантная реальной геометрии детали или базовой поверхности.

Такой подход особенно востребован при наплавке на неплоские поверхности, роботизированной обработке, использовании дополнительных осей вращения/наклона, а также в случаях, когда плоский слайсинг приводит к неравномерному тепловложению и ухудшению структуры.

Технологическое преимущество непланарного слайсинга в том, что наплавка идёт эквидистантно исходной поверхности. Благодаря этому тепло распределяется равномернее, исчезают короткие участки с локальным перегревом, выравниваются термические циклы и скорости охлаждения. В результате материал затвердевает в более стабильных условиях.

Важно понимать: для проволочной наплавки непланарный слайсинг — это не просто геометрическая функция. Он работает по-настоящему только тогда, когда вся технологическая система способна устойчиво выдерживать неплоскую траекторию и сохранять постоянную высоту слоя.

Сочетание специализированного слайсера с технологией лазерной проволочной наплавки

Принципиальной особенностью рассматриваемого подхода является не только наличие специализированного программного обеспечения, разработанного ООО «Аддитивные технологии», но и его согласованность с собственной технологией лазерной проволочной наплавки, используемой в ООО «ИксВелд».

В данной технологии применяется система обратной связи, управляющая подачей присадочного материала таким образом, чтобы обеспечивать стабильность формирования металла и постоянство высоты слоя. Именно этот контур управления делает практически реализуемым непланарный режим построения. Если в ряде других систем плоский слайсинг ещё может компенсироваться за счёт дополнительных измерений, сканирующих устройств или последующей коррекции процесса, то при неплоской наплавке подобный контроль существенно усложняется.

При непланарном построении задача становится сложнее: фактическая геометрия должна следовать за пространственно сложной траекторией наплавочной головки, а любая нестабильность формирования валика приводит не только к локальной погрешности, но и к накоплению отклонений по сложной поверхности. В этих условиях последующий контроль и коррекция становятся значительно более трудоёмкими.

В рассматриваемой системе эта проблема в значительной степени снимается за счёт самой организации процесса. Высота слоя автоматически поддерживается системой обратной связи независимо от того, формируется ли слой по плоской или по неплоской траектории. За счёт этого геометрия изделия устойчиво следует за движением наплавочной головки, а непланарный слайсинг превращается из расчётной функции в реально работающий технологический инструмент.

Таким образом, наибольшую практическую ценность представляет не сам по себе слайсер и не сама по себе наплавочная установка, а их интеграция в единый технологический комплекс, в котором алгоритмы генерации траекторий и замкнутый контур управления формированием слоя работают согласованно.

Генерация траекторий для шнеков переменного сечения

Одним из прикладных примеров применения разработанного программного обеспечения является генерация траекторий для наплавки шнеков (рис. 1). Данный тип изделий представляет собой характерную задачу, в которой стандартный слайсинг оказывается недостаточным из-за переменной толщины сечения винтовой части.

Если использовать простую схему заполнения с постоянной шириной проходов, то обеспечить точное соответствие заданной геометрии по всей длине шнека становится затруднительно. В разработанном программном обеспечении эта задача решается автоматически: ширина заполнения изменяется в соответствии с локальной геометрией изделия так, чтобы воспроизводить требуемую форму винтовой части.

С практической точки зрения это позволяет существенно сократить трудоёмкость подготовки управляющей программы и одновременно уменьшить необходимость последующей коррекции геометрии за счёт механической обработки. Для проволочной наплавки, где ширина валика и перекрытие проходов напрямую влияют на итоговую форму изделия, такая функция имеет принципиальное значение.

Генерация траекторий для лопаток при лазерной проволочной наплавке

Вторым важным направлением применения разработанного ПО является изготовление лопаток методом лазерной проволочной наплавки. В этом случае используется траектория с внешним контуром, который затем заполняется колебательными движениями инструмента, то есть растром переменной ширины. Ширина заполнения при этом ограничивается геометрией лопатки и адаптируется к изменению ширины пера.

Такой подход позволяет более точно воспроизводить форму детали, уменьшать вероятность образования пустот и локального переизбытка материала, а также рационально согласовывать внешний контур с внутренним заполнением. Для лопаток это особенно важно, поскольку речь идёт не только о формообразовании, но и о качестве поверхности, сплошности металла и механических характеристиках.

Использование такой стратегии построения позволяет обеспечивать качество поверхности на уровне порядка 10–15 мкм, а также получать высокую плотность и благоприятные свойства материала. Тем самым становится возможным существенно ограничить объём последующей финишной обработки.

Лопатки для промышленной и горной вентиляции как прикладной кейс

Одним из показательных примеров применения лазерной проволочной наплавки и специализированного слайсинга является изготовление лопаток для промышленной и горной вентиляции (рис. 2). В данном случае технология позволяет формировать изделие с минимальным припуском на рабочих поверхностях и с увеличенным припуском на посадочных поверхностях.

Такой подход даёт существенный технологический эффект. Теоретически рабочие поверхности лопатки могут быть полностью обработаны на четырёх- или пятикоординатных фрезерных станках. Однако это требует увеличения припуска и приводит к длительной и дорогостоящей обработке. При достигнутом качестве поверхности и точности выращивания окончательная доводка пера лопатки может быть выполнена ручной слесарной обработкой, а механическая обработка концентрируется преимущественно на посадочных поверхностях.

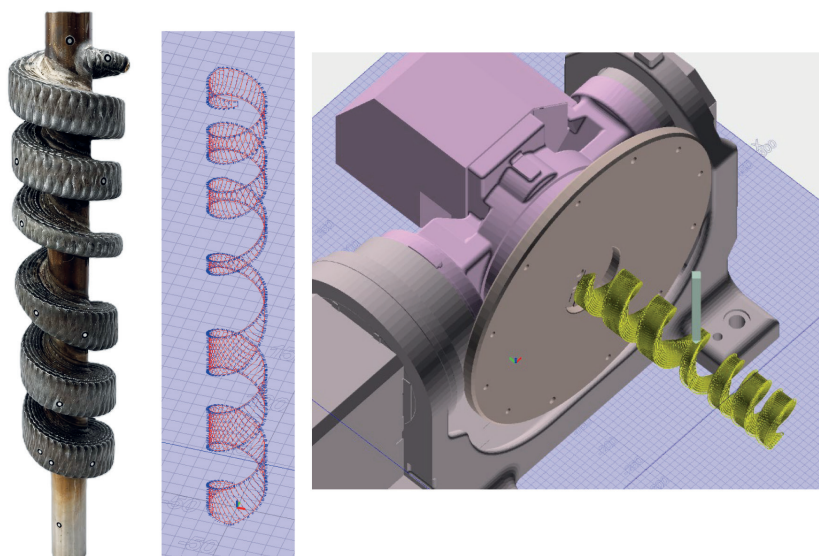


Рис. 1. Выращенный дуговой проволочной наплавкой шнек из нержавеющей хромоникелевой стали и пример генерации траекторий для наплавки шнека переменного сечения

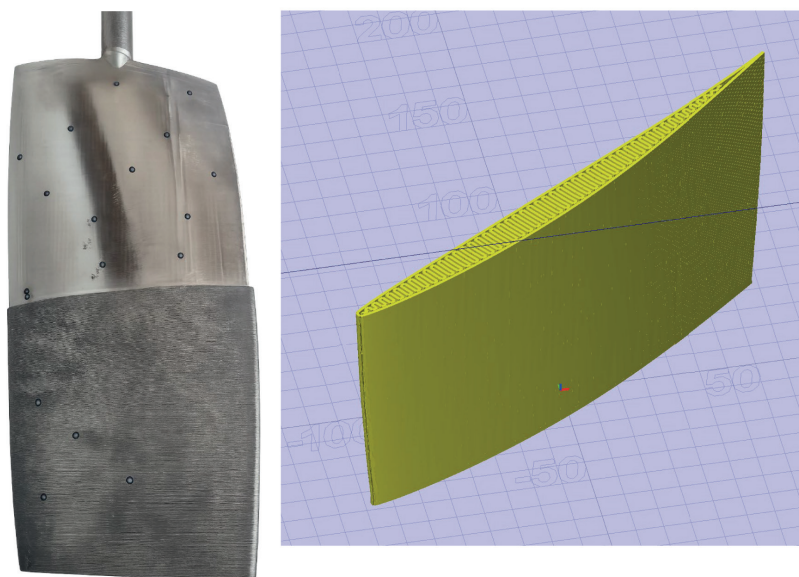


Рис. 2. Лопатка для промышленной вентиляции после лазерной проволочной наплавки и частичной финишной обработки и пример траектории с внешним контуром и заполнением растром переменной ширины при наплавке лопатки

На практике это означает, что внешняя геометрия изделия формируется в значительной степени уже на стадии наплавки, а последующая механообработка используется только там, где она действительно необходима. Для отраслевых применений это имеет принципиальное значение, поскольку позволяет снизить трудоёмкость и стоимость получения деталей сложной формы.

Для таких лопаток были получены хорошие результаты как при использовании коррозионно-стойких сталей, например 20X13, так и при работе с титановыми сплавами. После соответствующей термической обработки материал, сформированный методом лазерной проволочной наплавки, демонстрирует механические свойства на уровне, сопостави-

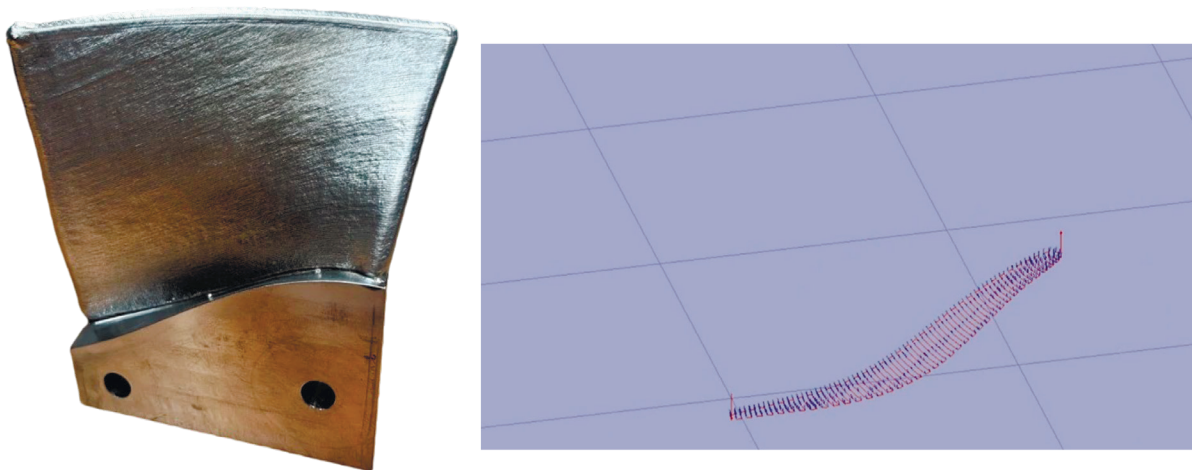


Рис. 3. Пример ремонтной наплавки лопатки компрессора из сплава ВТ6 с использованием непланарного слайсинга

мом с коваными полуфабрикатами. Для изделий, работающих в условиях динамических нагрузок, коррозионного и абразивного воздействия, это имеет принципиальное значение.

Непланарный слайсинг при ремонтной наплавке лопаток компрессора из сплава ВТ6

Преимущества непланарного слайсинга особенно заметны при ремонте лопаток компрессора из титанового сплава ВТ6 (рис. 3). Повреждённый участок удаляют, а на его месте наплавляют заготовку под последующую механическую обработку. Это позволяет восстановить колесо без замены всего узла.

Главная сложность — неплоская поверхность диска. При обычном плоском слайсинге в начале наплавки появляются короткие проходы, которые вызывают локальный перегрев. Для чувствительного к тепловой истории ВТ6 это может привести к нежелательным изменениям структуры как в наплавке, так и в основном металле.

Непланарный слайсинг позволяет вести наплавку эквидистантно поверхности диска. Тепловые поля становятся равномернее, термические циклы выравниваются, и материал формируется в более благоприятных условиях.

Система обратной связи здесь играет решающую роль: она автоматически поддерживает высоту слоя, и наплавляемая поверхность устойчиво следует за траекторией головки даже в неплоском режиме.

Восстановительная наплавка как отдельная область применения специализированного слайсинга

Отдельной областью применения разработанного программного обеспечения является восстановительная наплавка (рис. 4). В отличие от выращивания новой детали, в данном случае траектория должна формироваться не относительно исходной плоской базы или полной CAD-модели изделия, а относительно существующей поверхности ремонтируемой детали. Это значительно усложняет задачу, поскольку необходимо учитывать ло-

кальную геометрию зоны восстановления, обеспечивать корректное сопряжение наплавляемого материала с основным металлом и одновременно формировать объём с припуском, достаточным для последующей механической обработки.

Представленные примеры показывают, что специализированный слайсер позволяет решать такие задачи в автоматизированном режиме. На верхних изображениях приведён пример генерации траекторий для восстановительной наплавки лопатки. В данном случае программное обеспечение формирует объём наплавляемого материала в зоне повреждения с учётом геометрии исходной детали и требуемого припуска под последующую обработку. Для лопаточных изделий это особенно важно, поскольку позволяет локально восстанавливать повреждённую область без необходимости изготовления новой детали целиком.

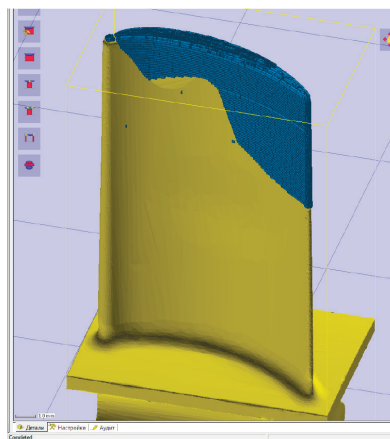
На рис. 4б, 4в представлен пример подготовки траекторий для восстановительной наплавки профилированной зоны детали сложной формы. Показаны исходная геометрия, выделенные области восстановления и внутренняя структура сформированной траектории в ремонтируемом объёме. В таких задачах требуется не просто заполнить дефектную область металлом, а сформировать геометрию, согласованную с существующей поверхностью детали, ограничениями по ширине проходов, условиями подвода инструмента и припуском под дальнейшую механическую обработку.

С технологической точки зрения восстановительная наплавка особенно наглядно демонстрирует преимущество специализированного слайсинга. Если при изготовлении новой детали траектория строится по заранее заданной геометрии, то при ремонте необходимо работать с реальной, часто сложной и неплоской поверхностью, на которой формируется новый объём материала. В этих условиях стандартные схемы плоского послойного заполнения становятся малоэффективными, так как приводят либо к избыточному наплавлению, либо к ухудшению условий формирования поверхности и росту объёма последующей механообработки.

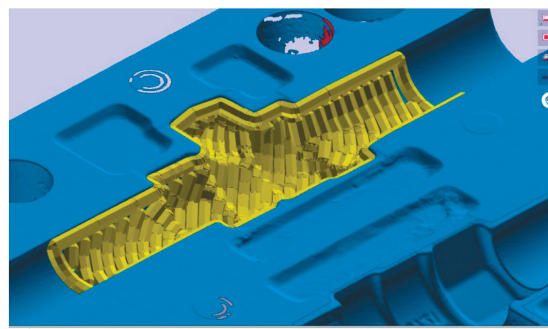
Использование специализированного ПО позволяет формировать наплавляемый объём как целевую вос-

Рис. 4. Примеры генерации траекторий для восстановительной наплавки:

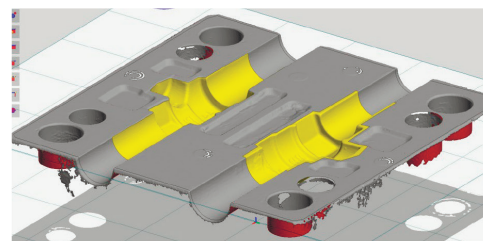
- а) восстановительная наплавка лопатки;
б, в) формирование траекторий для восстановления элементов штамповой оснастки



а)



б)



в)

становливаемую геометрию, автоматически согласованную с исходной поверхностью детали. За счёт этого восстановительная наплавка переводится из режима ручной подстройки траекторий в режим воспроизводимого цифрового технологического процесса. Особенно важно, что в сочетании с системой обратной связи по формированию слоя это обеспечивает не только геометрически корректную траекторию, но и устойчивое воспроизведение заданной формы в реальном процессе наплавки.

Таким образом, восстановительная наплавка является ещё одним важным направлением, в котором совместное применение специализированного слайсера и технологии лазерной проволочной наплавки даёт практический промышленный результат.

Практическое значение для промышленного применения

Разработка специализированного ПО для проволочной наплавки позволяет решить одну из ключевых задач промышленного внедрения аддитивных технологий — перейти от единичных демонстрационных примеров к воспроизводимым технологическим маршрутам. Однако принципиально важно, что в рассматриваемом случае речь идёт не просто о программном продукте, а о связке программного и технологического решения.

Если оборудование, источник энергии и система подачи материала определяют принципиальную возможность формирования изделия, то программное обеспечение определяет, каким образом эта возможность реализуется для конкретной геометрии детали. В свою очередь, система обратной связи по формированию слоя делает возможным устойчивое воспроизведение тех траекторий, которые рассчитываются в непланарном и многокоординатном режимах.

Наибольшую практическую значимость такой подход имеет в тех задачах, где стандартный слайсинг оказывается недостаточным: при выращивании шнеков

переменного сечения, при изготовлении лопаток, при ремонтной наплавке на неплоские поверхности, а также при роботизированной обработке в многокоординатных системах. Ремонт лопаток компрессора из ВТ6 демонстрирует, что непланарный слайсинг в паре с обратной связью позволяет уверенно работать на неплоских поверхностях с сохранением однородной структуры.

Именно здесь проявляется главный результат интеграции ПО и технологии: расчётная сложность траектории перестаёт быть ограничением и начинает использоваться как инструмент управления геометрией, тепловложением и структурой материала.

Выводы

Таким образом, в проволочном аддитивном производстве специализированное программное обеспечение перестаёт быть вспомогательным инструментом и становится полноценной частью технологического процесса.

Разработанный совместно ООО «ИксВелд» и ООО «Аддитивные технологии» программный комплекс позволяет генерировать траектории как в планарном, так и в непланарном режиме, поддерживает переменную высоту слоя, адаптивную ширину заполнения, многокоординатное управление и автоматизированную постобработку.

Наибольшую ценность имеет именно интеграция специализированного ПО и технологии лазерной проволочной наплавки в единый комплекс. Такой подход открывает путь к воспроизводимому изготовлению и ремонту деталей сложной формы в промышленных условиях. ■

Экономическое обоснование применения аддитивных технологий



Михаил Артюшков,
генеральный директор ООО «Инфокус»

Внедрение аддитивных технологий (АТ) сегодня выходит из стадии экспериментов и переходит к практической эксплуатации, становясь одной из наиболее динамично развивающихся областей промышленного производства. Однако снятие ряда ограничений, характерных для традиционных технологий, сопровождается возникновением барьеров, свойственных АТ. На экономику процесса влияет множество факторов, поэтому себестоимость может существенно варьироваться, а ожидаемый экономический эффект — не достигаться. Применение аддитивных технологий зачастую обходится даже дороже традиционных методов, при этом сложность процессов напрямую влияет на качество и, как следствие, на себестоимость продукции. Практика нашей компании в качестве промышленного интегратора показывает: аддитивные технологии обеспечивают выгоду только при системном подходе, учитывающем совокупность техно-

логических и организационных факторов. Рассмотрим данную логику на примере одной из наиболее распространенных металлических технологий — селективного лазерного плавления (SLM).

Прежде всего необходимо определить область рационального применения. Наиболее очевидная зона эффективности — малосерийное производство. В традиционных технологиях существенную долю затрат формируют подготовительные операции: изготовление оснастки, наладка. При партиях в единицы и десятки изделий распределение этих затрат приводит к резкому росту себестоимости. АТ, не требующие специальной оснастки, устраняют данный барьер, что особенно актуально для предприятий с широкой номенклатурой и малой серией. Дополнительным фактором является сокращение сроков изготовления, критичное, например, при реверс-инжиниринге компонентов технологических линий с высокой стоимостью простоя. Еще одно преимущество — геометрическая свобода: возможность создавать внутренние каналы, облегченные и топологически оптимизированные конструкции, обеспечивающие улучшение эксплуатационных характеристик.

Однако перечисленные преимущества реализуются лишь при корректной организации процесса. Распространенная практика использования SLM для получения заготовки с последующей значительной механической обработкой приводит к высокой себестоимости. Избыточные поддержки, большие припуски и длительная постобработка нивелируют потенциальный экономический эффект. Кроме того, далеко не все конструкции обладают достаточной технологичностью, поэтому перевод всей малосерийной номенклатуры на 3D-печать является ошибочной стратегией.



Рис. 1. Пример расчета в ПО Reditive Assistant

Ключевым этапом внедрения становится предварительный отбор изделий. При базе данных, насчитывающей 10000 и более позиций, необходим автоматизированный скрининг. Для решения этой задачи мы используем собственные методики, использующие семантический анализ в сочетании с технологической аналитикой по таким критериям, как габариты, геометрические особенности, материал, класс нагрузок, годовая потребность и пр. Данная методика легла в основу разработанного нами ПО Reditive Assistant, позволяющего формировать перечень экономически обоснованных кандидатов для аддитивного производства и выполнять полноценное ТЭО для гарантированного возврата инвестиций в АТ (рис. 1). Наибольший эффект, как правило, показывают детали с малой серией производства, сложной геометрией и низким коэффициентом использования материала (КИМ) при классической ЧПУ-обработке.

Даже после отбора номенклатуры решающим фактором остается технологическая стратегия и конструкторская подготовка. Данные показывают, что себестоимость одного и того же SLM изделия может различаться кратно. Существенное влияние оказывают такие факторы, как ориентация детали на платформе построения, объем поддержек, толщина слоя, режимы сканирования и величина припусков. Сравнительный анализ по удельной стоимости 1 см³ конечной детали на примере материала PC300 демонстрирует принципиальную разницу подходов (рис. 2).

Так, на изображенной матрице себестоимости можно увидеть, что при печати с массивными поддержками и значительными припусками, требующей длительной слесарной и ЧПУ-обработки, удельная стоимость составит порядка 343 руб./см³. Процесс экономически неэффективен. А печать, максимально приближенная к конечной геометрии, с минимальными поддержками стоит уже порядка 55 руб./см³. Разница достигает шестикратного значения — отсутствие конструкторской подготовки делает аддитивное производство неоправданно дорогим.

Отдельную проблему представляют технологические деформации, возникающие в процессе изготовления.

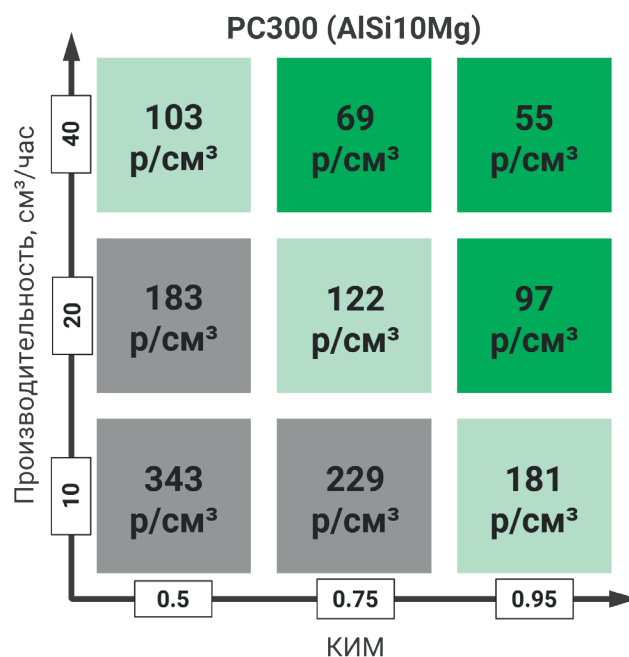


Рис. 2. Сравнительный анализ по удельной стоимости 1 см³ конечной детали на примере материала PC300

Традиционные способы решения данной проблемы — это увеличение припусков и подведение более объемных и жестких поддерживающих структур, что ведет к росту стоимости 3D-печати, а также увеличению объема последующей ЧПУ-обработки, а значит, и итоговой себестоимости детали. Альтернативой является компенсирующая корректировка исходной модели с использованием данных 3D-сканирования. Такой подход позволяет изготовить деталь в теоретическом пределе точности технологии, для SLM это составляет 50–100 мкм, что дает возможность получить заготовку детали с максимальным КИМ. Для реализации данного подхода применяется разработанное нами программное обеспечение Reditive Compensation, новая версия которого вышла в 2026 году.

Практическая иллюстрация — производство сложного сектора НА КВД в рамках работ по демонстратору

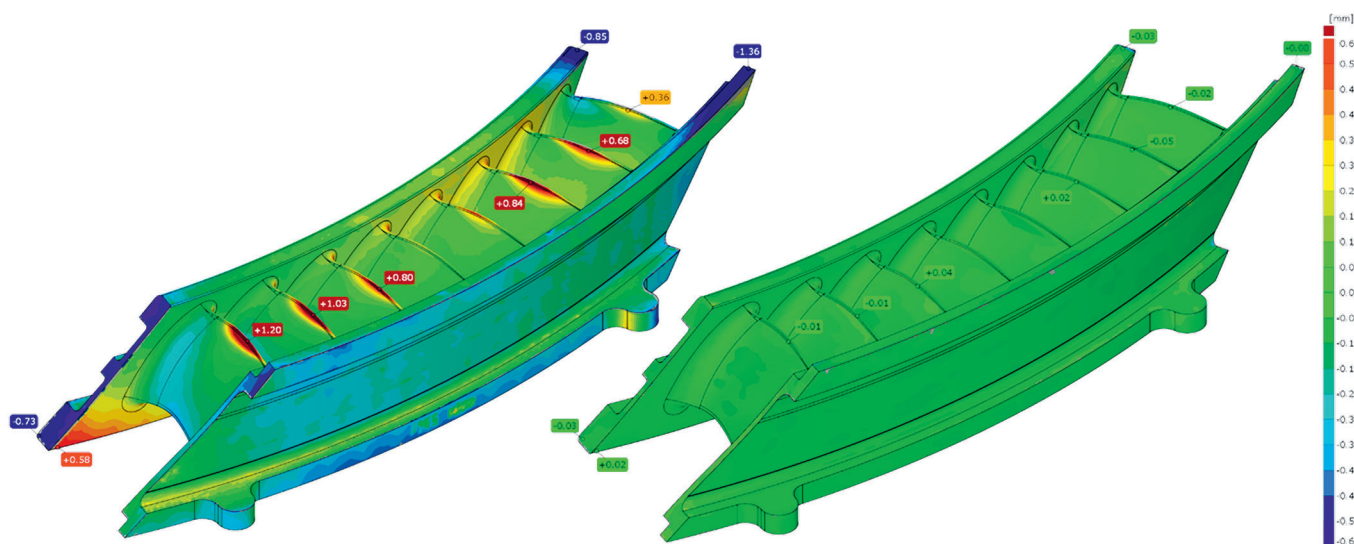


Рис. 3. Карты отклонения напечатанного сектора НА КВД до применения Reditive Compensation и после

Таблица 1

	SLM-печать без припусков (с помощью RC)	SLM-печать с припуском	ЧПУ из проката	Литье с припуском
Партия 1 шт.				
Подготовка производства, тыс. руб.	40,2	150	150	1200
Заготовка, тыс. руб.	40,2	66,7	93,5	38,5
Постобработка, тыс. руб.	1,5	208,3	416,6	208,3
Себестоимость 1 шт, тыс. руб.	81,8	425	660,1	1446,8
Партия 10 шт.				
Подготовка производства, тыс. руб.	40,2	15	15	120
Заготовка, тыс. руб.	402	667,6	935,4	385,4
Постобработка, тыс. руб.	15	2083	4167	2083
Себестоимость 1 шт, тыс. руб.	45,72	293	529	384
Партия 100 шт.				
Подготовка производства, тыс. руб.	40,2	150	150	150
Заготовка, тыс. руб.	4020	6675	9354	3854
Постобработка, тыс. руб.	150	20833	41667	20833
Себестоимость 1 шт, тыс. руб.	42,1	292	527	276

авиационного двигателя ПД-35 (работа выполнялась в интересах АО «ОДК-Авиадвигатель»). Мы сравнили три технологии: ЧПУ-обработка из проката, литье и SLM — с припусками под ЧПУ и без, для материала ЭП648. Для простоты сравнения сделано допущение, что допуск 0,1 мм предъявляется не только на профиль пера лопаток, но и на другие поверхности.

Расчеты, представленные в таблице 1, позволяют проследить влияние технологического подхода и серийности на итоговую себестоимость изделия. Для единичного производства принципиальное значение имеет структура затрат: при SLM-печати без припусков с применением Reditive Compensation отсутствуют расходы на оснастку и исключается объемная ЧПУ-обработка. В результате себестоимость составляет порядка 82 тыс. руб. за деталь, чтократно ниже альтернативных вариантов. Для сравнения: SLM с припуском требует существенной ЧПУ-обработки, оснастки и дополнительных подготовительных операций, что увеличивает стоимость примерно до 425 тыс. руб.; ЧПУ-обработка из проката достигает порядка 660 тыс. руб.; литье при единичном заказе оказывается наименее рациональным вследствие высокой стоимости оснастки.

При увеличении партии до 10 штук удельная нагрузка затрат на подготовку снижается, однако характер распределения сохраняется: наименьшая себестоимость достигается в сценарии SLM без припусков (около 45 тыс. руб. за изделие), тогда как варианты с припуском и значительной ЧПУ-обработкой остаются в разы дороже. Литье в этом диапазоне начинает конкурировать по стоимости, но все еще уступает оптимизированной аддитивной стратегии.

При партии 100 штук наблюдается смена баланса: за счет распределения затрат на оснастку литье существен-

но снижает себестоимость и приближается к аддитивному варианту. Тем не менее SLM без припусков сохраняет сопоставимый уровень затрат (порядка 42 тыс. руб. за деталь), тогда как SLM с припуском и ЧПУ из проката остаются значительно менее эффективными.

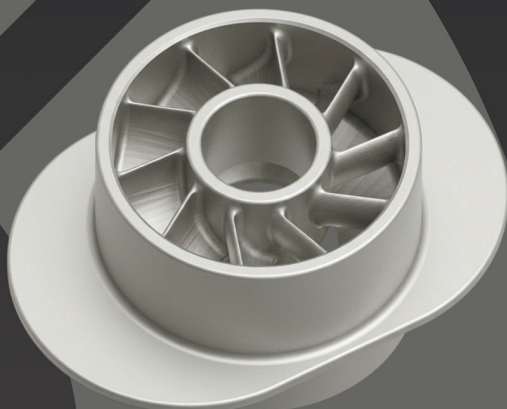
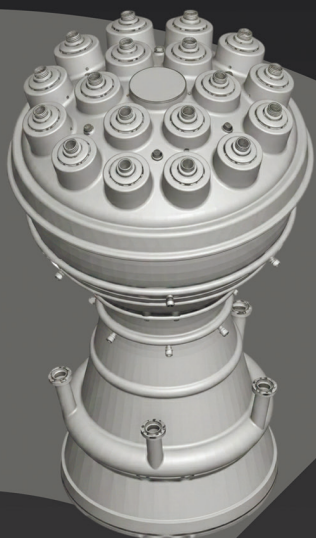
Таким образом, решающим фактором является не только сама технология, а объем последующей ЧПУ-обработки: печать «в размер» радикально меняет экономику процесса. Более того, аддитивное производство демонстрирует безусловное преимущество в сегменте единичных и малых партий. В-третьих, при росте серии литье становится конкурентоспособным за счет эффекта масштаба, тогда как SLM-печать с припуском теряет экономический смысл независимо от объема выпуска. Таким образом, расчеты подтверждают, что универсального ответа о выгоде по умолчанию не существует: каждое изделие требует технико-экономического анализа.

Возвращаясь к вопросу о выгоде аддитивных технологий, следует сделать вывод: это не универсальная замена традиционным методам производства, а отдельная производственная технология со своими ограничениями. Экономическая эффективность 3D-печати достигается при соблюдении ряда условий: корректный выбор номенклатуры (анализ коэффициента использования материала, геометрии и серийности), выбор соответствующей технологии и материала, адаптация конструкции и применение предеформации для минимизации постобработки. В этих условиях 3D-печать становится не просто альтернативным способом изготовления деталей, а стратегическим инструментом повышения гибкости, технологической независимости и конкурентоспособности промышленного предприятия. ■

АУДИТ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ АП

технико-экономическая
оценка производственной
номенклатуры

анализ конструкции
деталей



оценка эффективности
внедрения



как сделать аддитивное
производство выгодным?



скачайте презентацию
по ссылке

разработка концепции
производства



Аддитивное производство технической керамики: мировые тенденции, рыночная динамика и российская повестка. Аналитический обзор



Игорь Пчелинцев, генеральный директор ООО «Ретех»
Дмитрий Трубашевский, основатель проекта «Логика слоя»



Настоящий обзор посвящён анализу глобального рынка аддитивного производства из технической керамики — одного из наиболее динамично развивающихся сегментов современной промышленности. На основе данных авторитетных международных источников: Wohlers Report 2025/2026 (Wohlers Associates / ASTM International), ежегодных отчётов VoxelMatters Research 2025/2026, а также ряда рецензируемых отраслевых публикаций рассматриваются ключевые технологии, материалы, отраслевые применения и региональная структура данного рынка. Отдельное внимание уделяется ситуации в Российской Федерации: структуре спроса, достигнутому технологическому заделу и перспективам локализации.

Почему керамика становится стратегическим материалом

На протяжении последних трёх десятилетий аддитивное производство неизменно ассоциировалось преимущественно с полимерами и металлами. Между тем одна из наиболее технически сложных и перспективных ниш этой отрасли — печать изделий из технической керамики — вплоть до недавнего времени оставалась уделом специализированных лабораторий и немногочисленных пионеров-первопроходцев. Положение дел стремительно меняется. Согласно данным VoxelMatters Research 2025, совокупный мировой рынок аддитивного производства технической керамики в 2024 году составил 166 млн долларов США и к 2034 году достигнет 2,5 млрд долларов, при этом среднегодовой темп роста (CAGR) оценивается в 31,2% — более чем вдвое превышая прогнозируемый CAGR всего мирового рынка аддитивных технологий (АТ) в целом.

Актуальные данные Wohlers Report 2026 (Wohlers Associates/ASTM International) — наиболее авторитетного ежегодного отраслевого доклада, выходящего с 1996 года, — свидетельствуют о том, что мировой рынок АТ в 2025 году достиг 24,2 млрд долларов, демонстрируя рост 10,9% год к году. Рост производственных услуг по

итомам 2025 года составил 15,5%. Эти цифры формируют контекст для понимания особой позиции керамического сегмента: его CAGR опережает отраслевой в три раза.

Чем объясняется этот ускоренный рост? Прежде всего — уникальной комбинацией свойств, которыми обладает техническая керамика и которые принципиально недостижимы ни у металлов, ни у полимеров. Химики и материаловеды давно хорошо знакомы с оксидом алюминия (Al_2O_3), диоксидом циркония (ZrO_2), нитридом кремния (Si_3N_4), карбидом кремния (SiC) и рядом других неоксидных соединений, способных работать при температурах, при которых большинство конструкционных металлов уже переходят в жидкое состояние. Добавьте к этому исключительную коррозионную стойкость, биоинертность, электроизоляционные свойства, радиационную стабильность — и станет понятно, почему ведущие авиастроительные, полупроводниковые, медицинские и энергетические компании мира активно ищут способы работать с этим материалом.

Единственное историческое ограничение технической керамики — её принципиальная хрупкость и сложность обработки — в значительной мере преодолевается именно методами аддитивного производства. В отличие от традиционного прессования и спекания, аддитивные технологии позволяют создавать геометрически сложные



Рис. 1. Экспериментальные сопловой аппарат и колесо турбины, выполнены ООО «Ретех» («Прокерамика») в рамках индустриального НИР с АО «ЦАТ» ГК «Ростех» и СамГТУ (после печати, до спекания)

конфигурации (внутренние каналы, сотовые структуры, функционально-градиентные изделия) без дорогостоящей оснастки и с радикально сокращёнными сроками прототипирования.

Основные методы печати

Все технологии аддитивного производства керамики объединяет одна принципиальная черта: керамические изделия всегда создаются как «связанная» заготовка в матрице из связующего вещества, требующая последующего термического обжига (спекания, рис. 1). Это сближает аддитивную керамику с хорошо освоенной

в промышленности технологией керамического литья под давлением (CIM) и во многом определяет барьеры и перспективы её освоения.

Лидирующей технологией на мировом рынке является фотополимеризация в ванне (Vat Photopolymerization, VPP), прежде всего в виде стереолитографии (SLA) и цифровой проекционной печати (DLP). По данным Voxelmatters Research 2025, на долю VPP приходится более 76% объёма напечатанных деталей в сервисных бюро и 77,6% выручки от оборудования в сегменте технической керамики. Метод обеспечивает наилучшее сочетание точности (разрешение лазерного пятна от 30–50 мкм), качества поверхности и воспроизводимости результатов, что критически важно для авиационных и медицинских применений. Второй по значимости технологией остаётся струйное нанесение связующего (Binder Jetting, BJ), доля которого в объёме напечатанных деталей составляет порядка 19%. Эта технология привлекательна высокой скоростью работы и масштабируемостью, однако предъявляет более высокие требования к последующей инфильтрации и спеканию. Наконец, экструзионные методы (MEX) — включая прямое струйное осаждение (DIW/Robocasting) и модификации типа FFF с керамическими филаментами — пока занимают около 4% рынка, однако демонстрируют устойчивую положительную динамику благодаря более низким порогам входа.

Материалы

Оксидная керамика сегодня формирует основу коммерческого рынка материалов для аддитивного производства (рис. 2). Оксид алюминия (Al_2O_3) — наиболее широко применяемый материал, сочетающий доступность с выдающейся термической и механической стабильностью. Стабилизированный иттрием диоксид циркония ($3Y-ZrO_2$) занимает лидирующее положение в стоматологии и ряде биомедицинских применений благодаря биосовместимости и трансформационному упрочнению. Силикаты (SiO_2 -композиты) широко используются в литейных ядрах для турбинных лопаток.



Рис. 2. Образцы изделий, напечатанных на 3D-принтере компании Lithoz GmbH: сопло двигателя AeroSpike, радиочастотный фильтр, керамический резонатор, сердечник для промышленных газовых турбин. Фото: Lithoz GmbH



По мере зрелости рынка всё более значимую роль играют неоксидные керамики — нитрид кремния (Si₃N₄), карбид кремния (SiC), нитрид алюминия (AlN), а также биокерамика на основе гидроксиапатита (HA). В 2025 году нитрид кремния, по данным VoxelMatters, привлёк особое внимание: американская компания SINTX Technologies заключила соглашение о поставках с крупным химическим концерном Evonik. Печать «тёмных» керамик для гиперзвуковых применений исследуется группой Purdue Applied Research Institute — технология устраняет принципиальные сложности с поглощением УФ-излучения при DLP-печати.

Объём рынка и темпы роста

Актуальная версия отчёта VoxelMatters Research (2026), построенная на данных за полный 2025 год, фиксирует объём рынка технической керамической АТ на уровне 186,5 млн долларов США (+13,5%). При этом структура рынка претерпела качественный сдвиг: выручка от услуг (75,8 млн долл., +22,3%) фактически сравнялась с выручкой от оборудования (77,6 млн долл., +8,2%), что сигнализирует о переходе от инвестиционного к производственному циклу. Доля финальных деталей в объёме услуг сервисных бюро впервые превысила 50%.

К 2034 году, согласно прогнозу VoxelMatters Research — 2025, совокупный объём рынка технической керамической 3D-печати достигнет 2,5 млрд долларов при CAGR 31,2%. Сектор услуг будет расти быстрее всего (CAGR 32,7%), тогда как сегменты оборудования и материалов продемонстрируют CAGR 30% и 30,7% соответственно. По итогам прогнозного периода выручка от оборудования и от услуг превысит 1 млрд долларов каждый, вклад материалов составит 446 млн долларов.

Таблица 1. Прогноз рынка технической керамической аддитивной технологии по сегментам, млн долл. США

Сегмент	2024	2026	2030	2034
Оборудование	73	130	370	1037
Материалы	61	55	157	446
Услуги	32	104	369	1018
Итого	166	289	896	2501

Источник: VoxelMatters Research-2025.

Наиболее ёмким сегментом применения в прогнозном периоде остаётся промышленность: выручка здесь вырастет с 31 млн долларов в 2024 году до 460 млн к 2034-му. Промышленный спрос формируется прежде всего высокой абразивной стойкостью технической керамики. Следом идут стоматология (21 → 307 млн долл.) и медицина (17 → 236 млн долл.). Авиастроение демонстрирует максимальный CAGR среди отраслевых вертикалей применения — 31,6%, достигая 256 млн долларов к 2034 году.

Стоматологическая ниша заслуживает отдельного упоминания. Именно здесь в 2025 году исследователи Техасского университета в Далласе (UT Dallas) проде-

монстрировали ультрабыстрое термическое дебиндирование (UFTD) отпечатанных из диоксида циркония заготовок: процесс, занимавший прежде от 20 до 100 часов, был сокращён до менее чем 30 минут при потреблении энергии в 3 500 раз меньше стандартного. Это достижение способно радикально снизить экономические барьеры для массового применения керамической 3D-печати в зуботехнических лабораториях.

Регион EMEA (Европа, Ближний Восток, Африка) в настоящее время занимает доминирующую позицию на рынке технической керамической АТ — прежде всего благодаря концентрации здесь ведущих производителей оборудования и материалов. Выручка региона вырастет с 106 млн долларов в 2024 году до более чем 1,5 млрд к 2034-му. Тем не менее наиболее высокий CAGR ожидается в регионе APAC (Азиатско-Тихоокеанский) — 32,1%, с ростом с 35 до 558 млн долларов. Северная Америка прогнозируется в диапазоне от 25 до 391 млн долларов.

Ключевые игроки глобального рынка

Несмотря на то, что рынок аддитивного производства технической керамики по-прежнему остаётся нишевым в абсолютном выражении, экосистема его участников стремительно расширяется. По данным VoxelMatters Research-2025, за последний год число активных игроков выросло на 22%: в реестре насчитываются 35 производителей оборудования, 45 поставщиков материалов и 52 сервисных бюро.

Безусловным лидером рынка является австрийская компания Lithoz GmbH (основана в 2011 году как спин-офф Венского технического университета, TU Wien). Компания разработала технологию Lithography-based Ceramic Manufacturing (LCM) и выпускает линейку принтеров серии CeraFab. В 2024 году Lithoz запустила сеть Ceramic 3D Factory, объединившую ряд европейских сервисных бюро. Выручка компании в 2023 году составила около 14,8 млн евро при экспортной квоте свыше 97%.

Французская компания 3DCeram Sinto (Лимож, совместное предприятие с японским промышленным концерном Sinto Group с 2017 года) использует собственную SLA-технологию Fast Ceramics Production (FCP) и располагает одним из наиболее широких промышленных парков оборудования — включая системы с рабочим полем 600×600×300 мм. В 2024 году компания представила ИИ-решение CERIA (модули Set и Live), позволяющее автоматизировать подбор параметров печати и осуществлять динамическую коррекцию процесса в режиме реального времени на основе сигналов более чем 20 встроенных датчиков. Выручка 3DCeram выросла с 1 млн евро в 2015 году до 5,56 млн евро в 2022-м при доле экспорта 64–87%.

Среди сервисных провайдеров выделяется Bosch Advanced Ceramics (г. Иммерштадт, Германия) — подразделение Bosch Business Innovations, располагающее десятилетним опытом SLA- и LCM-печати. Компания производит изделия для полупроводниковой, медицинской и аэрокосмической промышленности, демонстрируя возможности масштабной серийной печати: в одном ци-

кле — до 1 400 керамических изолирующих втулок для лапароскопических инструментов. В конце 2025 года, по данным VoxelMatters, Sinto Group приобрела подразделение Bosch Advanced Ceramics, что отражает стремление ведущих производителей оборудования интегрировать вертикальную цепочку создания стоимости.

Китайская компания iLaser (основана 2016 году, производственные площадки в Сучжоу, Ухане, Шэньчжэне и Сяньнине) активно расширяет присутствие на глобальном рынке с серией промышленных SLA-принтеров CeraBuilder. Японская SK Fine (дочерняя компания Shashin Kagaku, основана в 2018 году) вышла на западные рынки с системой SZ-6000 (рабочее поле 660×600×300 мм, скорость экспонирования в 10 раз выше лазерных аналогов). Именно рост азиатских игроков, по данным VoxelMatters Research 2026, обеспечил APAC лидерство в мировом объеме продаж единиц оборудования.

Российский рынок

Российский рынок АТ переживает фазу форсированного роста. Согласно исследованию «Рынок технологий аддитивного производства РФ», подготовленному Клубом аддитивных технологий (2025), совокупный объем рынка в 2024 году составил 21,2 млрд рублей, а CAGR за период 2021–2024 годов зафиксирован на уровне 41,3% — один из самых высоких темпов роста в мире для этого сегмента. Оптимистичный прогноз на 2025–2028 годы предполагает CAGR 26,5–33,0% с достижением объема 56,7 млрд рублей к 2028 году.

Структура рынка в 2024 году: 3D-принтеры (41%, 8,77 млрд руб.), услуги центров АТ (24%, 5,1 млрд руб.), материалы для 3D-печати (21%, 4,54 млрд руб.). Ключевые драйверы — политика импортозамещения оборудования и материалов, волна реверс-инжиниринга и замены деталей (пик ожидается в 2026–2027 годах), спрос со стороны оборонной промышленности и госкорпораций при активной государственной поддержке через программы Фонда содействия инновациям («Старт», «Развитие»), «Сколково» и Фонда НТИ.

Сегмент аддитивной керамики в России находится в стадии активного формирования. Его масштаб отно-

сительно невелик — по оценкам, текущая доля России на мировом рынке аддитивной керамики составляет 0,2–0,3%, однако именно это обуславливает колоссальный нереализованный потенциал и открывает окно возможностей для технологических первопроходцев.

Ретроспективный анализ выявляет устойчивый, документально подтвержденный спрос. По данным исследования «Обзор рынка 3D-печати керамическими материалами в мире и России» (ООО «ИГ Инфомайн», 2022), в период 2017–2021 годов в Россию было импортировано 8 установок для 3D-печати керамикой на общую сумму около 3,34 млн долларов США, а также 316 кг специализированных материалов (керамических паст, порошков, связующих) на сумму порядка 75,9 тыс. долларов. Ключевыми получателями этой высокотехнологичной продукции выступали ВИАМ, НИИ НПО «Луч» и АО «НПО Систем».

После 2022 года поставки импортного оборудования для керамической 3D-печати фактически прекратились: компания 3DCeram, чьи установки использовались отечественными организациями, официально покинула российский рынок. Аналитики «Инфомайн» ещё в 2022 году прогнозировали паузу в импортных поставках в 2023–2024 годах и указывали, что выпуск серийных российских аналогов для 3D-печати керамикой в лучшем случае возможен не ранее 2025 года. Этот прогноз оказался точным — и именно в этот момент на российском рынке появился отечественный разработчик с готовым продуктом.

Формирование отечественной экосистемы керамической 3D-печати

«Прокерамика» (юридическое лицо — ООО «Ретех») — российская высокотехнологичная компания, которая формирует первую в России полноценную экосистему керамической SLA 3D-печати, охватывающую весь производственный цикл: от сырья и материалов до оборудования, программного обеспечения, НИОКР и промышленного внедрения.

Ключевым продуктом является промышленный SLA-принтер «Прокерамика-170» — первая российская промышленная установка для керамической стереоли-

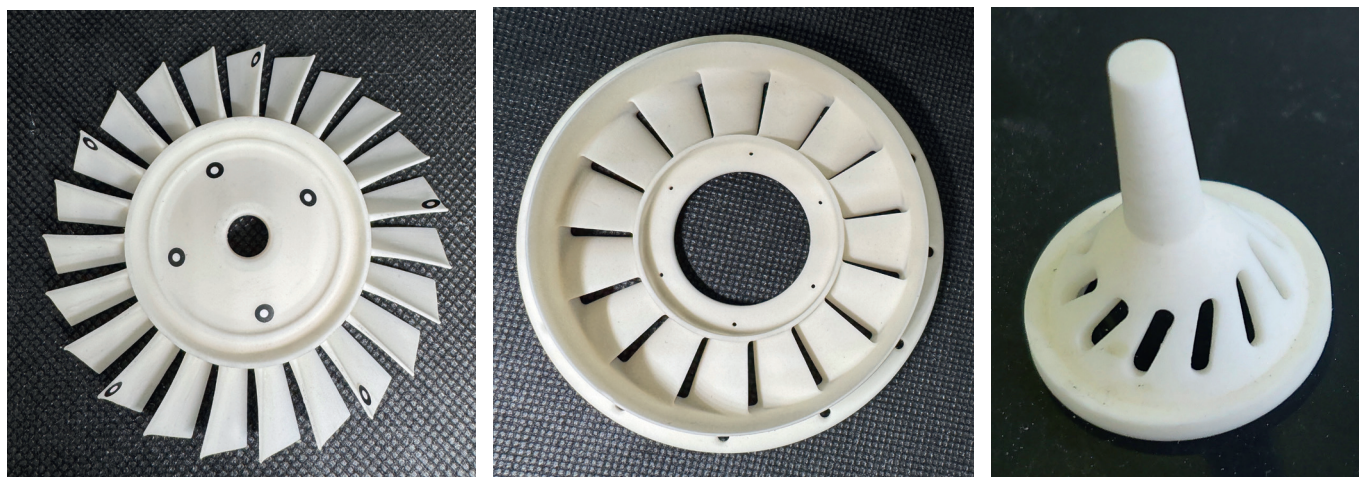


Рис. 3. Образцы ООО «Ретех», напечатаны на 3D-принтере «Прокерамика-170» из фирменной керамической пасты

тографии. Технические характеристики: рабочая зона до $\varnothing 170 \times 165$ мм; разрешение лазерного пятна ~ 45 мкм; толщина слоя от 10–20 мкм. Стоимость установки существенно ниже зарубежных аналогов при сопоставимых функциональных характеристиках. Принтер работает на отечественном программном обеспечении «Триангулятика», включённом в реестр российского ПО.

Компания серийно производит и поставляет линейку керамических паст и суспензий: оксид алюминия (Al_2O_3), стабилизированный диоксид циркония (3YSZ), SiO_2 -композиты. В разработке находятся нитрид кремния (Si_3N_4), карбид кремния (SiC), нитрид алюминия (AlN) и гидроксид апатит. Стоимость материалов в 1,5–2 раза ниже импортных аналогов, степень локализации компонентов превышает 80%.

Спектр реализованных проектов включает: керамические уплотнения для нефтегазовой отрасли, втулки и изоляторы для машиностроения, медицинские и стоматологические изделия (рис. 3, 4). Проводятся опытно-промышленные испытания с крупными промышленными заказчиками в сегментах энергетики, авиадвигателестроения и нефтегаза.

«Прокерамика» является резидентом инновационного центра «Сколково» и входит в реестр МТК (малых технологических компаний). Площадкой для развития команды является Центр аддитивных технологий ОДК «Ростеха» (АО «ЦАТ»), где организована, по оценке самой компании, крупнейшая в России керамическая аддитивная производственная площадка.

Компания является победителем гранта «Старт-1» Фонда содействия инновациям по направлению «Станкостроение» и вошла в топ-10 лучших российских университетских стартапов по итогам форума технологического предпринимательства «ТехПред-2025». В начале 2025 года компания привлекла инвестиции от профильного венчурного фонда в размере 15–20 млн рублей, направленные на масштабирование производства и найм персонала.

По состоянию на 2025–2026 год компания остаётся единственным в России разработчиком и производителем, реализующим полный цикл керамического аддитивного производства. Ближайший конкурент предлагает лишь частичные OEM-решения без собственных материалов и ПО.

Научно-исследовательские разработки 2024–2025 годов

Помимо коммерческих достижений академическое сообщество в 2024–2025 годах продемонстрировало ряд результатов, способных качественно изменить возможности и сферы применения аддитивной керамики.

Группа исследователей Хьюстонского университета под руководством доктора Максуда Рахмана разработала новый класс 3D-печатных керамических метаматериалов на основе оригами-геометрий. Применяя принцип складки Miura-ori к SLA-напечатанным силикатным структурам с последующим покрытием гиперэластичным биосовместимым полимером PDMS, исследователи получили конструкции с высокой устойчивостью к сжатию и циклическим нагрузкам — в направлениях, при которых классические керамические детали наиболее хрупки. Это открывает перспективы применения в медицинских имплантатах, аэрокосмических и робототехнических системах.

Исследователи Purdue Applied Research Institute (PARI) совместно с Университетом Пёрдью работают над 3D-печатью «тёмных» керамик (HfB_2 , HfC, SiC) — материалов, способных выдерживать условия гиперзвукового полёта (5 М и выше). Принципиальная сложность состоит в поглощении ими УФ-излучения при DLP-печати, что ограничивает глубину отверждения. Команда разрабатывает специальные рецептуры смол и режимы поверхностной обработки, уже позволившие получить конические и полусферические образцы для натуральных испытаний.

В сфере постобработки значимым событием стало описанное выше исследование UT Dallas по ультрабыстрому термическому дебиндированию (UFTD) циркониевых заготовок: сочетание вакуумного пиролиза и сверхбыстрого нагрева со скоростью $100^\circ\text{C}/\text{с}$ с последующим спеканием при 1450°C (общее время цикла менее 30 минут) открывает реальную перспективу «стоматологии за один визит» и кратного сокращения производственного цикла для малосерийных изделий.

Параллельно в Ливерморской национальной лаборатории (LLNL, США) исследуется метод Hydrogel-Infused Additive Manufacturing (HIAM): вместо керамического сырья используется гидрогель, насыщенный водными растворами металлических катионов; после кальциниро-

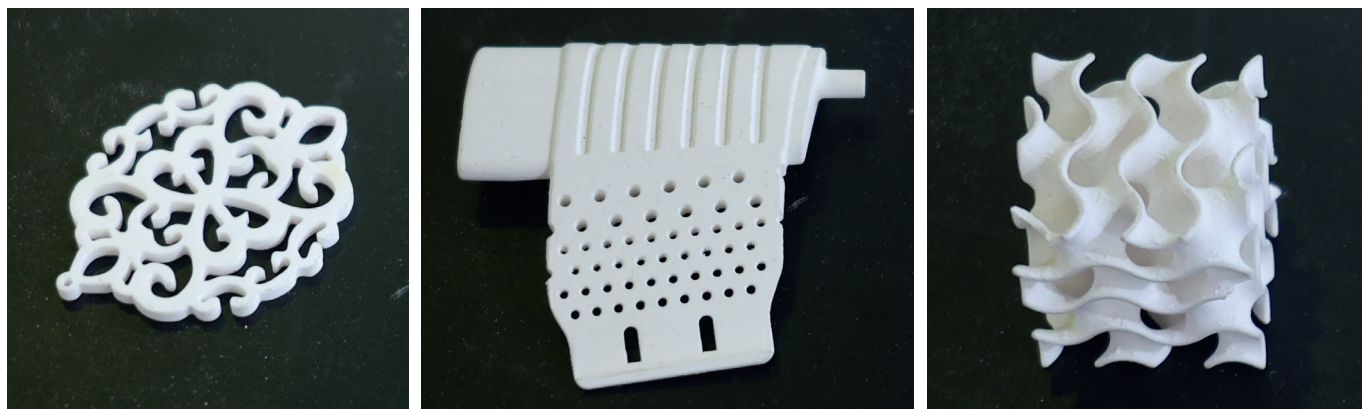


Рис. 4. Образцы ООО «Ретех», напечатаны на 3D-принтере «Прокерамика-170» из фирменной керамической пасты

вания органическая матрица выгорает, а катионы преобразуются в оксиды металлов. Метод принципиально расширяет спектр достижимых состава и пористости изделий.

Перспективы и стратегическое окно возможностей для России

Совокупность глобальных трендов и специфика российского рынка формирует уникальное стратегическое окно для развития отечественного производства технической керамики методами АТ. Инвестиционная логика этого направления опирается на пять ключевых предпосылок.

Во-первых, вход в высокомаржинальную нишу с суперотраслевым ростом: CAGR мирового рынка керамической АТ в 31,2% на фоне CAGR российского рынка АТ в целом порядка 41,3% (2021–2024) обеспечивает двойной попутный ветер.

Во-вторых, соответствие государственным приоритетам: программы импортозамещения, реверс-инжиниринга и технологического суверенитета создают как финансовую инфраструктуру поддержки (гранты ФСИ, «Сколково», Фонд НТИ), так и гарантированный государственный спрос.

В-третьих, подтверждённая история спроса: 8 единиц импортного оборудования и сотни килограммов материалов, закупленных в 2017–2021 годах для ВИАМ и смежных организаций, убедительно документируют наличие реального промышленного запроса. Сегодня этот спрос полностью лишён импортного предложения.

В-четвёртых, проверенная бизнес-модель: путь, пройденный 3DCeram (от 1 млн евро в 2015 году до 5,56 млн в 2022-м) и Lithoz (14,8 млн евро выручки, >97% экспорта), подтверждает коммерческую жизнеспособность модели полного цикла — именно той, которую реализует «Прокерамика» в России.

В-пятых, экспортный потенциал: при выходе на рынки АРАС и Ближнего Востока российские решения могут составить конкуренцию западным производителям как по цене (материалы «Прокерамики» в 1,5–2 раза дешевле импортных аналогов), так и по независимости от западных цепочек поставок.

Реалистичная трёхфазная стратегия развития предполагает: консолидацию на внутреннем рынке в 2026–2028 годах с выполнением контрактов для ОПК и науки; выход на рынки СНГ и Ближнего Востока в 2029–2030 годах; активную экспансию в Юго-Восточную Азию и специализированные ниши мирового рынка с 2031 года — в синхронизации с достижением глобальным рынком объёма 2,5 млрд долларов к 2034 году.

Заключение

Аддитивное производство технической керамики переживает качественный переход: от экспериментальной лабораторной технологии к полноценному промышленному инструменту. Цифры говорят сами за себя: рынок технической керамической 3D-печати достиг 186,5 млн

долларов в 2025 году, растёт быстрее всего мирового рынка АТ и к 2034 году превысит 2,5 млрд долларов. Финальные детали уже составляют более половины объёма услуг сервисных бюро — технология перешагнула порог прототипирования.

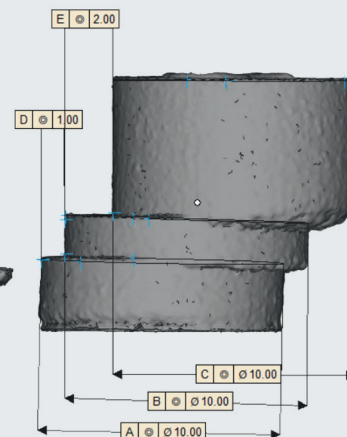
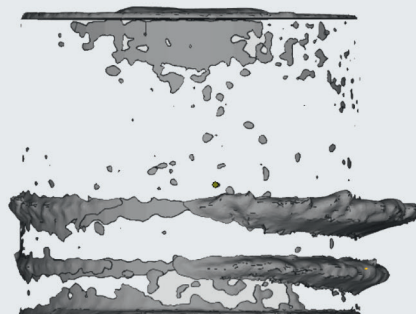
Россия обладает всеми необходимыми предпосылками, чтобы занять достойное место в этой формирующейся глобальной отрасли: развитой школой материаловедения и химии керамики, государственной поддержкой импортозамещения, подтверждённым промышленным спросом и, что особенно важно, уже работающей отечественной компанией с готовой технологической экосистемой.

«Прокерамика» — не просто стартап, заполняющий нишу, оставленную ушедшими иностранными поставщиками. Это первая российская компания, создающая полный технологический цикл: собственные материалы, оборудование, ПО и производственные услуги. Опыт мировых лидеров — Lithoz и 3DCeram — показывает: именно такая модель вертикальной интеграции обеспечивает долгосрочную конкурентоспособность и возможность экспортной экспансии. У российской технической керамики есть все шансы повторить этот путь. ■

Литература

1. VoxelMatters Research. Ceramic AM 2024–2034: Technical Ceramic AM — A Comprehensive Analysis of the State of the Market and 10-Year Forecast. VoxelMatters Ltd., July 2025. URL: <https://www.voxelmatters.com>
2. VoxelMatters Research. Ceramic AM Market Update 2026: Ceramic AM market shifts toward services as production scales. VoxelMatters Ltd., March 2026. URL: <https://www.voxelmatters.com/ceramic-am-market-shifts-toward-services-as-production-scales/>
3. Wohlers Associates / ASTM International. Wohlers Report 2025: State of the AM Industry. ASTM International, April 2025. URL: <https://wohlersassociates.com/product/wr2025>
4. Wohlers Associates / ASTM International. Wohlers Report 2026: Global AM revenues reached \$24.2 billion. ASTM International, February 2026. URL: <https://www.metal-am.com/new-wohlers-report-2026-highlights-24-2b-global-additive-manufacturing-market/>
5. Клуб аддитивных технологий. Рынок технологий аддитивного производства РФ: маркетинговое исследование — 2025. Эксперт — Трубашевский Д. М., генеральный директор ООО «Синтезиум». Москва, 2025.
6. ООО «ИГ Инфомайн». Обзор рынка 3D-печати керамическими материалами в мире и России. Москва, 2022.
7. VoxelMatters Ltd. Ceramic AM. A niche, but highly impactful segment (eBook). VoxelMatters, July 2025. URL: <https://www.voxelmatters.com>
8. Rahman M., Hoque Thakur Md. Sh. et al. Origami-Inspired 3D Printed Ceramic Metamaterials. University of Houston, 2025. (Цит. по: VoxelMatters eBook, 2025, p. 46–48.)
9. Trice R. et al. 3D Printed Dark Ceramics for Advanced Hypersonics. Purdue Applied Research Institute (PARI), 2025. (Цит. по: VoxelMatters eBook, 2025, p. 48–49.)
10. UT Dallas Research Group. Ultrafast Thermal Debinding Technique for 3D Printed Zirconia. University of Texas at Dallas, 2025. (Цит. по: VoxelMatters eBook, 2025, p. 49–50.)
11. Брыжак Е. «Просто никогда не сдаюсь»: Игорь Пчелинцев о том, чем керамика лучше металла, почему стартап — это не грант и как не выгореть. Idel.top, 14 марта 2026. URL: <https://idel.top/news/kultura/prosto-nikogda-ne-sdiaus-igor-pcelincev>
12. ООО «Петех» («Прокерамика»). Меморандум проекта «Прокерамика». Внутренний документ компании, 2025.
13. 3Dnatives. Wohlers Report 2025: 9.1% Growth for the Global Additive Manufacturing Market. April 14, 2025. URL: <https://www.3dnatives.com/en/wohlers-report-2025-growth-global-additive-manufacturing-140420256/>

Непрерывный контроль как гарант стабильности серийного аддитивного производства



Аддитивные технологии активно находят применение в промышленности, но вопрос обеспечения качества изделий, воспроизводимости процессов и, как следствие, их сертификации остается до конца не решенным. О перспективах эффективного контроля качества на аддитивном производстве рассказал Иван Иванов, доцент кафедры теоретической физики и квантовых технологий НИТУ МИСИС, заместитель генерального директора АО «НПО «ЦНИИТМАШ» и директор Института металлургии и машиностроения АО «НПО «ЦНИИТМАШ».

Отсутствие эффективных методик контроля является барьером для внедрения аддитивных технологий в нашей стране?

Безусловно, недостаточное развитие методов контроля, аттестации и оценки соответствия является одним из существенных барьеров для широкого внедрения аддитивных технологий в России. Российский рынок в этой сфере пока занимает сравнительно скромное место на фоне мирового, несмотря на бурный рост и высокий интерес со стороны промышленности. При этом наибольший эффект от внедрения аддитивных технологий ожидается именно в ответственных отраслях: авиационной, атомной, энергетической, медицинской и других, где требования к качеству и воспроизводимости особенно высоки. В таких условиях ключевое значение имеет не просто наличие отдельных методов контроля, а создание отработанной системы квалификации, верификации и сертификации как самих процессов, так и готовых изделий. Поэтому сегодня ограничением выступает не отсутствие аддитивных технологий как таковых, а недостаточная зрелость нормативной и методической базы контроля, необходимой для их масштабного и серийного промышленного применения. Именно поэтому в рамках реализации комплексной научной программы Госкорпорации «Росатом»¹ принципиальным требованием было не только изготовление опытных образцов изделий, но и разработка проектов стандартов, способных создать основу для последующего нормативного закрепления и практического внедрения полученных результатов.

¹ Речь идет о проектах по направлению, реализованных в рамках Единого отраслевого тематического плана Госкорпорации «Росатом» (ЕОТП) и Федерального проекта № 4 в составе программы РТТН: «Разработка новых материалов и технологий для перспективных энергетических систем» (ФП-4 РТТН).

Как сейчас осуществляется контроль на аддитивном производстве?

На практике в аддитивном производстве применяются традиционные подходы к контролю качества, включая изготовление и испытание образцов-свидетелей. Дополнительно используются 3D-сканирование и томография, позволяющие оценивать соответствие геометрии изделия заданной модели и выявлять внутренние дефекты. Однако этого недостаточно, поскольку условия формирования структуры и свойств внутри изделия могут существенно отличаться от условий выращивания образцов-свидетелей.

В какой части не работают традиционные методики?

Аддитивные технологии во многом выходят за рамки традиционных подходов к контролю качества. Если рассматривать, например, селективное лазерное сплавление металлических порошков, то здесь возникает первая принципиальная проблема: технологические параметры задаются на этапе подготовки 3D-модели и файла печати, однако само по себе задание этих параметров еще не означает, что в каждой конкретной точке построения действительно обеспечивается требуемый энергозатрат. На большинстве установок это не контролируется напрямую. Оператор может лишь косвенно судить о ходе процесса по внешнему виду факела, отдельным признакам стабильности плавления, результатам контроля образцов-свидетелей и итоговым характеристикам изделий. Однако этого недостаточно для гарантии того, что фактические условия сплавления полностью соответствуют заданным. На практике встречаются случаи, когда после прямого измерения мощности лазерного излучения на уровне платформы выяснялось, что она заметно, вплоть до десятков процентов, отличается от ожидаемой. Для экспериментальных изделий это может быть допустимым риском, но при изготовлении ответственных деталей подобное расхождение способно привести к серьезным последствиям.

Вторая принципиальная особенность аддитивного производства связана с существенной ролью случайного фактора. В традиционных технологиях, например, при получении заготовки из слитка с последующей ковкой и механической обработкой, материал проходит через большую жидкую ванну расплава, затем через термомодеформационный передел, после чего его свойства можно проверить отбором проб в регламентированных зонах, а при необходимости дополнительно проконтролировать ультразвуковыми или рентгенографическими методами. В аддитивном же процессе, например, если говорить о SLM или DMD, формирование изделия происходит через огромное количество локальных жидких ванн, причем без последующего термомодеформационного передела, способного сгладить локальные отклонения. Поэтому случайные сбои в отдельных участках построения оказывают значительно более существенное влияние на конечный результат.

Особенно критично это для тонкостенных и высо-

конагруженных изделий. Даже локальное нарушение сплавления в одном из слоев может сформировать зону ослабления, которая впоследствии станет местом зарождения разрушения. При этом такие дефекты далеко не всегда выявляются по образцам-свидетелям, поскольку последние отражают лишь общую стабильность процесса, но не гарантируют обнаружение единичных локальных сбоев в конкретной детали.

Таким образом, применительно к аддитивному производству ключевыми становятся две задачи. Первая — обеспечить, чтобы заданные технологические параметры действительно реализовывались в каждой зоне сплавления. Вторая — минимизировать случайный фактор либо создать средства его надежного выявления и контроля. Именно в этой части традиционные методики контроля оказываются недостаточными: они позволяют оценить результат постфактум, но не всегда дают возможность подтвердить стабильность процесса на уровне каждой локальной зоны формирования материала.

Есть другие, более достоверные алгоритмы контроля, может быть, не у нас, за рубежом?

Сегодня и в России, и за рубежом развитие систем контроля в аддитивном производстве в целом идет по двум основным направлениям. Первое — это использование традиционных методов оценки качества готовых изделий. Второе — внедрение систем непосредственного мониторинга самого процесса выращивания, позволяющих контролировать параметры формирования материала непосредственно в ходе печати.

Именно это направление сегодня рассматривается как наиболее перспективное, поскольку оно позволяет не только фиксировать результат после завершения процесса, но и отслеживать возможные отклонения в момент их возникновения. Одной из первых компаний, активно развивавших такие решения, была EOS, предложившая системы EOSTATE MeltPool и EOSTATE PowderBed. В России такой подход также получил развитие. Так, в рамках реализации комплексной научной программы «Росатома» были созданы опытные образцы аддитивных установок, часть которых оснащалась системами непосредственного контроля процесса 3D-печати. При этом одним из ключевых требований к разрабатываемым единицам оборудования было использование не просто отечественной программно-аппаратной части управления, а специализированной программно-аппаратной платформы, предусматривающей подключение систем непосредственного контроля различного типа. Такой подход позволял интегрировать средства мониторинга, ориентированные не только на наблюдение за ходом печати, но и на контроль условий формирования структуры и свойств синтезируемого материала.

В чем заключается идея непрерывного контроля? Если возможно, пожалуйста, с примерами.

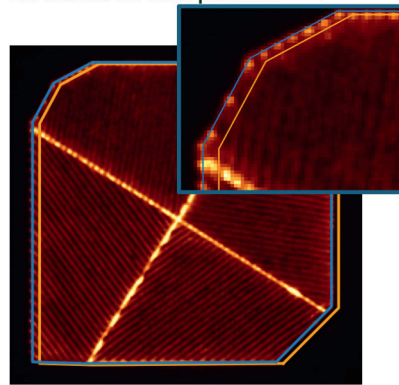
Идея непрерывного контроля в аддитивном производстве заключается в том, что состояние процесса оценива-

ется не только по итоговому результату, но и непосредственно в ходе построения изделия, слой за слоем и участок за участком. Такой подход позволяет не просто фиксировать уже сформировавшийся дефект, а выявлять отклонения в момент их возникновения, оценивать их значимость и, в ряде случаев, сразу принимать корректирующие меры.

На практике можно выделить несколько уровней реализации такого подхода. Первый вариант — это обнаружение и цифровая регистрация сбоя без вмешательства в процесс. Система фиксирует, что, где и на каком этапе произошло, формируя цифровой след для последующего анализа. Второй вариант — выявление отклонения в режиме реального времени с последующей его классификацией. Если дефект признается несущественным, информация о нем заносится в базу данных, и печать продолжается. Если же отклонение может повлиять на качество изделия, процесс останавливается или приостанавливается, после чего оператор или технолог принимает решение о продолжении либо прекращении печати.

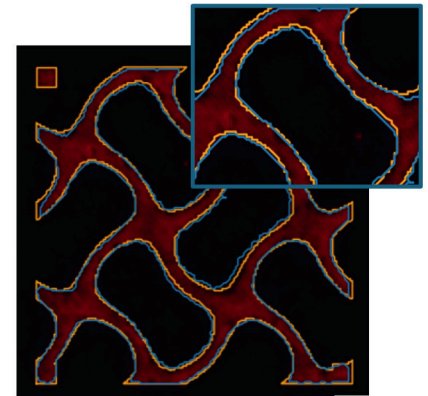
Наиболее перспективным является сценарий с использованием обратной связи, когда система не только обнаруживает проблему, но и автоматически выбирает способ компенсации. По сути, следующим шагом в развитии такого подхода становится создание цифровых двойников аддитивного процесса на базе программного обеспечения «Виртуальный принтер», который разрабатывается РФЯЦ-ВНИИЭФ по заказу ООО «Росат». Он позволяет моделировать процессы на разных масштабных уровнях и прогнозировать параметры качества материала и изделия на каждом из них (рис. 1–4). В соче-

Контроль положения детали на области построения



■ Фактическое положение контура

Контроль формы внутренних полостей



■ Положение контура по CAD модели

Рис. 1. Контроль геометрии при 3D-печати

тании с программно-аппаратной платформой и системами контроля это дает возможность не только фиксировать отклонения, но и заранее оценивать их последствия для конечного результата, то есть переходить к полноценному управлению качеством на основе предиктивной аналитики.

Простейший пример — контроль качества нанесения порошкового слоя (рис. 1). Если система обнаруживает локальное порошковое голодание, возможна повторная подача порошка и повторное нанесение слоя. Если после этого отклонение устраняется, печать продолжается, а событие рассматривается как случайный сбой. Если же проблема сохраняется, процесс целесообразно остановить для дальнейшего анализа.

Другой пример связан с изменением мощности лазерного воздействия (рис. 3). Если в процессе печати система фиксирует снижение мощности в конкретной зоне, например, из-за загрязнения оптики, нестабильности

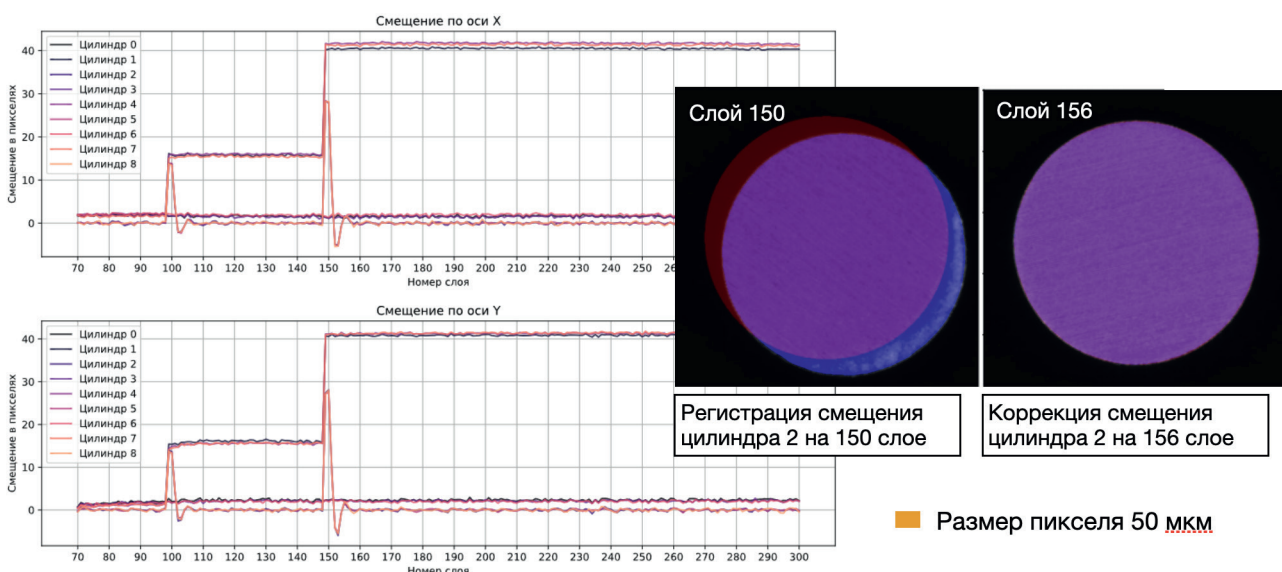


Рис. 2. Исследования возможности корректировки геометрии в процессе 3D-печати

источника излучения или другого внешнего фактора, то в разумных пределах возможно автоматическое восстановление требуемого уровня воздействия. Это особенно важно при изготовлении дорогостоящих изделий, когда остановка процесса после длительного времени печати приводит к значительным потерям. В такой ситуации печать может быть завершена, а причины отклонения — проанализированы уже после окончания цикла.

В перспективе аналогичный подход может применяться и к более сложным ситуациям. Например, если в многолазерной установке один из лазеров выходит из строя, теоретически система могла бы не просто остановить процесс, а оперативно перераспределить зоны построения между исправными лазерами путем изменения стратегии печати. Такие решения требуют высокой степени автоматизации и надежных алгоритмов управления, однако именно они отражают суть непрерывного контроля: не только наблюдать за процессом, но и обеспечивать его устойчивость в реальном времени.

А алгоритм непрерывного контроля трудно реализовать внутри 3D-принтера?

Я бы не сказал, что реализация алгоритмов непрерывного контроля внутри 3D-принтера является принципиально неразрешимой задачей. Основные трудности здесь носят не концептуальный, а инженерный характер. Для этого еще на этапе проектирования оборудования необходимо закладывать возможность интеграции дополнительных аппаратных средств. Например, в установках SLM в центральной зоне обычно располагаются системы сканирования лазерного излучения, причем в современных машинах их, как правило, несколько — два, три, четыре, восемь и более. Поэтому средства наблюдения, в частности камеры, чаще всего приходится размещать по периферии верхней части рабочей камеры с учетом особенностей компоновки оборудования.

Что в такой системе сложнее — аппаратная часть или программная?

На практике здесь довольно трудно жестко разделить аппаратную и программную части, поскольку они тесно связаны между собой и фактически образуют единую систему. Эффективность непрерывного контроля определяется не только характеристиками камер, датчиков и схемой их размещения, но и тем, насколько корректно программное обеспечение умеет собирать данные с разных источников, синхронизировать их, сшивать изображения, интерпретировать результаты

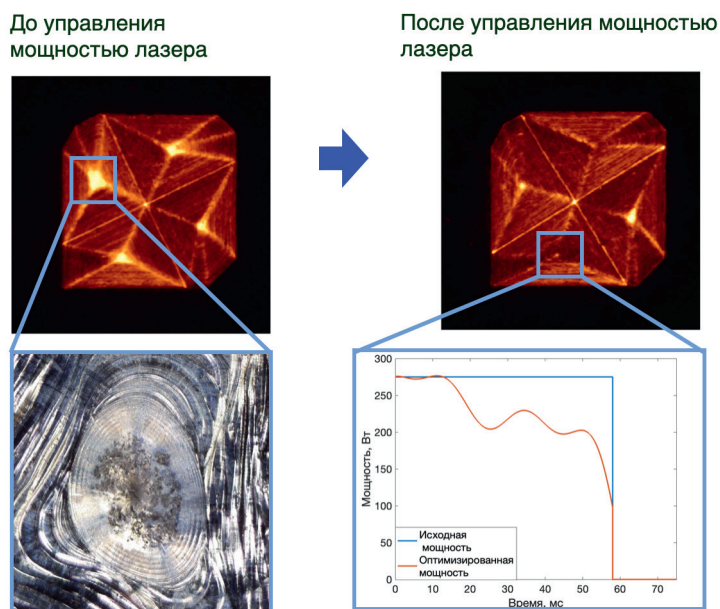


Рис. 3. Контроль тепловых условий с обратной связью по мощности лазера

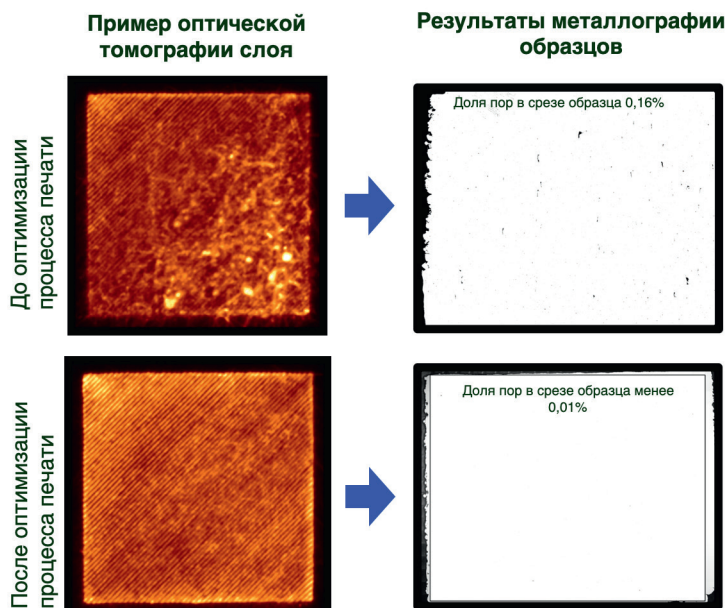


Рис. 4. Связь данных системы контроля и пористости аддитивного материала

наблюдений и выделять действительно значимые отклонения процесса.

Тем не менее, если говорить о наиболее сложной задаче, то она чаще всего лежит на стыке аппаратной и программной частей. Недостаточно просто установить средства наблюдения — необходимо обеспечить устойчивый съём данных, корректную работу всей измерительной системы в реальных условиях печати и превратить поток сигналов в инструмент оперативного управления процессом. Именно поэтому ключевые трудности обычно связаны не с каким-то одним элементом, а с интеграцией аппаратуры, алгоритмов обработки и программной среды в единую работоспособную систему.

Есть ли уже в России реальные примеры такой реализации?

Да, такие примеры уже есть. В рамках Комплексной научной программы «Росатома» (примечание редакции: ЕОТП и ФП-4 КП РТТН) создаются не просто отдельные единицы аддитивного оборудования, а полноценная технологическая экосистема, включающая материалы, программное обеспечение для моделирования аддитивного процесса, программно-аппаратную платформу, лазерно-оптические системы, сами установки и средства контроля технологического процесса. На этой основе, по сути, создана линейка отечественного аддитивного оборудования нового поколения для работы с металлическими, керамическими и композиционными материалами. Принципиально важно, что такие разработки изначально ориентированы не только на сам процесс выращивания, но и на его контроль, а в дальнейшем — на реализацию интеллектуальной обратной связи, способной повысить воспроизводимость и качество изделий.

Если говорить о конкретных примерах, то в контуре «Росатома» и партнерских организаций такой подход уже реализован для основных классов аддитивных технологий. В АО «НИИГрафит» разработаны и изготовлены 3D-принтеры для получения изделий из керамических материалов по технологиям LDM и SLA. В НИИ НПО «Луч» создан опытный образец установки селективного электронно-лучевого плавления порошка для тугоплавких материалов, а также развивается линейка отечественных систем сканирования для аддитивных установок. В АО «НПО «ЦНИИТМАШ» создана высокотемпературная установка MeltMaster3D-300HT с возможностью подогрева до температур вплоть до 800 °С. Все эти решения объединяет использование единой программно-аппаратной платформы управления процессом синтеза материала и наличие систем непосредственного контроля за ходом построения изделия.

А многолазерную печать, наверное, кратно труднее контролировать?

Я бы не сказал, что многолазерную печать кратно труднее контролировать. Если речь идет о системе мониторинга всей области сплавления, то такой контроль обычно строится на использовании камер высокого разрешения, которые охватывают все рабочее поле одновременно и фиксируют все активные тепловые зоны, возникающие в процессе печати. Поэтому с точки зрения самой идеи наблюдения многолазерная схема не делает задачу принципиально более сложной — возрастает прежде всего объем данных и требования к их синхронной обработке.

Более того, в современных сканирующих системах уже на уровне конструкции нередко предусматривается возможность интеграции соосных систем контроля процесса, в том числе температурного мониторинга. Это касается не только зарубежных решений, но и отечественных разработок. В частности, в НИИ НПО «Луч»

разработан трехосевой лазерный сканатор для аддитивных установок, в конструкции которого предусмотрены модули сопряжения постоянного и импульсного лазерного излучения, а также модуль контроля температуры. Это показывает, что встроенный контроль сегодня рассматривается уже не как экзотическое решение, а как естественное направление развития аддитивного оборудования.

Непрерывный контроль предполагает работу с большим массивом данных, а значит, и повышенные требования к вычислительным мощностям?

Непрерывный контроль действительно связан с обработкой больших массивов данных, однако я бы не назвал это критическим ограничением. Уже на базовом уровне большинство современных аддитивных установок и сопутствующих рабочих станций располагают достаточно серьезными вычислительными ресурсами, поскольку сама подготовка 3D-модели к печати, формирование задания и работа с технологическими файлами также требуют производительного компьютерного обеспечения.

Вместе с тем в данном случае речь идет уже не об обработке отдельных изображений, а о непрерывном потоке данных — последовательностях кадров высокого разрешения, формируемых в ходе всего процесса печати. Безусловно, для их регистрации, хранения и оперативного анализа необходимы заметные вычислительные мощности. Однако и это сегодня не выглядит принципиальной проблемой, поскольку подобные аппаратно-программные комплексы широко применяются и в других областях техники, а их стоимость уже не является заведомо высокой.

При этом по мере роста объема данных особую роль начинают играть методы интеллектуальной обработки информации. Для эффективного анализа таких потоков все более востребованными становятся алгоритмы машинного обучения и искусственного интеллекта, способные выявлять аномалии, классифицировать отклонения и поддерживать принятие решений в реальном времени. Соответственно, задача заключается не только в наличии вычислительных мощностей как таковых, но и в создании подходящей аппаратно-программной среды, позволяющей быстро и надежно реализовывать такие алгоритмы в составе аддитивного оборудования.

Если сделать вывод кратко, то большие объемы данных действительно предъявляют повышенные требования к вычислительной инфраструктуре, но в настоящее время это скорее инженерная задача, чем принципиальный барьер для внедрения непрерывного контроля.

Кто отвечает за поставку ПО?

На мой взгляд, разработчик программно-аппаратных средств и систем контроля должен поставлять необходимый базовый минимум программного обеспечения,

включающий в себя сбор, визуализацию, хранение и первичную обработку данных, получаемых в процессе 3D-печати. При этом пользовательский интерфейс и программная архитектура должны оставаться достаточно открытыми, чтобы сторонние организации: промышленные компании, университеты, исследовательские группы и даже студенты — могли разрабатывать и подключать собственные алгоритмы анализа. Такой подход представляется наиболее продуктивным, поскольку далеко не все задачи мониторинга требуют применения сложных моделей машинного обучения: во многих случаях достаточно эффективно работают и сравнительно простые алгоритмы обработки изображений.

Например, для выявления дефектов нанесения порошкового слоя нередко оказывается достаточной элементарная обработка изображения с поиском линейных аномалий. Такие методы не требуют чрезмерно сложной вычислительной инфраструктуры, но при этом позволяют достаточно надежно выявлять ряд характерных отклонений процесса. Поэтому задача поставщика программного обеспечения состоит не только в создании собственных алгоритмов, но и в формировании такой программно-аппаратной среды, в которую при необходимости могут быть встроены внешние решения.

Например, в установке МАСТ-300 разработки АО «НПО «ЦНИИТМАШ» используется отечественное программно-аппаратное обеспечение разработки и поставки компании «Райтек», реализующее базовые функции мониторинга, обработки и анализа данных и предоставляющее программный интерфейс доступа к базовому функционалу для внешних разработчиков.

Хорошо. Мы получили какой-то результат. Какова степень его достоверности? Мы должны дополнительно использовать и другие методики?

Хочу подчеркнуть, что речь не идет о замене традиционных методов контроля, а о формировании дополнительных подходов, учитывающих специфику именно аддитивного производства.

Степень достоверности таких систем определяется тем, насколько надежно установлена связь между их показаниями и реальными параметрами качества изделия: уровнем дефектности, плотностью, структурой материала, механическими и другими свойствами. Именно установление такой однозначной взаимосвязи сегодня является одной из важнейших научно-технических задач. Сначала она должна быть подтверждена исследованиями, и только после этого на данной основе могут разрабатываться и внедряться методики для конкретного оборудования и конкретных технологий.

В настоящее время этому направлению уделяется большое внимание, в том числе в Передовой инженерной школе МАСТ, созданной Университетом МИСИС совместно с Научным дивизионом Госкорпорации «Росатом», где ведутся исследования, направленные на установление связи между данными систем мониторинга и параметрами

качества материалов и изделий, получаемых аддитивными технологиями.

А для каких технологий непрерывный контроль актуален?

Непрерывный контроль особенно актуален там, где с помощью аддитивных технологий изготавливаются ответственные изделия, работающие под нагрузкой, при высоких температурах, в агрессивных средах или в других сложных условиях эксплуатации. В таких случаях особенно важно понимать, что процесс изготовления проходил стабильно и без критических отклонений. Именно поэтому для подобных применений непрерывный контроль имеет принципиальное значение.

Каковы перспективы внедрения такого подхода?

Перспективы у этого подхода, на мой взгляд, очень хорошие. Результаты наших работ и проектов комплексной научной программы Госкорпорации «Росатом» позволяют говорить о наличии связи между показаниями систем контроля и параметрами качества материала. Сейчас важно дополнительно подтвердить это исследованиями и убедительно показать надзорным органам надежность таких методик. При этом одним из наиболее перспективных направлений является цифровая паспортизация аддитивного материала, ключевой особенностью которой становится цифровой след формирования структуры и свойств на всех этапах построения изделия. В сочетании с цифровым двойником процесса это открывает возможность не только фиксировать отклонения, но и прогнозировать их влияние на конечный результат, а значит — обеспечивать стабильно высокое качество аддитивной продукции.

Не менее важным представляется и развитие подходов к контролю на базе облачной системы аттестации и оценки соответствия. Такая система может обеспечивать централизованный сбор, хранение, обработку и сопоставление данных о параметрах процесса, результатах мониторинга, цифровых паспортах материалов и характеристиках готовых изделий. По сути, это создает основу для единообразной оценки соответствия, накопления статистики и формирования доверенной цифровой среды, необходимой для квалификации технологий и серийной продукции.

Если эта работа будет доведена до нормативного и методического оформления, мы сможем сделать большой шаг к преодолению одного из ключевых барьеров на пути широкого внедрения аддитивных технологий в России — недостаточной зрелости нормативной и методической базы. ■

Вопросы задавала Татьяна Карпова

Использованы фото



Аддитивные технологии в ветеринарии



Университет науки и технологий МИСИС развивает аддитивные технологии в нескольких направлениях, в т.ч. медицинском, включая печать имплантатов и биопринтинг. И если о хирургических операциях для лечения людей на конференциях говорят сравнительно часто, то об опыте в ветеринарии информации мало. На вопросы по данной тематике ответил директор Института биомедицинской инженерии МИСИС, д.ф.-м.н. Фёдор Сенатов.

3D-печать в области ветеринарии — это прежде всего опыты, результаты которых можно применить для лечения человека, или это самостоятельное направление?

И для животных, и для человека, конечно же, могут быть общие подходы, если мы говорим, например, о замещении небольших ненагруженных дефектов костной ткани после травм, воспроизводстве структуры костей с точки зрения необходимости остеоинтеграции. Но если речь идет о проблемах, связанных с конечностями, с опорно-двигательным аппаратом, то у животных другая биомеханика. Опора осуществляется на четыре лапы, с чем связано отличное от человека распределение нагрузки. Поэтому 3D-печать в ветеринарии необходимо рассматривать как самостоятельное направление.

Каких животных и какие их болезни лечат с помощью 3D-печати?

Чаще всего, конечно же, лечат домашних животных: собак, кошек, лошадей. Например, используются различные имплантаты для восстановления подвижности конечностей, потому что животное участвует в каких-то выставках, в разведении и т.д. Бывают обращения и с более мелкими животными, например, кроликами, когда хозяева хотят восстановить какие-то участки тканей. В мировой практике даже попугаям изготавливали внешние протезы для лапок. 3D-печать позволяет индивидуально подходить к существующей проблеме.

Примечательно, что в мировой практике есть даже опыт страхования животных, и в каких-то случаях страховка может покрывать создание сложноконфигурированных имплантатов.

Какие технологии 3D-печати наиболее подходят для ветеринарных задач?

В основном осуществляется печать металлами и пластиками. Металлические изделия обычно изготавливают с помощью технологии селективного лазерного плавления. По материалам — чаще всего это стандарт, давно применяемый в медицине для человека: титановые сплавы, например Ti–Al–V. 3D-печать металлами используется с целью восстановления подвижности конечностей, малых и крупных костей, формирования каких-либо ортезов и креплений и так далее.

Для 3D-печати полимерными материалами чаще используется технология FDM как дешевая, распространенная и гибкая с точки зрения индивидуального подхода. Достаточно иметь термопласт или композиционный материал на основе термопласта с адекватным диапазоном плавления для того, чтобы формировать те же самые ортезы или имплантаты костей с небольшой нагрузкой. Понятно, что полимерные материалы будут уступать металлическим с точки зрения физико-механических свойств, но дешевизна играет большую роль.

Используется ли в ветеринарии биопечать? Есть ли к этому потенциал?

Если мы говорим про направление, где в ходе печати используются живые клетки, то во всем мире оно активно развивается, но в первую очередь в области печати мягких тканей. Россия входит в топ-5 стран, и в чем-то мы мировые лидеры: осуществление печати сразу на человеке или на животном, первая в мире операция с применением биопечати *in situ* сразу на человеке в 2023-м году, применение методов биофабрикации в различных полях — в магнитном, акустическом.

Развитие биопечати идет в три больших этапа. Первый — печать плоских органов, в том числе кожи. И это достаточно понятный, лабораторно пройденный этап, который сейчас точно и постепенно входит в клиническую практику. Второй — печать трубчатых органов, кровеносных сосудов. Весь мир пока остановился на нем, поскольку изготавливать стабильные кровеносные сосуды сложно, а пока этого не сделаешь, затруднительно перейти на третий этап. Третий этап — это печать больших функциональных органов: печень, почки, сердце. Несмотря на то, что революционный шаг был сделан в России компанией 3D Bioprinting Solutions в 2014–2015 году в области печати щитовидной железы, в дальнейшем в мире существенных продвижений не было.

Можно ли наработки использовать в ветеринарии? Да, можно. Но пока клеточные технологии очень ограниченно используются. Практики ориентируются на стандартные подходы, которые адекватно могут быть применены для решения проблем. Сдерживающими факторами для биопринтинга являются цена и сложность технологии.

Какой существует алгоритм диагностики и хирургического воздействия с применением напечатанных изделий?

Если мы говорим про аддитивное производство изделий для ветеринарии, то, конечно же, входными данными должна быть 3D-модель. Компьютерная модель может быть получена разными путями. Классика — это томографические исследования (КТ, МРТ), иногда можно ограничиться просто данными с рентгеновского двумерного снимка. Также необходимо уточнить исходные данные животного — вес, сопутствующие заболевания. От этого будет зависеть, какие материалы лучше применять, насколько быстрая будет остеоинтеграция. При онкологическом заболевании, например, можно ожидать плохого заживления.

Второй этап — обсчет моделей и оптимизация под конкретный дефект.

Третий этап — подбор материалов, как правило, из имеющихся, которые уже стабильно применяются на рынке ветеринарии, как я уже сказал, это титановые сплавы, полимерные материалы или же, например, более точно, керамические материалы. Керамика — более дорогой материал, но тем не менее применяется в ветеринарии для элементов эндопротезов суставов. При каких-то сложных случаях иногда возникает необходимость разрабатывать специальный материал. И тут должны подключиться специалисты-биоматериаловеды, которые его разработают, проверят его биосовместимость, механические характеристики, оптимизируют под конкретную 3D-модель и желаемую структуру.

Допустим, имплантат должен быть пористый, значит, нужно учитывать оптимальные размеры пор для ускоренной остеоинтеграции, для прорастания кровеносных сосудов. Костные клетки остеобласты, например, любят размер пор примерно 300 мкм для заселения имплантата. Ряд вопросов также связан с адгезией, химией поверхности, материаловедением, оптимизацией компьютерной модели, обеспечением примыкания по границе. Работа по их решению проводится совместно инженерами, медиками, биологами, то есть работает мультидисциплинарная команда.

После того как эти этапы пройдены, обычно печатается проба из какого-нибудь дешевого ABS-пластика, чтобы

визуализировать модель, дать хирургу возможность покрутить ее в руках, приложить к дефекту.

Далее, если это нагруженный дефект, изготавливается имплантат, который испытывается лабораторно под предельной нагрузкой. На изделие для дога и чихуахуа будут оказываться различные воздействия. В случае успешного прохождения испытаний изготавливаются два дублирующих имплантата, второй запасной на случай, если что-то пошло не так. Бывают такие ситуации, когда хирургу интраоперационно нужно подработать даже сделанный по 3D-модели и, казалось бы, идеально подходящий имплантат.

С какой точностью необходимо воспроизводить имплантаты для животных?

По этому параметру мы руководствуемся опытом.

Высокая точность для изготовления костей, как правило, не требуется. Именно поэтому методы FDM-печати в случае небольших дефектов и селективное лазерное плавление подходят для изготовления имплантатов. В будущем, когда пойдет речь о биопечати кожи и элементов мягких тканей, опять-таки высокая точность до единицы микрон не нужна. Надо просто соблюсти необходимую конгруэнтность, а дальше организм животных сделает свое дело.

Где в медицине нужна высокая точность? Например, для людей в области стоматологии, где каждая небольшая шероховатость может быть чувствительна.

Помнится, лет шесть назад широко прошла информация о том, как ветеринар из Новосибирска Сергей Горшков вживлял протезы кошкам. Ваш доклад шестилетней давности содержал сведения о спасенных собаках. А есть ли какая-то программа по лечению животных с применением 3D-печати?

Специализированных программ именно для животных, наверное, нет. Честно говоря, я не слышал. Возможно, есть помощь от фондов. Именно поэтому чаще всего на ветеринарном рынке по направлению 3D-печати работают те компании, которые в первую очередь ориентируются человека, а как некий спин-офф что-то делают и для ветеринарии.



Рис. 1. Металлополимерная конструкция для кота Лапуни

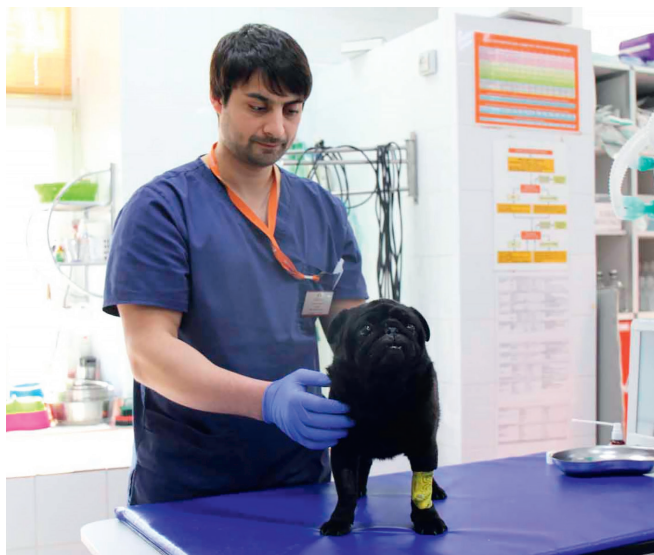


Рис. 2. Дыхательный полимерный стент для собак с коллапсом гортани

Приведите примеры из своей практики, которые Вы считаете особенными: сложными, высоко востребованными, многообещающими...

Я бы из нашей практики выделил три значимых события. Первое в 2016–2017 годах, когда именно для ветеринарии мы пробовали использовать клеточные инженерные конструкции. Это были первые в России опыты МИСИС с коллегами из НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина и клиники «Биоконтроль», когда 3D-напечатанную металлополимерную конструкцию комбинировали с клетками пациента. Тогда был проведен первый и важный для нас опыт с котом Лапуней, которому было на тот момент 15 лет. Диагноз — остеосаркома, резекция кости на лапе — 7 сантиметров, восстановление с помощью клеточной инженерной конструкции (рис. 1). Это был знаковый прецедент, который подтолкнул развитие не только в ветеринарии, но и для лечения людей.

Вторая группа довольно сложных случаев — это разработка дыхательных стентов для собак с коллапсом гортани. Работа также велась с коллегами из клиники «Биоконтроль» (рис. 2).

У некоторых собак, таких как мопсы, может наблюдаться коллапс гортани, когда из-за проблемных изменений тканей остается минимальный для дыхания просвет. Чтобы облегчить дыхание, устанавливается трубка, но собаки ее часто выкашливают. Вот для этих задач мы с коллегами и разрабатывали дыхательный металлополимерный стент с памятью формы. В свернутом виде его помещали в гортань, где при воздействии температуры тела собаки он контролируемо менял форму, деликатно



Рис. 3. Артродезы с памятью формы

раздвигая стенки гортани. Это была довольно сложная задача, которая потребовала глубоких знаний в области биоматериаловедения.

Ну и третья группа разработок — это артродезы с эффектом памяти-формы (рис. 3). Когда надо фиксировать сустав у собак, это делается с помощью довольно жесткого полимерного материала, который обладает эффектом памяти формы. Например, он фиксируется на косточках рядом с суставом в свободном режиме и потом, нагреваясь, начинает видоизменяться, облегая кости, сустав необходимым для фиксации образом. То есть он приводит сустав в анатомически верное положение, которое по 3D-модели задано заранее.

Почему в решении ваших задач была сделана ставка на 3D-печать?

Применение 3D-печати обусловлено необходимостью создания индивидуальной по форме и структуре конструкции сложной геометрии, которую традиционными способами невозможно изготовить.

Вы упомянули про материалы с памятью формы. Расскажите о них чуть подробнее.

Материалы с памятью формы как группа развиваются с 60–70-х годов. МИСИС начал развивать медицинское направление в 70-х годах, и в 1977 году здесь были разработаны медицинские сплавы с памятью формы на основе титана, а в 1984 году совместно с ВНЦХ (сейчас — Центр хирургии им. Б.В. Петровского) была проведена первая в мире операция по стентированию кровеносного сосуда человека стентом с памятью формы. После этого металлы с памятью форм начали активно применяться по всему миру в основном для стентирования. Позже стали развиваться полимерные материалы с памятью формы, вот из них-то и стали изготавливать медицинские имплантаты, которые, например, малоинвазивно могут быть введены через небольшое отверстие в организм, отогреваются и самопозиционируются. Это пока точечное использование и широко в клинической практике не применяется, но развитие идет.

Есть ли запрос на такие операции и лечение от ветеринаров?

Конечно, есть. Только через взаимодействие с практикующими специалистами это направление можно продвигать. Среди наших сотрудников есть и медики, и биологи, но невозможно развиваться без конкретного запроса от ветеринаров. Человек, который будет применять наработки, — это хирург. Если ему по какой-то причине неудобно ставить имплантат или какую-то другую конструкцию, он просто не будет ее использовать. Изначально важно учитывать его запросы к изделию или оборудованию. Кроме того, нужны готовить кадры, которые потом смогут работать с таким сложным оборудованием, как, например, для биопечати. От них требуется понимание биологических, материаловедческих, химических, инженерных, даже IT-нюансов. Мы учитываем это, когда готовим студентов.

Надо ли получать разрешение на применение 3D напечатанных изделий в ветеринарной практике?

Чаще всего в ветеринарной практике предъявляются те же самые требования, что и в медицине, — по помещению, по разрешительным документам на индивидуальное изделие, поскольку процессы, в принципе, очень схожие.

Как Вы видите развитие этого направления?

В первую очередь надо больше внимания уделять изучению биомеханики животных. Даже если мы говорим про какие-то небольшие изделия, например, кейджи для позвоночника, просто перенести опыт из медицинской практики в ветеринарную неправильно. Моделирование должно осуществляться с учетом анатомии конкретных животных. И в этом ключевое требование для развития в ветеринарии.

А как обеспечить обмен информацией в этой области, чтобы не каждый начинал с нуля, а мог воспользоваться опытом коллег?

Надо чаще встречаться. У нас есть замечательные партнеры, мы можем с ними пообщаться, позвонить

в любой момент. Но часто получается так, что хирурги развиваются и общаются в своем сообществе, разработчики инженерных решений и материаловеды — в своем, пересечений нет. И если сейчас медики и инженеры научились встречаться вместе на одних мероприятиях и таких мероприятий становится больше, то в области ветеринарии общение все еще идет на уровне личных знакомств. А это можно делать через какие-то форумы, чуть более широкие и специализированные, чтобы туда заходили не только ветеринарные врачи, но и биомедицинские инженеры.

Кто и в каких вопросах мог бы стимулировать необходимые работы?

Гранты всегда были очень хорошим вариантом поддержки, и при правильном позиционировании это еще стимул к взаимодействию. Например, выделение первых грантов в рамках федеральных целевых программ заставляло дружить университеты с промышленными предприятиями (индустриальными партнерами). Через субсидии, через грантовую поддержку можно инициировать программы, где обязательным пунктом является наличие партнера, разработчика из какой-то другой области, например, инженерии, материаловедения, клеточной биологии и т.д.

Можете поделиться ближайшими планами?

Сейчас в рамках Института биомедицинской инженерии МИСИС совместно с партнерами мы активно развиваем направления биопечати, 3D/4D-печати, лечения ран и ожогов, нейротехнологий, скрининга лекарственных препаратов, материалов для травматологии и ортопедии, тераностики. Часть этих разработок может быть применена и в ветеринарии. ■

Вопросы задавала Татьяна Карпова

*Использованы фотографии пресс-службы
Университета МИСИС*



Сотрудники Института Биомедицинской инженерии университета МИСИС: профессор Наталья Анисимова, ассистент Полина Ковалева, директор Фёдор Сенатов, доцент Владислав Львов

Аддитивное строительное производство в России: тренды и возможности

Фото: «Смартбилдсервис»

В декабре 2025 года были опубликованы результаты форсайт-исследования «Аддитивное строительное производство 2030–2036: глобальные тренды и стратегические возможности для России». Авторами выступили Алексей Олегович Адамцевич, к.т.н., директор НИИ СМиТ НИУ МГСУ, и Андрей Петрович Пустовгар, к.т.н., доцент, научный руководитель НИИ СМиТ НИУ МГСУ. Работа проводилась в соответствии с программой развития НИУ МГСУ на 2025–2036 годы в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030». Исследование направлено на комплексный анализ перспектив и разработку сценариев развития сложной многоуровневой системы аддитивного строительного производства, учитывающей взаимодействие технологий, институтов и рыночных участников в рамках заданных пространственных и временных координат, а также на формирование практических рекомендаций для российской экономики.

В обсуждении результатов анализа экономической эффективности строительных объектов с применением аддитивных технологий приняли участие ведущие специалисты отрасли от следующих компаний: AMT, «3Д Арт», RVS-3D, «Смартбилдсервис», WonderDom, «Кантридом», «Основание», «Дом из принтера», «Рокет Трейд», «3Д СДС», Aurora Lab, Arkon Construction, «Новые технологии» (г. Выкса), «Три оси», Ассоциации производителей строительных 3Д-принтеров (АПСП), Ассоциации профессионалов аддитивного строительства (АПАС), Комитета по науке и инновационному развитию строительной отрасли Российского союза строителей (РСС).

Также к исследованию прилагается проект концепции государственной программы развития аддитивного строительного производства в Российской Федерации, которая разработана при участии компании «Смартбилдсервис», Ассоциации производителей строительных принтеров (АПСП) и Российского технологического фонда (АО РТФ). Это продуманный и обоснованный документ, который учитывает уникальный технологический задел, имеющийся в России, цели и задачи для формирования к 2030 году в нашей стране конкурентоспособной и технологически независимой национальной экспортно-ориентированной отрасли аддитивного строительного производства.

В данной статье приведены основные тезисы исследования и проекта для привлечения внимания широкой общественности к интересному и перспективному направлению, позволяющему решать значимые задачи в области строительства, и обсуждения возможных мер и механизмов развития отрасли.



*Электронная версия отчета
с указанием использованных
литературных источников*

Анализ глобального технологического ландшафта

Мировой технологический ландшафт аддитивного строительного производства (АСП) характеризуется стремительной динамикой, переходом от экспериментальной стадии к фазе ранней коммерциализации и формированием конкурирующих технологических платформ. Несмотря на относительную молодость отрасли, уже сложились отчетливые тренды, определяющие ее развитие. Ключевым технологическим подходом является метод послойной экструзии бетонной смеси.

Существуют и дополняют друг друга несколько технологических платформ, определяемых архитектурой оборудования. Ключевыми из них являются стационарные порталные (декартовы) системы, обеспечивающие стабильную точность при создании крупногабаритных объектов, решения на основе роботизированных манипуляторов, открывающие возможности для реализации сложных пространственных форм, мобильные принтеры на самоходном шасси, основное преимущество которых заключается в возможности быстрого развертывания и работы на масштабных или труднодоступных площадках. При этом растущим трендом становится также гибридизация разных подходов.

Центральным элементом технологической цепочки выступают специализированные строительные смеси, чья разработка перешла от кустарных экспериментов к индустриальному производству. Мировые и отечественные производители ведут активные исследования в области реологии, управляемого структурообразования и многофункциональности материалов в целях разработки специализированных составов смесей, оптимизированных под параметры экструзии, с заданными свойствами прокачиваемости, экструзируемости, способности к наращиванию и высокой межслоевой адгезии. Для многих стран важным трендом становится также снижение углеродного следа строительной отрасли за счет применения геополлимерных вяжущих, использования промышленных отходов и местных сырьевых компонентов в аддитивном строительном производстве. Потенциал демонстрируют и композитные материалы на основе полимерных матриц, хотя их распространение пока сдерживается высокой себестоимостью.

Технологическое развитие не ограничивается аппаратным и материаловедческим уровнем. Оно неразрывно связано с идеей цифровой трансформации всего жизненного цикла строительных объектов. Глубокая интеграция с BIM-средой в АСП становится обязательным условием эффективности. В проектировании объектов, предназначенных для строительства с применением технологии АСП, на первый план выходят методы генеративного дизайна и топологической оптимизации, которые позволяют создавать конструкции сложных бионических форм, обладающие высокой несущей способностью при минимальной материалоемкости. Слайсинг архитектурных моделей и генерация управляющих траекторий для строительного 3D-принтера также становится областью глубокой автоматизации, благодаря чему развивается концепция сквозного цифрового двойника стройки.

Анализ мирового рынка показывает, что он фрагментирован, но при этом демонстрирует быстрый рост за счет перехода от фазы пилотных демонстраций к этапу формирования устойчивых рыночных ниш и первых коммерческих экосистем. Согласно ряду прогнозов международных аналитических агентств, в ближайшее десятилетие ожидается увеличение объемов рынка на порядки: от умеренновысокого десятикратного роста к 2030 году по консервативным оценкам до взрывного роста от 300 раз к 2035 году согласно агрессивным сценариям, при среднегодовых темпах роста свыше 80% и вплоть до 166,7%.

Географическое развитие АСП характеризуется формированием региональных лидеров, чей прогресс определяется не столько рыночной стихией, сколько целенаправленной государственной политикой, превращающей технологию в фактор геоэкономической конкуренции. Ключевыми драйверами этого процесса выступают общие для глобальной мировой строительной отрасли вызовы: преодоление кадрового дефицита, сокращение сроков строительства и отходов, а также растущий спрос на уникальные архитектурные решения. В результате сформировались различные модели развития: в Северной Америке (США) доминирует венчурно-инвестиционная модель, ориентированная на коммерциализацию стартапов; Китай реализует государственно-инвестиционную модель, делая ставку на масштабирование в рамках национальных инфраструктурных мегапроектов; страны Европы и Ближнего Востока (в первую очередь ОАЭ и Саудовская Аравия) активно используют АСП как инструмент для создания архитектурных достопримечательностей и решения социальных задач, формируя собственные подходы.

Для России, стоящей перед вызовами освоения территорий и технологического суверенитета, прямое копирование какой-либо одной модели может быть неприменимо, однако мировой опыт предоставляет набор проверенных инструментов, которые могут быть синтезированы в уникальную гибридную стратегию, основой которой могут стать:

- гарантированный спрос через целевые программы освоения Арктики, Дальнего Востока и зон реновации (по аналогии с китайской логикой масштабных проектов);
- опережающее «гибкое» нормотворчество, создающее правовую песочницу для быстрого внедрения (принцип ОАЭ);
- целевое финансирование НИОКР по локализации критических компонентов и материалов в логике импортозамещения (европейский акцент на развитии компетенций);
- интеграция в стратегию технологического суверенитета с привлечением институтов развития по образцу американской прагматично-инвестиционной модели.

В условиях активной государственной поддержки АСП в странах-лидерах инерционное развитие и ставка исключительно на рыночные механизмы способны лишить Россию шансов на создание конкурентоспособной отрасли как на внутреннем, так и на глобальном рынке.

Позиционирование России в глобальной системе АСП

Несмотря на то, что внутренний рынок АСП в России находится в стадии пилотного развития, роль российских специалистов и выходцев из России в формировании глобальных технологических трендов оказалась неожиданно весомой. Это явление можно охарактеризовать как «экспорт мозгов» и технологических заделов, предшествовавший созданию полноценной отечественной отрасли.

Исторически первым, кто привлек мировое внимание масс-медиа к потенциалу полноразмерной строительной печати, стал инженер Андрей Руденко, основавший в США компанию Total Kustom. В 2014 году его проект по возведению бетонного замка в штате Миннесота на собственном стационарном принтере наглядно доказал осуществимость данного подхода, задав тренд на строительную 3D-печать сложных архитектурных форм. Некоторое время спустя ярославская компания «Спец-авиа» (ныне — АМТ) разработала одну из первых в мире промышленных порталных систем для аддитивного строительного производства. В 2017 году в подмосковном Ступино компания Aris Cor, основанная Никитой Чен-Юн-Таем, впервые в мире продемонстрировала технологию мобильной строительной 3D-печати, возведя офисное здание непосредственно на строительной площадке. Параллельно с присутствием российских специалистов в глобальных проектах внутри страны формируется собственная экосистема аддитивного строительного производства, представленная на сегодняшний день уже более чем двумя десятками активных компаний. Возраст присутствия многих участников рынка по состоянию на 2025 год превышает 5 лет, что свидетельствует о накопленных компетенциях.

Проведенный НИИ СМиТ НИУ МГСУ анализ сметной стоимости более двух десятков реализованных в России пилотных объектов выявил значительный разброс удельных затрат, который по данным, полученным непосредственно от застройщиков, составляет от 38 до 180 тыс. руб. за м². Наименьшую стоимость демонстрируют функциональные объекты для собственных нужд компаний (цеха, учебные центры) и типовые дома в комплектации «теплый контур» от девелоперов на юге страны (заявляемая стоимость около 65 тыс. руб./м²). Высокая стоимость характерна для уникальных архитектурных объектов с большой высотой стен и сложными фасадами. Этот разрыв указывает на ключевую текущую дилемму отрасли: выбор между экономически эффективной массовой типизацией и дорогостоящей, но имиджевой сложной архитектурой. С учетом выявленных статистических закономерностей и текущих рыночных тенденций экспертной оценкой определен объективный ценовой диапазон возведения объектов массового спроса в коммерческом секторе с применением технологии аддитивного строительного производства в России в 2025 году в пределах 65 000–125 000 рублей за квадратный метр (для предчистовой отделки типа White Box) со средневзвешенной стоимостью около 95 000 рублей.

Сформировавшаяся к 2025 году структура спроса на технологию АСП в России носит фрагментированный нишевый характер, в рамках которого большинство реализованных или планируемых к реализации проектов можно отнести к одной из двух основных категорий, определяющих текущий рынок сбыта. Первая категория — это объекты массового спроса в сегменте ИЖС, где технология применяется для возведения одно- и двухэтажных домов с относительно простой геометрией. Спрос в этой категории формируется небольшими частными застройщиками и технологическими компаниями. Однако, как показывает анализ стоимости, экономическая целесообразность здесь возможна лишь при масштабировании и на данном этапе в большинстве случаев не выдерживает прямой конкуренции с традиционными каркасными или блочными технологиями при строительстве единичных объектов. Вторая категория формирует спрос на уникальные архитектурные и имиджевые решения. Здесь сосредоточена значительная доля наиболее широко освещаемых в медийном поле проектов: от футуристических домов в экопарке «Ясно Поле» до культурного центра «Мелля». Потребителями в этом сегменте могут выступать обеспеченные заказчики, ориентированные на высокотехнологичные и статусные решения, для которых стоимость не является определяющим фактором; коммерческие девелоперы, создающие арт-объекты для повышения привлекательности территорий, а также крупнейшие региональные игроки и корпорации, заинтересованные в создании знаковых достопримечательностей. Отдельным, но пока единичным вектором спроса является строительство утилитарных объектов для собственных нужд технологических компаний — шоурумов, учебных центров, производственных цехов, напечатанных с целью демонстрации и отработки процессов. Государственный спрос, несмотря на декларируемый интерес, пока не сформирован в виде системного заказа или включения в федеральные целевые программы.

Одним из стратегически важных элементов экосистемы аддитивного строительного производства является рынок специализированных строительных материалов для АСП, который в России начал формироваться в период с 2017–2018 годов, синхронно с появлением первых пилотных объектов, напечатанных при помощи строительных 3D-принтеров. Проводимый НИИ СМиТ НИУ МГСУ с 2024 года мониторинг показывает, что из почти 300 производителей сухих строительных смесей в России лишь менее 4% имеют опыт производства составов, адаптированных под требования АСП, из которых всего 6 компаний наладили промышленный выпуск таких материалов. При этом до 10% от общего числа производителей выражают уверенную готовность выпускать соответствующие материалы по рецептуре заказчика при получении соответствующего запроса, что указывает на потенциал расширения предложения в ближайшем будущем. Общая динамика рынка демонстрирует резкий рост: за последние 5 лет совокупные объемы рынка материалов для аддитивного строительного производства в России увеличились на 744% (рис. 1), что свидетельствует о растущем спросе и активизации отрасли.

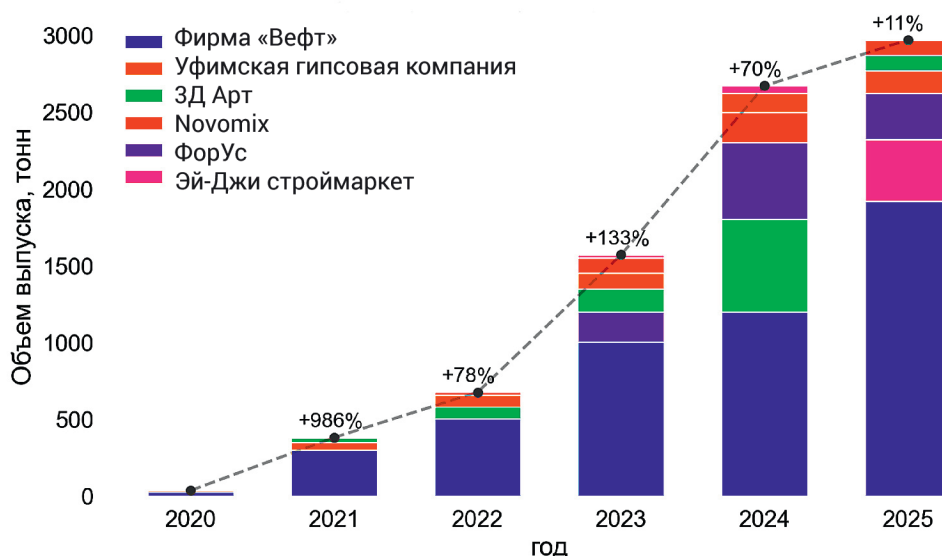


Рис. 1. Динамика изменения объемов выпуска материалов для АСП в России

Учитывая пока ограниченную емкость рынка, ключевым запросом со стороны строительных компаний остается возможность заказа малых и средних партий материалов по индивидуальным рецептам. Ряд производителей предлагают изготовление опытных партий с минимальным заказом от 0 до 10 тонн, что позволяет гибко тестировать составы под конкретные проекты и оборудование.

SWOT-анализ для России

Проведенный анализ текущего состояния позволяет систематизировать внутренние и внешние факторы, определяющие стратегические перспективы развития аддитивного строительства в России в виде классического SWOT-анализа.

Сильные стороны (Strengths). Объективная потребность России в быстром, дешевом и мало зависимом от логистики рабочей силы строительстве в удаленных и труднодоступных регионах создает для АСП естественный, стратегически важный рынок сбыта. Вторым ключевым преимуществом выступает глубокая научно-техническая база в смежных областях. Россия обладает значительными компетенциями в фундаментальном материаловедении, разработке специализированного программного обеспечения и робототехнических систем, что может стать основой для создания не просто принтеров, а интеллектуальных строительных комплексов. Третьей силой является доступность и разнообразие местного сырья для производства строительных смесей, включая возможность использования техногенных отходов, что снижает зависимость от импорта и позволяет создавать конкурентоспособные по стоимости материалы.

Слабые стороны (Weaknesses). Основная внутренняя слабость — критическая фрагментарность всей экосистемы. Усилия разрознены между отдельными стартапами, вузами и производителями материалов, отсутствуют устойчивые горизонтальные связи и эффективные механизмы кооперации науки и бизнеса. Этот разрыв усугубляется недостаточной развитостью нормативно-

технической базы, что переводит каждый пилотный проект в плоскость высоких юридических и административных рисков. Неразвитость рынка специализированных материалов, несмотря на наличие технологических возможностей, ведет к их высокой стоимости в малых партиях, а также к зависимости от единичных поставщиков. Наконец, сохраняется дефицит прикладных инженерных кадров, способных работать на стыке строительства, робототехники и цифрового проектирования.

Возможности (Opportunities). Наиболее значимой внешней возможностью является интеграция технологии в масштабные государственные программы комплексного освоения территорий (для развития Арктической зоны, Дальнего Востока и новых субъектов РФ), обеспечивающая создание социальной и жилой инфраструктуры с недостижимой ранее скоростью и адаптивностью. Второй крупной возможностью выступает задача импортозамещения в сфере высокотехнологичного строительного оборудования и цифровых решений, поддерживаемая соответствующей государственной политикой. Успешное развитие отечественной экосистемы открывает третью возможность — экспорт не сырья, а готовых технологических решений (оборудование, ПО, стандарты) в страны ЕАЭС, СНГ и другие государства со схожими климатическими и инфраструктурными вызовами.

4.4 Угрозы (Threats). Ключевой угрозой является риск стремительного и необратимого технологического отставания от глобальных лидеров (США, Китай, ЕС). В случае сохранения инерционного сценария уже через 5–7 лет Россия может столкнуться с необходимостью импорта не только оборудования, но и целых технологических цепочек, упустив возможность занять лидирующие позиции на формирующемся рынке. Этот риск усугубляется системными институционально-рыночными ограничениями, среди которых — отсутствие гарантированного спроса, а также консерватизм строительной отрасли, ее ориентация на краткосрочную рентабельность традиционных методов и сопротивление внедрению инноваций. Отдельную проблему представляет неподготовленность

ключевых заказчиков (государственных и окологосударственных структур).

Препятствием для распространения АСП также пока остаются актуальные для всего глобального рынка технологические и нормативные барьеры, к которым относятся неразвитость нормативно-технической базы и отсутствие единых стандартов аддитивного строительного производства, недостаточная изученность вопросов обеспечения долговечности, сейсмо- и огнестойкости конструкций, а также потребность в развитии эффективных методов автономного армирования. Дополнительным сдерживающим фактором выступает кадровый дефицит.

Важным итогом анализа является вывод о том, что потенциал для технологического рывка России в сфере аддитивного строительства существует, но его реализация невозможна без активной консолидирующей роли государства, способной превратить слабости в решаемые задачи, а угрозы — в управляемые риски.

Форсайт-сценарии развития аддитивного строительного производства в России до 2036 года

Детализация сценариев позволяет структурировать спектр возможных будущих состояний отрасли аддитивного строительства, исходя из взаимодействия ключевых факторов неопределенности.

Сценарий 1: «Экосистемный прорыв» (оптимистичный)

К 2036 году аддитивное строительное производство перестает быть экзотической технологией и занимает устойчивую долю в 10–15% рынка малоэтажного и социального строительства в России, став признанным инструментом в арсенале девелоперов и застройщиков. В результате Россия не только решает внутренние задачи, но и позиционируется как региональный технологический лидер. Отработанные и сертифицированные комплексные решения (оборудование, материалы, нормативы, образовательные программы) становятся предметом экспорта в страны ЕАЭС, СНГ, БРИКС и другие дружественные государства, заинтересованные в быстром развитии собственной строительной отрасли. К 2036 году российские компании становятся заметными игроками на формирующемся глобальном рынке строительной робототехники и цифровых строительных технологий.

Сценарий 2: «Нишевая оптимизация» (инерционный)

Развитие аддитивного строительства в России к 2036 году не приводит к революционной трансформации отрасли, а следует по пути органичной, но ограниченной адаптации. Технология находит свои устойчивые рыночные ниши, где ее уникальные свойства дают неоспоримое конкурентное преимущество перед традиционными методами, однако массового прорыва на широкий рынок типового жилья и коммерческой недвижимости не происходит.

Рынок остается разрозненным. Отечественные производители оборудования не столько развиваются, сколько выживают, обслуживая узкие сегменты, что не позволя-

ет большинству из них выйти на уровень масштабного серийного производства.

Экспортные перспективы ограничены поставками единичных комплексов или выполнением заказов на сложные архитектурные элементы. Технология воспринимается профессиональным сообществом как полезный, но специализированный инструмент, а не как драйвер системных изменений в строительной отрасли. Доля АСП в общем объеме строительства в России к 2036 году не превышает 1%, оставаясь маркером инновационности для избранных проектов, но не меняя общую картину строительного комплекса.

Сценарий 3: «Стагнация под давлением» (пессимистичный)

Аддитивное строительное производство в России к 2036 году фактически не выходит за рамки фазы экспериментальных демонстраций, оставаясь технологией с нереализованным потенциалом и маргинальным статусом, которая воспринимается как интересная, но непрактичная диковинка, технология «на будущее», которое так и не наступило. Данный сценарий представляет собой реализацию рисков упущенного окна возможностей и закрепление в долгосрочной перспективе технологической зависимости России в области высокопроизводительного роботизированного строительного производства.

Сценарий 4: «Растворение в гибридах» (адаптивный)

К 2036 году аддитивное строительство не выделяется в самостоятельную, революционную отрасль, а растворяется в виде значимого модуля в составе более широких, гибридных автоматизированных строительных систем. Исчезновение технологической аутентичности становится не поражением, а признаком ее успешной адаптации и интеграции. «Чистая» 3D-печать конструкций уступает место комбинированным технологическим цепочкам, где аддитивные процессы выполняют строго определенные, оптимизированные операции в тандеме с другими роботизированными методами.

Анализ мировой динамики, охватывающей не только развитие технологии АСП, но и общие тренды развития робототехники, искусственного интеллекта и других сквозных технологий Индустрии 4.0, указывает на то, что к 2036 году это наиболее вероятный сценарий для глобального рынка.

Позиция России в этой системе будет обусловлена результатом ее собственных действий. Сценарий «Экосистемный прорыв» соответствует роли разработчика и экспортера собственных технологических платформ, и его реализация позволит России не просто интегрироваться в глобальную гибридную модель, но стать одним из ее архитекторов. Сценарий «Нишевая оптимизация» соответствует роли локального интегратора преимущественно иностранных технологий. Сценарий «Стагнация под давлением» соответствует роли догоняющего импортера полностью готовых решений и технологической периферии, что приведет к полной утрате существующего научно-технического задела.

СТРОИТЕЛЬНЫЙ ПРИНТЕР
5400.25.25
AMT
Сделано в России

НОВИНКА!
САМЫЙ БОЛЬШОЙ
СТРОИТЕЛЬНЫЙ 3Д-ПРИНТЕР

за одну установку
более **2500**
квадратных метров!



Выявление окон возможностей и критических точек развития

Главное окно возможностей для России открыто до 2028–2030 годов. Этот период характеризуется относительной незанятостью технологических ниш на глобальном рынке, наличием собственного научного задела и уникальным сочетанием внутренних вызовов (освоение территорий, дефицит кадров), которые технология может решить.

Критическими точками, от которых зависит прохождение траектории, являются:

— Точка формирования спроса (2026–2028 гг.): формирование нормативно-правового поля и запуск первой волны масштабных пилотных проектов (сотни объектов) в рамках госзаказа, доказывающих экономическую и технологическую состоятельность технологии.

— Точка экономической окупаемости (2028–2030 гг.): достижение эффекта масштаба, при котором стоимость строительства с применением АСП становится конкурентоспособной с традиционными методами на типовых проектах, что обеспечивает привлечение массового частного застройщика.

Преодоление этих точек требует не разрозненных мер, а скоординированной программы, фокусирующей ресурсы на создании не отдельных продуктов, а целостной институциональной и рыночной среды.

Рекомендации в отношении формирования государственной политики

Для реализации сценария «Экосистемный прорыв» предлагается структурировать программу в виде двух последовательных фаз:

Фаза 1: технологическое развитие и масштабирование отрасли (2026–2030 годы).

На подготовительном этапе реализации фазы обеспечивается создание фундаментальных предпосылок для легализации и тиражирования технологии через преодоление ключевых институциональных барьеров и формирование первичного устойчивого спроса. Первоочередным шагом становится создание межведомственного координационного совета по развитию АСП с участием ведущих научных центров и профильных ассоциаций для детализации проработки отдельных мероприятий программы развития.

Основным содержанием этапа становится формирование сквозных цепочек создания стоимости, что достигается через создание сети ключевой инфраструктуры — региональных центров роботизации строительства (РЦРС), выполняющих роль производственно-сервисных хабов. Каждый такой центр, создаваемый на принципах государственно-частного партнерства, объединяет в себе несколько функций: сервисное обслуживание и лизинг оборудования, производство строительных смесей по локализованным рецептурам, контрактную печать элементов для местных застройщиков и, что критически важно, подготовку кадров через учебные полигоны.

Образовательная интеграция переходит от создания

отдельных программ к их широкому внедрению в систему профессиональных стандартов. Профильные компетенции по аддитивному строительному производству встраиваются в актуализированные ФГОС. Параллельно запускается программа создания федеральной сети пилотных зон застройки, в рамках которой в нескольких климатически и экономически разных регионах возводятся не единичные объекты, а целые кварталы открытой для посещения жилой, социальной, туристической и иной застройки с полным инженерным оснащением и благоустройством. Они становятся площадкой для финальных испытаний и стандартизации новых технологических решений в реальных условиях, наглядной демонстрацией возможностей технологии для населения и потенциальных инвесторов, а также живой лабораторией для долгосрочного мониторинга эксплуатационных характеристик напечатанных зданий. К концу этапа доля АСП в сегменте малоэтажного социального и индивидуального жилищного строительства в пилотных регионах должна достичь 1–2%, а сама технология перестать восприниматься как экспериментальная, войдя в число стандартных опций для девелоперов.

Фаза 2: лидерство и глобальная интеграция (2030–2036 годы)

К 2036 году аддитивное строительное производство окончательно формируется как полноценная, самодостаточная отрасль с высокой степенью автоматизации и цифровизации всех этапов производственного процесса. Ее применение приобретает системный характер в рамках федеральных и региональных программ комплексного развития территорий. Технология интегрируется с системами «умного» города, где напечатанные конструкции изначально проектируются с закладными элементами для датчиков, автоматизированных инженерных сетей и энергоэффективных решений.

Экономика отрасли достигает зрелости. Стоимость строительства с применением АСП на типовых проектах становится на 15–25% ниже, чем у традиционных технологий сопоставимого качества, за счет эффекта масштаба, полной автоматизации процессов цепочек поставок и развитого рынка конкурентоспособных отечественных материалов и комплектующих. Появляются публичные компании — технологические лидеры отрасли, чья капитализация основана на инновационном потенциале и интеллектуальной собственности.

На глобальном уровне Россия входит в топ-5 технологических держав в сфере строительной роботизации и цифрового производства в строительстве. Экспортная стратегия переходит от поставок единичного оборудования к экспорту комплексных технологических решений под ключ: проектирование, поставка адаптированного оборудования, обучение персонала и сопровождение строительства объектов в странах ЕАЭС, СНГ, БРИКС, Азии и Африки. Ключевым показателем успеха на этом этапе является возникновение устойчивого спроса на российские технологии и экспертизу со стороны международных партнеров, что подтверждает достижение не только количественных, но и качественных целей технологического лидерства.

Проект концепции государственной программы развития аддитивного строительного производства в Российской Федерации, предложенный для обсуждения, включает следующие тезисы

Введение

✓ Аддитивное строительное производство представляет собой не просто новую технологию, но системный инструмент трансформации отрасли, который кардинально меняет парадигму традиционного строительства, перенося ключевые процессы в цифровую среду и на автоматизированные производственные площадки.

✓ На сегодня в России сформирован исключительный научно-технологический задел, что создает уникальные экономические предпосылки для старта целенаправленной государственной программы, без реализации которой существует опасность упустить окно возможностей.

✓ Целью настоящей программы является формирование к 2030 году в РФ конкурентоспособной и технологически независимой национальной экспортноориентированной отрасли АСП, что предполагает создание заверщенного промышленного цикла, комплексной нормативной базы, системы подготовки кадров и устойчивого рыночного спроса.

✓ Тактическим ядром и ключевым практическим результатом программы является строительство первого миллиона квадратных метров жилья, объектов социальной, туристической и иной инфраструктуры с использованием 3D-печати и вовлечением в процесс аддитивного строительного производства участников СВО, получивших практические навыки и умения управления сложными роботизированными комплексами и БПЛА. «Первый миллион» составляет менее 0,1% от совокупной цели по вводу более 1 млрд кв. м жилья к 2030 году, поэтому не несет макроэкономических рисков, но обеспечивает накопление необходимой критической массы для формирования и быстрого масштабирования новой отрасли. Успешная реализация этой задачи заложит основу для экспансии технологии, целевым ориентиром которой является освоение 5–10% рынка нового жилья к 2036 году и утверждение России в качестве одного из глобальных лидеров в области высокотехнологичного строительства объектов промышленного и гражданского назначения.

Связь программы с государственной политикой РФ

✓ Программа способствует достижению целей, установленных указом президента РФ «О национальных целях развития РФ на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» в части обеспечения граждан жильем общей площадью не менее 33 кв. метров на человека к 2030 году и не менее 38 кв. метров к 2036 году. Масштаб данной задачи подтверждается Стратегией развития строительной отрасли и ЖКХ до 2030 года, прямо нацеленной на ввод более 1 млрд кв. м жилья в 2021–2030 годах и рост доступности приобретения, строительства или аренды жилья не менее чем для 67% граждан.

✓ Аддитивное строительное производство создает потенциал технологического прорыва, позволяющего преодолеть системные ограничения традиционных методов за счет сокращения сроков возведения зданий, снижения материалоемкости и количества отходов, и обеспечивает возможность для массового, тиражируемого строительства индивидуального жилья (ИЖС), в том числе в труднодоступных и дефицитных по кадрам регионах, что обеспечивает соответствие программы приоритетам национального проекта «Инфраструктура для жизни». Помимо этого программа является практическим воплощением приоритетов Стратегии научно-технологического развития РФ, так как технология аддитивного строительного производства носит сквозной характер и обеспечивает эффективную комбинацию роботизированной техники, цифрового проектирования (BIM), новых материалов и систем управления качеством.

✓ Особую актуальность программа приобретает в свете Стратегии развития аддитивных технологий в РФ на период до 2030 года (утв. распоряжением правительства РФ от 14.07.2021 N 1913-р). Потенциальная емкость рынка аддитивных технологий в строительстве способна превысить совокупный объем применения аддитивных технологий во всех других отраслях.

✓ Реализация программы в России способствует достижению конкретных целевых ориентиров, закрепленных в Стратегии развития строительной отрасли и ЖКХ до 2030 года (утв. распоряжением правительства от 31 октября 2022 года N 3268-р), так как она предусматривает сокращение инвестиционно-строительного цикла, цифровизацию и повышение прозрачности процедур в строительстве, расширение использования новых технологий, повышение производительности труда и конкурентоспособности отрасли.

✓ Развитие аддитивного строительного производства, внося непосредственный вклад в решение одной из ключевых общенациональных задач, заключающейся в преодолении сохраняющегося отставания в уровне роботизации отечественной промышленности и кардинальном повышении ее технологического уровня, отвечает стратегическому приоритету, обозначенному на высшем государственном уровне и требующему скорейшей практической реализации.

Механизмы реализации программы

✓ Программа выступает в качестве адаптивного периода (до 2030 года).

✓ Управление программой предусматривает создание межведомственного органа (федерального координационного совета) с участием представителей ключевых ФОИВ. В рабочую группу федерального координационного совета приглашаются представители ведущих научных организаций, профильных ассоциаций и активных участников рынка.

✓ Для практической отработки технологии и демонстрации ее потенциала будет создано не менее десяти пилотных зон застройки в различных регионах страны, отобранных на основе активности местных властей, наличия научной базы и промышленных партнеров. Данные

зоны, расположенные от Арктики до южных регионов и включающие территории с особыми условиями (экстремальный холод, сейсмическая активность, влажный климат), станут полигонами для строительства демонстрационных объектов различного назначения — от индивидуального жилья до социальных, туристических и прочих инфраструктурных объектов, что обеспечит сбор уникального опыта для дальнейшего масштабирования. Среди предлагаемых пилотных регионов: Москва и Московская область (центральная демонстрационная зона пилотного проектирования), Санкт-Петербург и Ленинградская область, Томская область, Тюменская область, Красноярский край, Алтайский край и Республика Алтай, Мурманская область, Республика Саха (Якутия), Краснодарский край, Республика Татарстан, Челябинская область, Пермский край, Дальневосточный регион и Сахалинская область, новые регионы РФ.

✓ Важным инфраструктурным механизмом программы является формирование федеральной сети региональных центров роботизации строительства (РЦРС). Их создание позволит преодолеть системные ограничения, связанные с высокой капиталоемкостью первоначальных инвестиций для отдельных компаний, острым дефицитом квалифицированных кадров, способных работать с роботизированными комплексами, а также с отсутствием в регионах специализированной сервисной и логистической поддержки данной технологии.

✓ Базовым условием для легализации и тиражирования технологии является создание исчерпывающей нормативной и законодательной базы на всех уровнях управления. На федеральном уровне работа, основанная на предложениях ФАУ «ФЦС» и ведущих научных организаций, включая НИУ МГСУ, КГАСУ, ТГАСУ, ВГТУ, СПбГПУ и др., будет сосредоточена на разработке пакета основополагающих документов, включающего национальные и межгосударственные государственные стандарты (ГОСТ Р, ГОСТ, нормативные документы стран ЕАЭС и БРИКС) на оборудование и материалы для АСП, а также свод правил (СП) Минстроя России на проектирование и строительство с применением данной технологии, что должно быть дополнено внесением необходимых поправок в существующие нормативные документы для полной интеграции 3D-печатных конструкций в действующее правовое поле при получении разрешительной документации.

✓ Ключевым элементом решения задачи станет проведение НИОКР, интегрированных с программой экспериментального строительства. Приоритетными направлениями исследований станут: изучение эффективности различных способов утепления ограждающих конструкций в разных климатических зонах; экспериментальный анализ несущей способности и долговечности 3D-печатных конструкций, включая их огнестойкость и сейсмостойкость, что позволит создать исчерпывающую научную основу для безопасного и экономически эффективного применения технологии.

✓ Параллельно должна быть инициирована работа на уровне субъектов РФ, стран ЕАЭС и БРИКС по формированию законодательных мер поддержки, что пред-

полагает разработку и принятие типовых регламентов и гармонизированных нормативных документов, создание льготных режимов налогообложения для девелоперов, реализующих проекты с применением технологии АСП, а также формирование механизмов ускоренной выдачи разрешений на строительство в рамках экспериментального правового режима, создания локальных фондов поддержки таких проектов на принципах государственно-частного партнерства.

✓ Для обеспечения научной обоснованности и контроля качества технологии в разных регионах страны в рамках реализации программы будет развернута и оснащена сеть специализированных научно-исследовательских и испытательных центров, создаваемых в том числе на базе ведущих профильных вузов в ключевых климатических зонах и пилотных регионах. Данная сеть будет включать координирующий центральный узел на базе Центра исследований аддитивных технологий (3D-печати) в новом кампусе НИУ МГСУ (г. Москва) и региональные центры в разных субъектах РФ, каждый из которых будет специализироваться на исследованиях в специфических условиях (высокая влажность, вечная мерзлота, континентальный климат и т.д.). Функционал центров охватит полный цикл от разработки и испытаний материалов до сертификации, экспертизы проектной документации и полевого контроля качества, формируя единую систему научно-технического сопровождения.

✓ Одновременно будет запущена комплексная программа кадрового и информационного обеспечения, нацеленная на подготовку первых высококвалифицированных специалистов через создание специализированных образовательных программ в вузах и ссузах, а также курсов переподготовки участников СВО, получивших практические навыки и умения управления сложными роботизированными комплексами и БПЛА.

✓ Ключевой практической задачей, обеспечивающей переход от экспериментального к промышленному этапу развития технологии, является трансформация имеющегося запроса на роботизацию в устойчивый спрос на аддитивные строительные технологии. В рамках реализации программы будут выстроены эффективные механизмы государственного заказа через целевые программы и механизмы государственно-частного партнерства, которые обеспечат необходимый объем работ для отработки технологических регламентов, логистики и экономики масштаба.

✓ Конкретным механизмом обеспечения данного объема станет интеграция аддитивного строительства в существующие и вновь формируемые государственные программы строительства социальной и жилищной инфраструктуры. В частности, планируется закрепить квоты на возведение объектов в рамках национальных проектов «Жилье и городская среда», «Демография», «Образование» и «Здравоохранение». Важнейшим источником заказа может стать обеспечение служебным и подведомственным жильем отдельных категорий государственных служащих, военнослужащих и работников бюджетной сферы в труднодоступных и стратегически важных регионах, таких как Арктическая зона,

ТРЕТЬЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ»



Москва
НИУ МГСУ

2-4 июня
2026 года

- Тенденции развития рынка
- Оборудование
- Цеховое производство
- Печать в полевых условиях
- Стандартизация
- Материалы
- Особенности проектирования
- Перспективные исследования и разработки

Посещение строящихся
и уже готовых объектов
в Московской области

Организаторы:



КВИНТЕТ
EVENT АГЕНТСТВО

При поддержке:



Дальний Восток и приграничные территории. Строительство поселков или микрорайонов позволит реализовать серийные проекты, что важно для снижения удельной стоимости и формирования комплексных строительно-логистических кластеров непосредственно в регионах присутствия.

✓ Для формирования массового общественного запроса и снятия социально-психологических барьеров требуется проведение масштабной информационной и просветительской кампании, выходящей за рамки профессионального сообщества. Необходима организация постоянно действующих демонстрационных площадок и «умных» микрорайонов в крупных городах. Помимо этого ключевым направлением должно стать активное вовлечение в коммуникацию профессиональных сообществ — архитекторов, дизайнеров, экологов и т.д. через проведение всероссийских конкурсов на лучшие проекты 3D-печатного жилья и общественных пространств, результаты которых будут получать приоритет при реализации в пилотных регионах.

✓ Перспектива развития отрасли на период до 2036 года будет включать переход от пилотных проектов к серийному типовому строительству; фокус на экономике за счет снижения себестоимости; развитие лизинга оборудования для МСП; интеграцию с другими высокотехнологичными секторами («умный» город, энергоэффективные материалы); развитие экспорта технологий как формы технологического влияния.

Ключевые показатели эффективности программы (KPI)

✓ На период до 2030 года:

- Разработка и утверждение не менее 5 национальных стандартов в области аддитивного строительного производства.
- Разработка и утверждение свода правил (СП) на проектирование объектов, возводимых с применением технологии аддитивного строительного производства.
- Создание и ввод в эксплуатацию не менее 8 Региональных центров роботизации строительства (РЦРС) в различных федеральных округах.
- Создание и аккредитация не менее 4 региональных научно-исследовательских и испытательных центров на базе ведущих вузов.
- Проведение не менее 20 НИОКР по приоритетным направлениям, обеспечивающим технологическое лидерство в развитии применения аддитивного строительного производства и формирование эффективной нормативно-технической базы в данной области.
- Создание не менее 10 пилотных зон застройки в различных федеральных округах и климатических зонах РФ.
- Реализация не менее 50 типовых пилотных проектов различных классов (ИЖС, МКД, социальные объекты) в пилотных зонах.
- Запуск не менее 5 специализированных образовательных программ высшего и среднего профессионального образования по АСП.
- Прием на обучение не менее 500 абитуриентов для подготовки квалифицированных специалистов для отрас-

ли аддитивного строительного производства (инженеры-конструкторы, технологи, операторы, мастера).

• Совокупный ввод в эксплуатацию не менее 1 млн квадратных метров жилых и социальных объектов, построенных с использованием технологии аддитивного строительного производства.

• Обеспечение доли отечественных технологий, материалов и оборудования в реализованных в рамках программы проектах до 100%.

• Создание и поддержание публичного реестра (карты) объектов АСП, включающего 100% построенных в рамках программы объектов.

• Проведение не менее 3 всероссийских конкурсов проектов в области АСП с последующей реализацией проектов-победителей.

✓ **Стратегические ориентиры развития отрасли (на период до 2036 года)** — эти показатели носят прогнозный характер и должны быть детализированы в последующих программах:

• Доведение ежегодного объема ввода объектов с использованием АСП до не менее 6 млн кв. м в год.

• Достижение экономической эффективности: снижение стоимости строительства на 15–20% по сравнению со средней стоимостью традиционных технологий (на примере типовых объектов ИЖС).

• Формирование устойчивого экспортного потенциала: выход на рынки дружественных стран с комплексными решениями (оборудование и технологии).

• Доведение доли жилья, построенного с использованием элементов аддитивного строительного производства, в общем объеме ИЖС и малоэтажного строительства до 10%.

Экономическое обеспечение реализации программы

Общий объем финансовых ресурсов, необходимых для реализации программы в период до 2030 года, складывается из двух основных компонентов:

— Капитальные и операционные затраты на создание инфраструктуры и обеспечение деятельности: НИОКР, нормативно-техническое регулирование, создание и оснащение сети РЦРС, научно-исследовательских и испытательных центров, подготовка кадров, информационное сопровождение.

— Прямые инвестиции в строительство объектов «миллиона квадратных метров». В целях обеспечения экономической устойчивости зарождающейся отрасли и создания условий для реинвестирования прибыли в развитие технологий на первом этапе (до 2030 г.) применяется принцип стабильного индексируемого ценообразования. Средняя расчетная стоимость возведения объектов с применением АСП (включая общестроительные и инженерные сети без финишной чистовой отделки) принимается на уровне не менее 95 000 рублей за квадратный метр в ценах 2025 года с ежегодной индексацией на прогнозируемый уровень инфляции. Данный подход позволяет предприятиям-интеграторам и производителям оборудования сформировать устойчивую финансовую модель, покрыть высокие первоначальные

издержки освоения технологии и направить средства на разработку технологии и расширение производства. Задача снижения удельной стоимости по сравнению с традиционными методами ставится в качестве ключевого ориентира на последующем этапе коммерческого масштабирования технологии после 2030 года.

Основной источник финансирования инфраструктурной и обеспечивающей части программы: федеральный бюджет в рамках отдельных мероприятий национальных проектов, государственных программ и государственного задания Минстроя России. Основные источники финансирования строительства объектов демонстрационного «Миллиона квадратных метров»: региональные бюджеты (через адресные инвестиционные программы, программы расселения аварийного жилья, строительства социальных объектов); внебюджетные источники (средства частных девелоперов, привлеченные через механизмы льготного проект-финансирования, отраслевых институтов развития, а также средства компаний — участников программы: интеграторов, производителей оборудования). Федеральный бюджет (адресные субсидии и ГЧП): прямое субсидирование части процентной ставки по кредитам на проекты с использованием технологии аддитивного строительного производства, взнос в уставной капитал или предоставление гарантий для проектов ГЧП в стратегических регионах.

Для активизации внебюджетного финансирования планируется использование следующих инструментов:

— Специальные инвестиционные контракты для производителей отечественного оборудования и материалов для АСП.

— Льготные кредитные линии от институтов развития для девелоперов, реализующих проекты с долей аддитивного строительного производства в сметной стоимости проекта не менее 30%.

— Региональные налоговые льготы (освобождение от налога на имущество и землю на 3–5 лет для РЦРС и производств, связанных с аддитивным строительным производством).

— Технологическая и ценовая преференция в рамках государственных и муниципальных закупок на строительство для решений, использующих отечественные технологии АСП.

Финансовая модель программы обеспечивает распределение рисков и ответственности между государством и бизнесом, делает программу инвестиционно привлекательной и создает условия для формирования самоподдерживаемой отрасли аддитивного строительного производства.

Примечание: настоящий материал представляет собой аналитическую разработку (концептуальный проект), цель которой — предложить общие параметры для профессионального обсуждения возможных мер и механизмов государственной поддержки развития отрасли аддитивного строительного производства в России. Разработка полноценного проекта государственной программы с учетом разработанной концепции требует детального экономического и правового обоснования в установленном законодательством порядке и относится к компетенции уполномоченных ФОИВ. ■



Крупнейший в мире резервуар

Российская компания «3D Технолджи» осуществила технологический прорыв, построив резервуар методом 3D-печати из бетона. Это самое большое сооружение такого типа в мире на сегодняшний день. Объект возведён по заказу ПАО «Татнефть». Проектирование резервуара с нуля выполнило собственное конструкторское бюро «3D Технолджи».

Ключевой особенностью проекта стала беспрецедентная скорость строительства. Огромный бетонный цилиндр диаметром 12 метров и высотой 4 метра был возведен всего за 10 дней. Такой результат стал возможен благодаря применению уникальной технологии: вместо традиционной опалубки использовалась опалубка, изготовленная на 3D-принтере из специального высокопрочного бетона. Это решение позволило радикально сократить сроки и трудозатраты.

Сложность проекта заключалась в удалённости площадки от крупных населённых пунктов, что обычно влечёт за собой значительные логистические издержки и усложняет доставку материалов и рабочей силы. Однако технология 3D-печати, требующая минимального количества готовых элементов и персонала на месте, позволила успешно ее преодолеть.

Для «3D Технолджи» этот проект стал очередным рекордом, закрепляющим лидерство компании на рынке.

Аддитивное строительное производство: архитектурный потенциал от малых форм до уникальных зданий



Алексей Адамцевич, директор Научно-исследовательского института строительных материалов и технологий (НИИ СМиТ) НИУ МГСУ

Статья посвящена анализу возможностей аддитивного строительного производства (3D-печати бетоном) в контексте создания архитектурно выразительных объектов. Рассматриваются два основных варианта применения технологии: цеховая печать, позволяющая изготавливать элементы в контролируемых заводских условиях, и печать непосредственно на строительной площадке. Для каждого из вариантов описываются характерные архитектурные задачи: малые архитектурные формы и арт-объекты, префаб-элементы для укрупнительной сборки, а также здания и сооружения, возводимые непосредственно в полевых условиях. Особое внимание уделяется тому, как технологические особенности аддитивного строительного производства становятся источником новых выразительных приемов в архитектуре. Отмечается, что технические различия между цеховой и полевой печатью (точность, качество поверхности, устойчивость к внешним воздействиям) носят скорее количественный характер и постепенно нивелируются по мере развития технологии, оборудования и материалов. Объясняются перспективы использования аддитивного строительного производства для обеспечения архитектурной выразительности и перехода к архитектурно разнообразной среде как нормативной характеристике массового строительства из бетона, являющегося самым доступным и распространенным конструкционным материалом в мире.

Введение

За последнее столетие в глобальной строительной отрасли и урбанистике сформировался устойчивый разрыв между общественным запросом на архитектурную выразительность городской среды и реальной практикой строительства, где доминируют типовые, функционально однородные объекты [1]. Ключевая причина этого разрыва связана не столько с отсутствием спроса на уникальность, сколько с технологическими особенностями применения традиционных методов строительства, для которых любое увеличение сложности ведет к непропорционально высокому увеличению стоимости.

На сегодняшний день архитектурная выразительность может быть достигнута разными способами, имеющими свои ограничения. Металл и композиты позволяют создавать пространственно сложные формы, однако высокая стоимость материалов, трудоемкость изготовления и необходимость специальных решений (например, для обеспечения огнестойкости) ограничивает сферу их применения. Кирпич и камень славятся своей долговечностью, но отход от использования строгой геометрии

при использовании штучных элементов способен превратить строительство в непредсказуемо дорогую работу скульптора, а не каменщика. Дерево отлично подходит для станков с ЧПУ и сложной фрезеровки, но также не является материалом универсального применения. С использованием всех перечисленных материалов, безусловно, возможно создавать выдающиеся архитектурные объекты, но реализация уникальных форм с помощью каждого из них остается либо дорогой, либо нишевой и ограниченной по масштабу применения.

Если же говорить о массовом и доступном конструкционном материале, который формирует материальную основу современной строительной отрасли, то им остается бетон. Ежегодное мировое производство бетона составляет свыше 14 млрд м³ [2], что как минимум вдвое превышает совокупный объем всех прочих строительных материалов вместе взятых [3]. Бетон является самым распространенным искусственным материалом, и именно поэтому ключевой вопрос доступной уникальной архитектуры упирается в то, насколько экономичным может быть создание сложных, нестандартных элементов из него.

Монолитное бетонное строительство сегодня предоставляет архитекторам широкие возможности, но цена этой свободы определяется во многом стоимостью опалубки и трудоемкостью опалубочных работ. Для прямолинейных повторяющихся форм возможно использование инвентарной щитовой опалубки многократного применения, что экономически оправданно, однако как только архитектурная форма становится криволинейной, с переменным сечением или уникальной поверхностью — возникает необходимость в индивидуальной опалубке, которая уже стоит гораздо дороже и для уникальных конструкций является одноразовой. Увеличение архитектурной сложности ведет к значительному росту стоимости, и это вынуждает архитекторов и заказчиков на этапе проектирования решать не столько художественные задачи, сколько стараться оптимизировать формы под возможности типовых опалубочных решений. Таким образом, уникальная архитектура из бетона в рамках традиционного монолитного строительства возможна, но она не всегда оказывается доступной именно из-за стоимости изготовления и монтажа опалубки, а также из-за необходимости привлечения высококвалифицированного ручного труда для выполнения нетиповых опалубочных и бетонных работ.

В свою очередь, аддитивное строительное производство (АСП, 3D-печать бетоном, 3DCP) предлагает принципиально иной подход: в технологии экструзионной печати управление формой осуществляется через цифровую модель и траекторию движения печатающей головки, а не через изготовление физической формы опалубки [4]. Переход от формы к коду ломает классическую зависимость, при которой дополнительная архитектурная сложность автоматически означает кратное повышение цены, и практически снимает зависимость себестоимости изготовления элемента от его геометрической формы. Современные обзоры характеризуют АСП как технологию, хорошо адаптированную под реализацию специальных и сложных дизайнерских решений с наименьшими затратами, особенно с точки зрения снижения трудозатрат и объема отходов материалов [5, 6]. Кроме

того, замена человеческого труда на роботизированные системы позволяет автоматизировать производство, снижая затраты на рабочую силу. В отличие от подходов, пытающихся адаптировать уникальные задачи под типовые технологические возможности, строительная 3D-печать позволяет строить из наиболее массового материала то, что действительно востребовано и оправданно архитектурным замыслом.

Цеховая печать: малые архитектурные формы, арт-объекты и модульные конструкции

Цеховая (заводская) модель применения технологии АСП предполагает изготовление элементов в контролируемых условиях с последующей транспортировкой к месту эксплуатации. На сегодня этот подход демонстрирует наибольшую степень технологической зрелости и коммерческой доступности. Контролируемая среда заводского цеха обеспечивает стабильность параметров твердения бетона, исключает влияние ветра, осадков и перепадов температур, а также открывает возможности для использования широкого спектра технологий армирования и комбинирования с другими материалами.

Для цеховой печати можно выделить несколько основных направлений, решающих свои архитектурные задачи: малые архитектурные формы (как отдельные объекты благоустройства), арт-объекты (демонстрационные и выставочные конструкции, часто собираемые из множества напечатанных элементов), префаб-элементы для последующей укрупнительной сборки, а также модульные строительные объекты.

Малые архитектурные формы и арт-объекты конкурируют прежде всего с традиционным литьем в опалубочные формы. При литье каждый новый объект требует изготовления индивидуальной формы, что делает экономически неоправданным производство единичных или мелкосерийных объектов с уникальной геометрией, в то время как для 3D-печати смена дизайна выпускаемого изделия осуществляется простой заменой цифровой модели, что позволяет производить каждый следующий

Рис. 1. Коллекция уличной мебели от Филиппа Адуаца, представленная в 2020 году [7]





← Рис. 2. Различные тестовые элементы типа МАФ в цехе учебного центра компании Smart Build Service

Рис. 3. Малая архитектурная форма от компании RVS-3D [9] →



объект с новой, неповторяющейся геометрией без увеличения себестоимости единицы продукции. Это принципиально меняет экономику производства МАФ, так как архитектор перестает быть заложником необходимости тиражировать одну и ту же форму для амортизации стоимости оснастки и получает возможность проектировать каждый объект как уникальный, откликающийся на конкретный контекст, освещение, рельеф и функциональные требования локации. Наиболее естественной и востребованной областью применения цеховой 3D-печати здесь часто выступают скамейки, вазоны, урны, отдельные элементы ландшафтного дизайна и т.д. (рис. 1–3).

АСП позволяет создавать сложные перфорированные, решетчатые и волнообразные поверхности, которые при литье потребовали бы разъемных форм или последующей механической обработки. Например, объект с переменным сечением, где ширина и высота профиля меняются в зависимости от расчетных нагрузок и эргономических требований, может быть напечатан как единое целое без каких-либо дополнительных операций. Важно

отметить, что речь идет не только о геометрической свободе, но и о тактильных и визуальных качествах поверхности: слоистая фактура, неизбежно возникающая при экструзионной печати, в малых архитектурных формах может стать сознательно культивируемым художественным приемом, подчеркивающим способ производства и создающим уникальную игру света и тени (рис. 4).

Там, где малая форма показывает общую эстетику аддитивного производства, крупный арт-объект может развернуть этот прием в полноценное архитектурное высказывание. В этой нише архитекторы и инженеры, не скованные характерными для объектов капитального строительства жесткими нормативными требованиями к несущей способности и долговечности, могут экспериментировать с предельными геометриями, минимальными сечениями и новыми выразительными качествами материала. Принципиальной особенностью многих арт-объектов является то, что они создаются не как отдельные изделия, а как пространственные конструкции, собранные из множества напечатанных дискретных элементов (рис. 5). Этот подход позволяет достигать масштабов,



Рис. 4. Элементы колонн от компании Vertico [8]



Рис. 5. Дом-кошка от компании 3D4Art [10]

недоступных для печати целиком, а также создавать уникальные структуры, которые невозможно напечатать за одну операцию из-за необходимости поддержки нависающих элементов.

С точки зрения коммерциализации технологии и ее внедрения в массовые сегменты строительства естественным выходом за пределы ниши арт-объектов становится печать префаб-элементов — то есть изготовление отдельных строительных элементов (объемных блоков, панелей и т.д.) с последующей транспортировкой и укрупнительной сборкой на площадке. Этот подход сочетает достоинства заводского качества напечатанных объектов с гибкостью их компоновки, позволяя создавать уникальные конфигурации из элементов, каждый из которых может иметь индивидуальную геометрию, напечатанную по цифровому проекту.

Существует два основных варианта реализации такого подхода. Первый, более радикальный, предполагает печать объемных модулей высокой заводской готовности, включающих не только стены, но и внутренние перегородки, инженерные коммуникации, сантехнику и отделку. Такие модули изготавливаются в цеху, доставляются на площадку и соединяются в здание, что позволяет значительно сократить время строительства по сравнению с традиционными технологиями, минимизировать шум, пыль и воздействие на окружающую среду, а также перенести основную массу работ в контролируемые заводские условия, где качество и точность обеспечить гораздо проще (рис. 6). В мировой практике по этой технологии в том числе реализуются и проекты многоэтажных жилых домов [11].

Второй, более гибкий вариант предполагает печать небольших элементов, которые затем собираются на площадке с использованием традиционных методов соединения мелкоштучных элементов. Этот подход позволяет сохранить архитектурную выразительность, поскольку каждый элемент может иметь уникальную криволинейную геометрию, напечатанную по индивидуальному цифровому проекту, при одновременном ис-



Рис. 6. Жилый модуль компании Smart Build Service, представленный совместно с НИУ МГСУ в рамках симпозиума FCI-2025 [12]

пользовании стандартизированных узлов соединения и монтажа. Это снижает требования к квалификации сборщиков на площадке и упрощает прохождение строительной экспертизы, поскольку соединение отдельных элементов может выполняться с использованием стандартизированных методов.

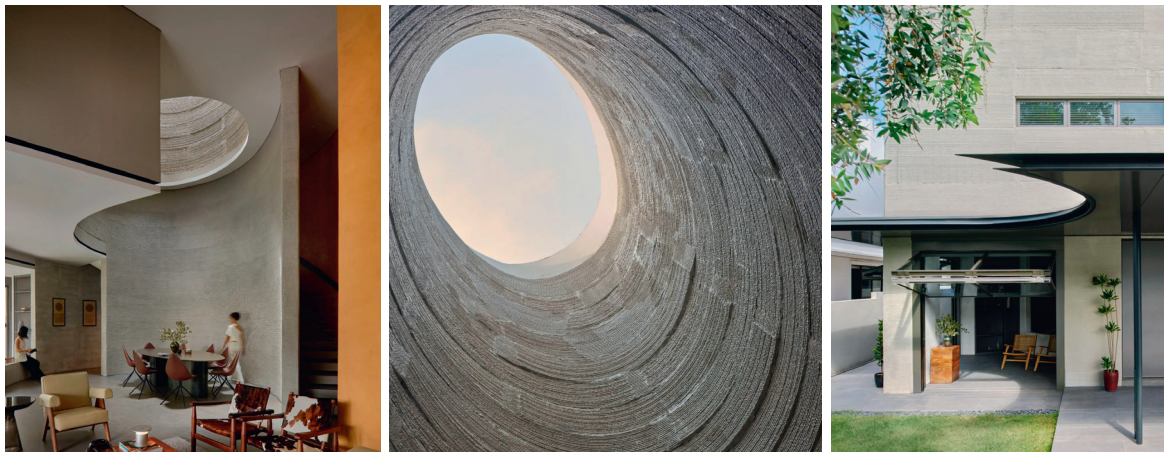
Печать на строительной площадке

Печать непосредственно на строительной площадке, в отличие от цеховой печати, предполагает возведение здания или сооружения непосредственно в точке его последующей эксплуатации с использованием строительных 3D-принтеров различной конфигурации, развернутых в полевых условиях. Исторически и технологически этот подход развивался для решения экономических и логистических задач: сокращение сроков строительства, снижение потребности в квалифицированной рабочей силе, уменьшение количества операций на строительной площадке и, как следствие, снижение себестоимости возведения объекта [13]. При этом потенциал повышения производительности труда при переходе к печати непосредственно на строительной площадке оценивается как весьма значительный: автоматизация процесса укладки бетона позволяет одному оператору управлять системой, которая заменяет труд бригады рабочих, а отсутствие необходимости в опалубочных работах, а иногда и в последующей отделке сокращает общую трудоемкость строительства в разы. Именно в этом сегменте АСП демонстрирует наибольшую эффективность для развития жилищного строительства, особенно в условиях глобального дефицита строительных кадров и необходимости быстрого возведения доступного жилья [6].

Когда речь идет о максимальной геометрической сложности, предельной тонкостенности или сложных траекториях печати, предпочтение часто отдается цеховому производству, где контролируемая среда и возможность использования многоосевых роботизированных манипуляторов позволяют достигать результатов, не всегда доступных при печати под открытым небом [14]. Однако эта граница постепенно размывается: те архитектурные и технологические подходы, которые сначала отрабатываются в цеховых условиях, все чаще начинают проникать в практику полевой печати. Технологические ограничения, которые сегодня делают печать на площадке менее гибкой и точной по сравнению с цеховой, преодолеваются по мере совершенствования оборудования, материалов и программного обеспечения. Уже сейчас можно видеть, что возможность создавать непрерывные криволинейные поверхности без стыков и швов, отказываться от колонн в пользу стеновых конструкций сложной геометрии, оставлять слоистую фактуру как сознательный художественный прием и проектировать здания, которые органично вписываются в ландшафт, начинает проявляться и в проектах полевой печати.

Как показывают примеры четырехуровневого дома QR3D в Сингапуре со скульптурным отверстием, пронизывающим всю высоту здания [15], и дома House Zero в Остине [16], признанного одним из лучших изобретений

Рис. 7.
Проект QR3D
в Сингапуре



года по версии журнала Time, наиболее выразительные результаты достигаются тогда, когда архитектор не пытается имитировать традиционные формы, а принимает логику послойного аддитивного наращивания, отсутствие опалубки, свободу криволинейных траекторий и превращает эти технологические особенности в основу архитектурного языка. Можно с уверенностью предположить, что по мере сближения возможностей полевой и цеховой печать, архитектурная выразительность перестанет быть привилегией какого-то одного формата и станет общим достоянием всего аддитивного строительного производства. ■

Литература

- Larsen MSS, Lindhard SM, Brunoe TD, Nielsen K and Larsen JK (2019), Mass Customization in the House Building Industry: Literature Review and Research Directions. *Front. Built Environ.* 5:115. doi: 10.3389/fbuil.2019.00115.
- Global Cement and Concrete Association. The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete. 2022. 48 с.
- Colin R. Gagg, Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. *Engineering Failure Analysis*. Volume 40. 2014. Pp. 114–140. ISSN 1350–6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>.
- Buswell, R.A., Leal de Silva, W.R., Jones, S.Z., & Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, 112, 37–50.
- Адамцевич А.О., Пустовгар А.П. Аддитивное строительное производство 2030–2036: глобальные тренды и стратегические возможности для России. Форсайт-исследование. М.: НИУ МГСУ, 2025. 47 с. doi: 10.22227/mgsu.nii-smit.2025.1.
- Muhammad Adeel. Three-dimensional concrete printing for sustainable construction and architecture: A comprehensive review. *Journal of Chinese Architecture and Urbanism* 025370074. <https://doi.org/10.36922/JCAU025370074>.
- Philipp Aduatz: Private Commission [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.philippaduat.com/portfolio-item/private-commission>.
- Vertico: Innovative 3D-printed structural columns by Vertico [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.vertico.com/projects/structural-columns>.
- RVS-3D: Малые архитектурные формы [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rvs3d.ru/malye-arhitekturnye-formy-maf>.
- 3D4Art: Проект нежилое печатное 3D здание [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://3d4art.ru/3d-pyechaty-doma-eez-byetona5/проект-нежилое-печатное-3d-здание-скул>.
- Chinese Company Constructs the World's Tallest 3D Printed Building [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.archdaily.com/591331/chinese-company-creates-the-world-s-tallest-3d-printed-building>.
- FCI-2025: На площадке НИУ МГСУ представлена экспозиция строительной 3D-печати и готовый жилой модуль [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mgsu.ru/news/Universitet/FCI2025NaploshchadkeNIUMGSUpredstavlenaekspozitsiyastroitelenoy3Dpechatiiotovyvyyzhiloymodul>.
- Ghafur H. Ahmed, A review of «3D concrete printing»: Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability, *Journal of Building Engineering*. Volume 66. 2023. 105863, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105863>.
- Dawei Liu, Zhigang Zhang, Xiaoyue Zhang, Zhaohui Chen. 3D printing concrete structures: State of the art, challenges, and opportunities. *Construction and Building Materials*. Volume 405. 2023. 133364, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133364>.
- Park + Associates: QR3D [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://parkassociates.com.sg/projects/qr3d>.
- ICON: House Zero [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iconbuild.com/projects/house-zero>.



Рис. 8. Проект House Zero от компании ICON в США

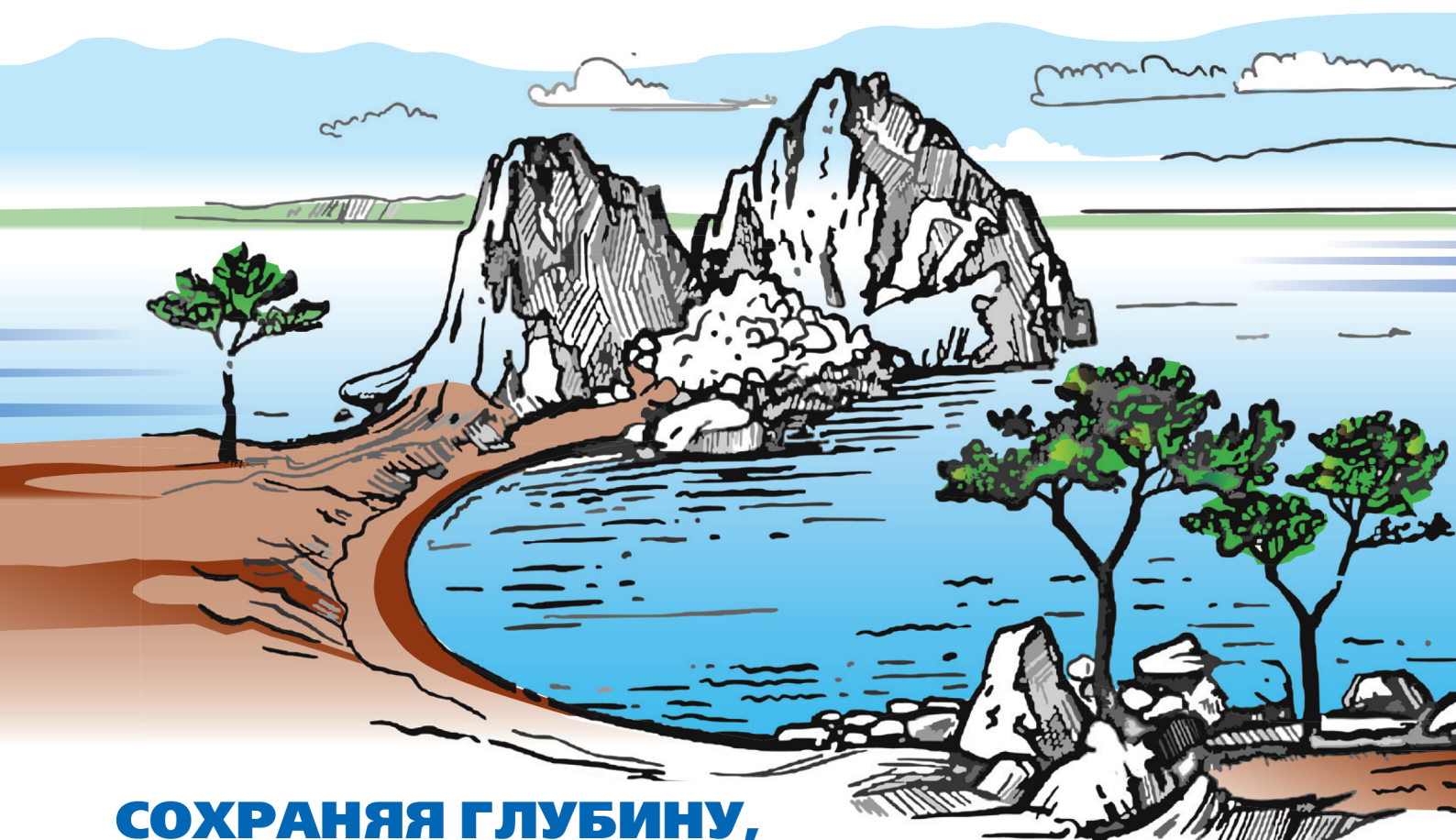
26-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ СУХИХ
СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

18-20 августа
2026 года



ВАЛТИМІХ

БАЙКАЛ  2026



**СОХРАНЯЯ ГЛУБИНУ,
СОЗДАЕМ БУДУЩЕЕ**

Генеральный
партнер:



Партнеры:



Организаторы:



При поддержке:



BALTIMIX.RU

Технологические аспекты получения металломатричных композитов

Работа выполнена в Томском политехническом университете

А.Я. Пак, заведующий лабораторией, д.т.н., Лаборатория перспективных материалов энергетической отрасли (ИШЭ)

Ю.В. Ли, научный сотрудник, к.ф.-м.-н., Лаборатория перспективных материалов энергетической отрасли (ИШЭ)

А. Насырбаев, ассистент, Отделение электроэнергетики и электротехники (ИШЭ)

М.Г. Криницын, доцент, к.т.н., Отделение материаловедения (ИШНПТ)

Д.С. Никитин, исполняющий обязанности руководителя, к.т.н., Отделение материаловедения (ИШНПТ)

А.С. Бабаев, старший научный сотрудник, к.т.н., НПОЛ «Дизайн материалов и аддитивные технологии»

Введение

Металломатричные композиты (ММК) представляют собой класс материалов, получаемых путем объединения двух или более компонентов с различными свойствами и формами для достижения новых характеристик, которыми не обладает ни один из отдельных компонентов [1–3]. В отличие от сплавов или интерметаллических соединений, где смешение происходит на атомарном или молекулярном уровне, в композите каждый компонент сохраняет свою собственную микроструктуру и свойства, а между ними формируется четкая граница раздела [4]. Интерес к ММК обусловлен уникальным сочетанием свойств, недостижимым для традиционных металлических материалов. К их основным преимуществам относятся: высокая удельная прочность и жесткость, повышенная износостойкость (особенно при введении твердых керамических частиц), высокие значения теплопроводности и электропроводности, а также возможность регулирования коэффициента термического расширения [5]. Эти характеристики делают ММК востребованными в аэрокосмической отрасли, автомобилестроении, электронике и производстве энергетических установок.

Несмотря на обширные исследования свойств ММК, вопросы их промышленного производства долгое время оставались на периферии научного внимания. Большинство работ на сегодняшний день посвящены оценке именно механических характеристик готовых материалов, в то время как технология получения анализировалась недостаточно системно. Однако именно технологический процесс от синтеза армирующих керамических порошков до консолидации объемных композитов определяет морфологию, распределение наполнителя и, что наиболее важно, качество границы раздела «матрица — армирующий элемент». От состояния этой границы раздела напрямую зависят механические, физические и эксплуатационные свойства конечного материала.

Также необходимо отметить, что характеристики ММК в значительной степени определяются армиру-

ющими наполнителями, которые могут превосходить неармированные материалы по прочности, жесткости и износостойкости [2]. Однако реализация этого потенциала возможна лишь при условии оптимального выбора метода получения, обеспечивающего равномерное распределение наполнителя, минимальную пористость и контролируемое взаимодействие на границе раздела.

В настоящей работе представлен полный технологический цикл получения ММК, включающий синтез керамических порошков (наполнителя) заданного состава и дисперсности, их введение в металлическую матрицу, а также последующую консолидацию с формированием объемных композитных материалов. На каждом этапе технологического маршрута проводился комплексный контроль с использованием современных методов аналитической диагностики: сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) для оценки морфологии, распределения и размера частиц наполнителя; просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) для изучения тонкой кристаллической структуры и границ раздела фаз, рентгенофазового анализа (РФА) для идентификации фазового состава и контроля отсутствия нежелательных примесных фаз, а также энергодисперсионного микроанализа (ЭДС) для элементного картирования распределения компонентов. Такой подход позволяет установить взаимосвязь между технологическими параметрами на всех этапах — от синтеза наполнителя до финишной обработки — и итоговыми свойствами композита, обеспечивая воспроизводимость и предсказуемость характеристик конечного материала.

Синтез керамических порошков

Как уже упоминалось ранее, ключевым этапом, предопределяющим успешность всего последующего технологического маршрута, является получение армирующего наполнителя с контролируемыми характеристиками. В качестве материалов для дисперсного упрочнения в данной работе рассматриваются тугоплавкие соеди-

нения — бориды и карбиды. Данный класс керамических материалов обладает уникальным комплексом свойств: высокими значениями твердости (обеспечивающими износостойкость композита), термодинамической стабильностью при повышенных температурах, а также хорошей смачиваемостью некоторыми расплавами металлов, что критически важно для формирования прочной адгезионной связи на границе раздела фаз.

Выбор конкретного метода синтеза порошков определяет морфологию частиц, их размерный диапазон, степень дефектности кристаллической решетки и, как следствие, реакционную способность наполнителя при взаимодействии с матрицей. К числу основных методов получения тугоплавких соединений (боридов и карбидов переходных металлов IV–VI групп) относят карботермическое и боротермическое восстановление, синтез в режиме механоактивации, а также плазмохимические технологии [6–9]. Однако каждый из этих методов имеет значительные недостатки: длительность процесса, необходимость последующей обработки целевого продукта с целью удаления примесей, а также высокую энергоёмкость.

В качестве альтернативы в настоящей работе предложено использование метода безвакуумного электродугового синтеза. Его преимуществами являются технологическая простота, невысокие требования к чистоте исходных компонентов и более низкое энергопотребление в сравнении с традиционными подходами. Методика реализуется за счет так называемого эффекта самоэкранирования реакционного объема от кислорода воздуха со сдвигом реакций в сторону восстановления с образованием газов CO и CO₂ при горении дуги на графитовых электродах в воздушной среде (рис. 1). Данный подход позволяет осуществлять синтез непосредственно в открытой атмосфере, исключая применение дорогостоящего вакуумного оборудования и инертных газов, что существенно упрощает масштабирование процесса. Кроме того, высокая температура дугового разря-

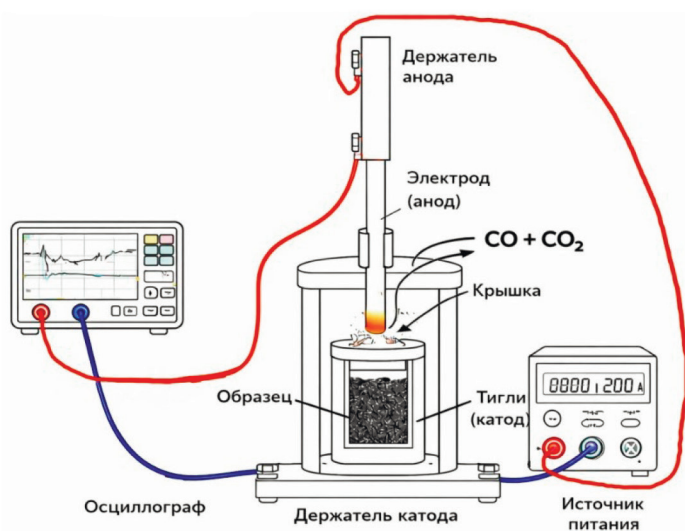


Рис. 1. Схема конфигурации дугового реактора

да обеспечивает протекание реакций в кинетической области, способствуя формированию частиц с низкой дефектностью кристаллической решетки и минимальным содержанием кислородсодержащих примесей. Важным технологическим преимуществом является также высокая производительность метода: за один цикл синтеза, продолжительность которого не превышает одной минуты, удается получить до 6 граммов целевого продукта.

Совокупность перечисленных факторов делает безвакуумный электродуговой синтез перспективным методом получения высокочистых порошков боридов и карбидов, пригодных для дальнейшего использования в качестве армирующих наполнителей металломатричных композитов. С использованием данного метода в наших работах синтезирован ряд тугоплавких соединений. В частности, получены порошки карбидов: вольфрама WC, кремния SiC, хрома CrC, молибдена Mo₂C, гафния HfC [10], а также боридов: диборида циркония ZrB₂, диборида тантала TaB₂, диборида титана TiB₂ [11]. Все полученные материалы характеризуются высокой чистотой

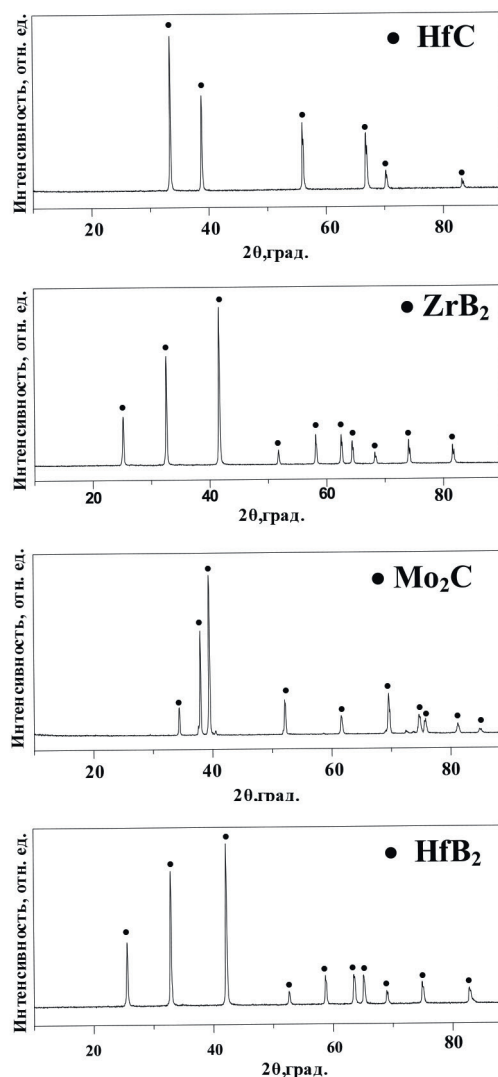


Рис. 2. Результаты РФА карбидов и боридов переходных металлов, полученных методом безвакуумного электродугового синтеза

фазового состава и контролируемой дисперсностью, что подтверждено данными рентгенофазового анализа (РФА) и электронной микроскопии (рис. 2, 3).

Методы получения ММК

Формирование объемных композитных материалов на основе синтезированных порошков армирующих фаз (ZrB_2 , TaB_2 , SiC и т.д.) и металлической матрицы (Al, Ni, Cu сплавов) требует применения методов консолидации, обеспечивающих высокую плотность, равномерное распределение наполнителя и контролируемое состояние границы раздела. В настоящей работе для получения ММК использованы два взаимодополняющих подхода: метод искрового плазменного спекания (spark plasma sintering, SPS), позволяющий реализовать короткие циклы спекания при относительно низких температурах и предотвратить нежелательное взаимодействие компонентов, а также метод аддитивного производства, селективное лазерное плавление (selective laser melting, SLM), обеспечивающее возможность изготовления изделий сложной геометрии непосредственно из порошковых композиций с минимальным количеством отходов.

Искровое плазменное спекание (SPS)

Метод искрового плазменного спекания (spark plasma sintering — SPS) характеризуется одновременным приложением давления и пропусканием импульсного электрического тока через спекаемый материал. Принципиальная схема установки и механизм спекания представлены на рис. 4.

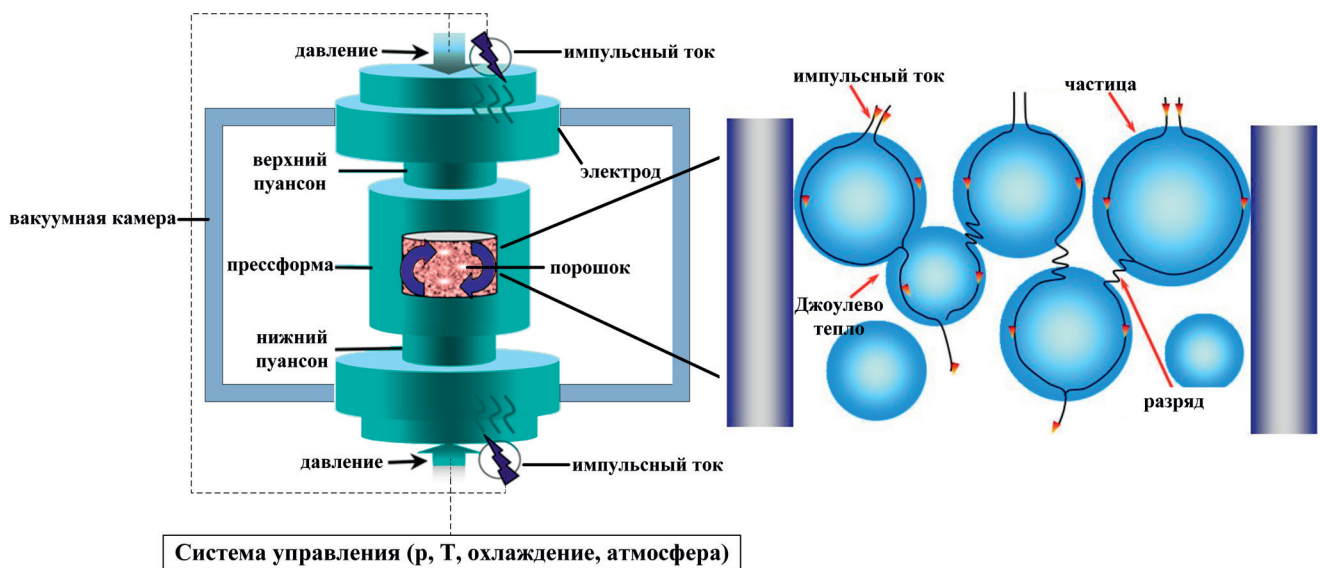


Рис. 4. Принципиальная схема устройства и механизма SPS

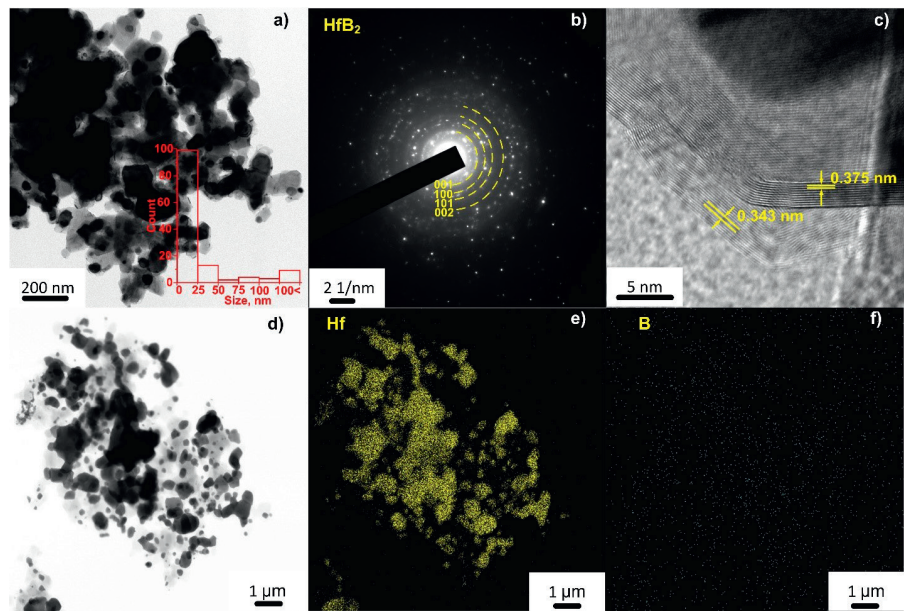


Рис. 3. Данные просвечивающего электронного микроскопа для образца HfB_2 , синтезированного при 200 А и времени воздействия дуги 60 с

Ток пропускается через графитовую матрицу, а также непосредственно через образец в случае использования проводящих материалов. Нагрев исходного дисперсного материала осуществляется за счет искрового разряда между частицами, тогда как графитовая матрица нагревается импульсным током. Таким образом, для проводящих материалов нагрев происходит как изнутри, так и снаружи, что принципиально отличается данным методом от традиционного спекания и горячего прессования, где тепло подводится исключительно внешними нагревательными элементами. Это позволяет достигать высоких скоростей нагрева без риска повреждения оборудования и образца: формирование полностью спекленного образца занимает минуты, тогда как при обычном спекании на это требуются часы или даже дни.

Благодаря одновременному приложению к образцу давления и температуры достигается высокая степень

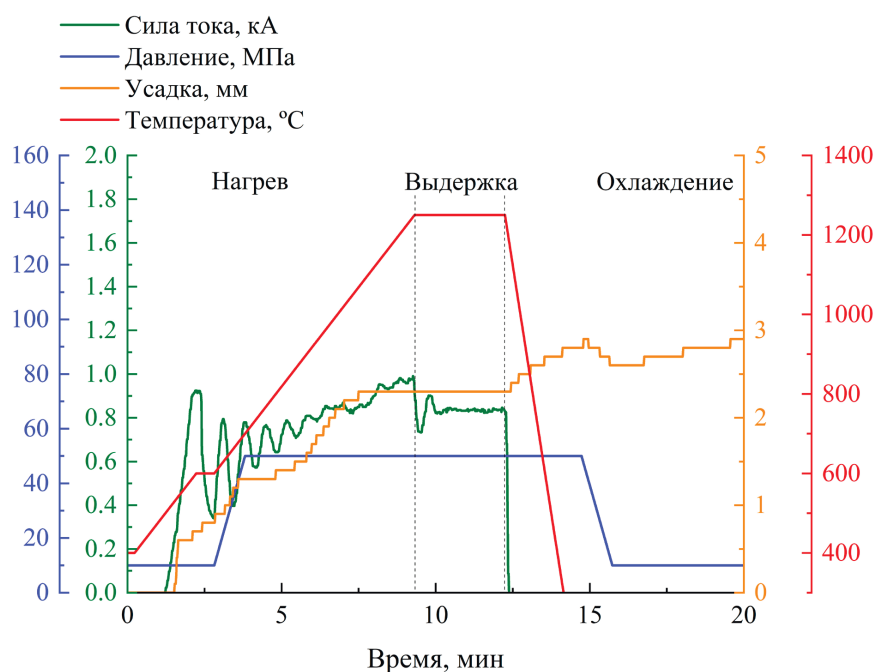


Рис. 5. Типичные кривые спекания



Рис. 6. Фотография установленной пресс-формы с войлочной изоляцией в камере спекания

уплотнения материала при более низких температурах спекания по сравнению с методами без давления, что способствует подавлению интенсивного роста зерна. Сокращенное время выдержки и сниженные температуры процесса позволяют спекать порошки до плотностей, приближающихся к теоретическим, с минимальным ростом зерна, а также компактировать трудноспекаемые материалы. Это особенно важно для получения ММК, поскольку позволяет сохранить исходную дисперсность армирующих частиц и предотвратить неконтролируемое образование интерметаллидов на границе раздела фаз.

В настоящей работе метод искрового плазменного спекания использован для получения объемных композитных образцов на основе синтезированных порошков боридов и карбидов. Применялась установка искрового плазменного спекания GT Advanced Technologies SPS10–4. Исходную порошковую смесь, состоящую из металлической матрицы и предварительно синтезированного армирующего наполнителя, обернутую графитовой бумагой, помещали в объем, образованный пресс-формой диаметром 12,7 мм. Температуру пресс-формы изменяли по заданной программе и регистрировали с помощью высокотемпературного пирометра или термопары.

Оснастка для искрового плазменного спекания

Все графитовые изделия (пресс-формы, пуансоны, проставки) изготавливали из изостатического графита марки С-7 согласно ТУ-1915-001-48534975-2014. Данная марка графита характеризуется высокой прочностью на сжатие (не менее 148 МПа) и низким удельным электрическим сопротивлением (не более 18 мкОм·м), что критически важно для эффективной передачи тока и давления в процессе спекания. Изделия из графита С-7 способны длительное время эксплуатироваться при высоких температурах (до 2400 °С) в вакуумной среде.

Пресс-формы представляют собой трубы с наружным/внутренним диаметрами 30×12,8 мм и 40×20 мм длиной 40 мм. В качестве пуансонов используют графитовые стержни диаметром 12,4 мм и длиной 20–25 мм. Графитовые проставки выполнены в виде цилиндров диаметрами 50 и 80 мм и толщиной 40 мм; их применение обусловлено необходимостью равномерного распределения давления на образец. Для предотвращения контакта металл — графит, возникающего при давлении металлических толкателей на графитовые проставки и приводящего к электроэрозионному износу поверхности толкателей, на каждый толкатель укладывают по два листа графитовой бумаги.

Для корректного измерения температуры, подведенной к образцу, в стенке пресс-формы высверливают отверстие диаметром ~2 мм на глубину 4–5 мм, в которое направляют пирометр или вставляется термопара.

Проведение пробоподготовки и режимы спекания

Перед началом спекания осуществляли включение установки искрового плазменного спекания и всего вспомогательного оборудования: вакуумного и гидравлического насосов, системы охлаждения, компрессора для управления заслонками вакуумной системы, а также персонального компьютера.

В специализированном программном обеспечении Eurotherm iTools задавали программу спекания. После составления программы осуществляли соединение с контроллером системы SPS и загрузку программы в память контроллера. Типичные кривые спекания представлены на рис. 5. На контроллере задавали требуемые значения преднагрузки (10 МПа) и площади давления (120,7 или 304,8 мм²).

Подготовленную порошковую смесь закладывали в графитовую пресс-форму и поджимали ручным прессом для предотвращения смещения матрицы при установке



Рис. 7. Образцы в форме цилиндрических таблеток, полученные методом SPS

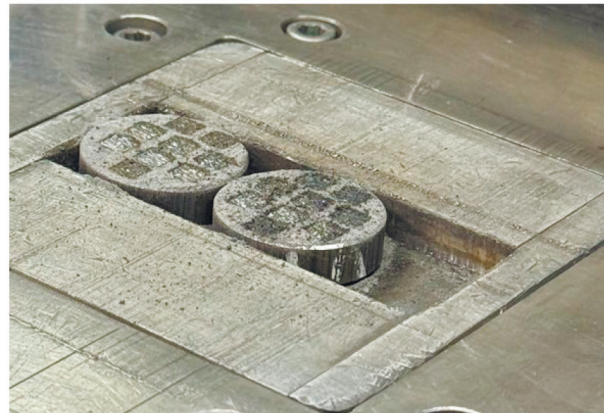


Рис. 8. Наслоение порошка Inconel 718-WB2 в камере установки для печати образцов «Луч-500»

пресс-формы в камеру спекания. Затем устанавливали теплоизоляционный экран (графитовый войлок) на пресс-форму и помещали ее в рабочую камеру (рис. 6).

После калибровки пирометра по отверстию в пресс-форме производили подачу толкателей и установку преднагрузки. Далее камеру герметизировали и открывали клапан вакуумного насоса для откачки воздуха из рабочего объема. Спекание проводили по заданной программе, включающей этапы нагрева, выдержки при заданной температуре и контролируемого охлаждения. Применяемые режимы спекания подбирали исходя из состава композита, обеспечивая достижение высокой плотности при сохранении исходной структуры армирующих частиц (таблица 1).

В результате искрового плазменного спекания получили образцы в форме цилиндрических таблеток диаметром 12,7 мм и высотой 5–10 мм, соответствующие геометрии используемой пресс-формы (рис. 7). Полученные таблетки подвергали комплексной характеристике для оценки качества спеченных композитов.

Метод селективного лазерного плавления

Наряду с искровым плазменным спеканием в настоящей работе для получения металломатричных композитов использован метод селективного лазерного плавления (selective laser melting, SLM), относящийся к аддитивным технологиям послойного построения изделий из порошковых материалов. Данный метод позволяет изго-

тавливать изделия сложной геометрии непосредственно из порошковых композиций с минимальным количеством отходов, обеспечивая высокую гибкость производства и возможность локального управления структурой материала.

Принцип действия SLM-установок заключается в последовательном расплавлении тонких слоев порошка высокоэнергетическим лазерным лучом в соответствии с цифровой моделью. Процесс построения реализуется циклически: рапель распределяет порошок тонким слоем по поверхности подложки, после чего лазерный луч сканирует заданные участки, локально расплавляя материал. Затем платформа опускается на толщину следующего слоя, и цикл повторяется, формируя трехмерную структуру. По завершении процесса неиспользованный порошок удаляют и могут повторно использовать. Полученные образцы характеризуются послойной структурой, а их механические свойства определяются качеством формирования каждой дорожки и слоя (геометрией, степенью сплавления, отсутствием дефектов), что подчеркивает важность точного контроля параметров процесса.

Существенным преимуществом SLM является высокая скорость охлаждения расплава, достигающая 10^5 – 10^6 К/с, что способствует формированию мелкозернистой микроструктуры и подавлению роста зерен. В контексте получения ММК данный метод позволяет не только формировать сложные геометрические формы, но и контролировать распределение армирующей фазы в объеме материала. Композиционные порошки могут

Таблица 1. Режимы спекания разных составов ММК [12,13] и значения микротвердости

Состав	T, °C	P, МПа	t, мин	ρ отн, %	HV
AMг6-ZrB ₂	500	50	5	99	135±5
Inconel-WB ₂	1100	50	5	99	310±5
12X18H10T-WB ₂	1100	50	5	96	281±6
Al-SiC [12]	600	50	5	97	169±8
Al-B ₄ C [12]	600	50	5	97,9	215±18
Cu-WC [13]	850	60	10	95	92±1
Cu-TiC [13]	850	60	10	91	131±9

быть получены предварительным механическим смешением металлической матрицы и упрочняющих частиц либо синтезированы *in situ* непосредственно в процессе лазерного воздействия.

В настоящей работе образцы получались на SLM-установке «Луч-500», разработанной в Томском политехническом университете (рис. 8).

Установка предназначена для реализации технологии SLM в контролируемой инертной атмосфере (аргон, гелий) и имеет возможность вакуумирования рабочего объема, что позволяет работать с реакционноспособными металлическими порошками. Конструктивно система выполнена по модульному принципу, что позволяет адаптировать ее конфигурацию под различные исследовательские задачи. Управление установкой осуществляется специализированным программным обеспечением, обеспечивающим преобразование цифровой модели в траекторию движения лазерного луча и синхронизацию работы всех компонентов, что позволяет точно контролировать параметры процесса: мощность излучения, скорость сканирования, шаг между дорожками и стратегию построения.

Оценку качества полученных изделий проводили с использованием различных методов аналитической диагностики. Одним из ключевых подходов являлась сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), позволяющая исследовать микроструктуру, выявлять дефекты (поры, несплавления, микротрещины), а также оценивать морфологию и распределение армирующих частиц в объеме матрицы. Результаты СЭМ-исследований представлены на рис. 9.

Данные (СЭМ) позволили провести анализ микроструктуры образцов металломатричного композита Inconel 718, армированного диборидом вольфрама (WB_2), с различным содержанием армирующей фазы (рис. 9). Для состава с 1,5% WB_2 выявлена слоистая структура с дефектами в виде поверхностных трещин, при этом продольные трещины отсутствовали. Область межслойного соединения четкая, дефекты в виде трещин и пористости отсутствуют. Армирующие частицы распределены равномерно.

Для состава с 4,5% WB_2 сквозные макротрещины также не фиксируются, граница между слоями сохраняет четкую выраженность.

Таким образом, в исследованных образцах композита Inconel 718 — WB_2 , полученных методом селективного лазерного плавления, независимо от содержания армирующей фазы (1,5% и 4,5% WB_2) формируется качественная структура с четкими межслойными границами и равномерным распределением упрочняющих частиц. Отсутствие дефектов в виде трещин, пористости и кластеризации наполнителя свидетельствует о корректно подобранных режимах лазерного плавления.

Заключение

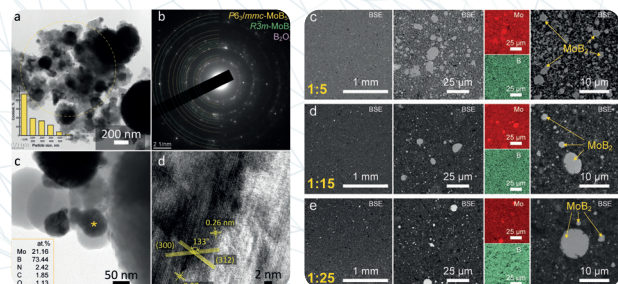
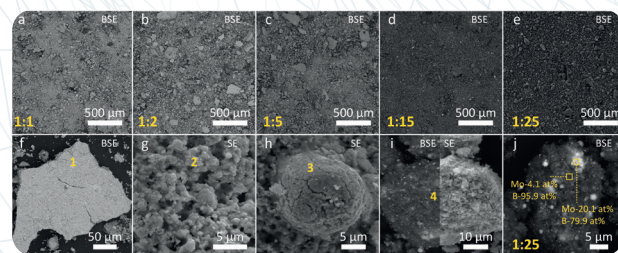
В настоящей работе представлен полный технологический цикл получения металломатричных композитов, включающий синтез армирующих керамических

НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

- Разработка и изготовление 3D-принтеров
 - Разработка и исследование новых материалов для аддитивных технологий
 - Аддитивные технологии для нужд космоса
 - Математическое моделирование процессов аддитивного производства
- Инновационные технологии создания керамики (в том числе наноструктурированной)
 - Разработка электрофизических установок: электроразрядные, плазменные и пучковые технологии
 - Наноматериалы и нанотехнологии: функциональные покрытия, новые композиционные материалы
 - Фотонные технологии: радиационная физика твердого тела, импульсная спектроскопии, люминесценция
 - Переработка природных и техногенных материалов
 - Электрохимия и фотовольтаика: исследования электрохимического осаждения благородных металлов
 - Безреагентные способы обработки воды: разработка и внедрение водоочистных комплексов
 - Аттестация и экспертиза широкого спектра конструкционных материалов
 - Новые методы и реагенты для органического синтеза и разработки лекарственных препаратов и материалов медицинского назначения
 - Материаловедение перспективных композиционных материалов

КОНТАКТЫ: +7 (3822) 701777 (ВН. Т. 2316)

AYAPAK@TPU.RU



ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

НАПРАВЛЕНИЯ ПОДГОТОВКИ

- 12.03.02 Оптехника (бакалавриат, магистратура)
- 15.03.01 Машиностроение (бакалавриат, магистратура)
- 18.03.01 Химическая технология (бакалавриат, магистратура)
- 19.03.01 Биотехнология (бакалавриат, магистратура)
- 22.03.01 Материаловедение и технологии металлов (бакалавриат, магистратура)

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ПЛАТНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

- Оптические технологии
- Электрохимические технологии
- Химические технологии и биотехнологии
- Общие химические технологии и оборудование
- Машиностроение
- Металловедение



Инженерная школа новых
производственных технологий

КОНТАКТЫ:

Контакты: +7 (3822) 606172;
+7 (3822) 701777 (Вн. т. 2354)
natalia_kuznetsova@tpu.ru

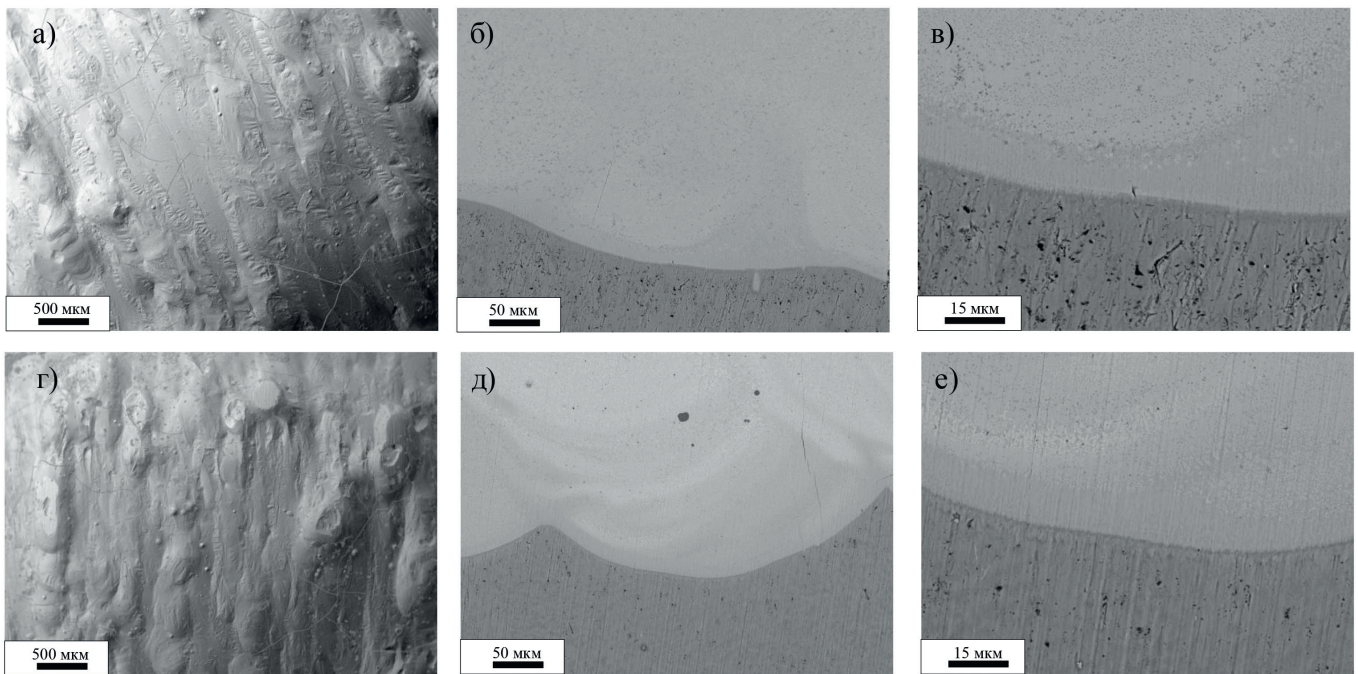


Рис. 9. СЭМ композита Inconel 718+ WB2 : а, б, в) 1,5% WB2 , г, д, е) 4,5% WB2 , изготовленных с использованием SLM

порошков, их введение в металлическую матрицу и последующую консолидацию. Разработан и апробирован метод безвакуумного электродугового синтеза для получения тугоплавких соединений (боридов и карбидов переходных металлов: WC, SiC, CrC, Mo₂C, HfC, ZrB₂, TaB₂, TiB₂), обладающий технологической простотой, низким энергопотреблением и высокой производительностью (до 6 г за цикл менее 1 минуты). Полученные порошки характеризуются высокой чистотой фазового состава и контролируемой дисперсностью, что подтверждено РФА, СЭМ и ПЭМ. Для консолидации использованы два взаимодополняющих метода: искровое плазменное спекание (SPS), позволяющее получать образцы с относительной плотностью до 99% и микротвердостью от 135 до 310 HV при сохранении исходной структуры армирующих частиц, и селективное лазерное плавление (SLM), обеспечивающее послойное формирование изделий сложной геометрии с контролируемым распределением армирующей фазы. Комплексный контроль на всех этапах с использованием СЭМ, ПЭМ, РФА позволил установить корреляцию между технологическими параметрами, структурой и свойствами композитов. Предложенный технологический цикл обеспечивает воспроизводимость и предсказуемость характеристик ММК, что создает основу для их применения в аэрокосмической отрасли, автомобилестроении и других высокотехнологичных секторах промышленности. ■

Литература

1. M. Haghshenas et al. Reference Module In Materials Science and Materials Engineering // Metal-Matrix Composites. 2016. P. 1–28. DOI 10.1016/8978-0-12-803581-8.02246–3
2. J. Selvam et al. Matrix and Reinforcement Materials for Metal Matrix Composites // Encyclopedia of Materials: Composites. 2021. Vol. 2. P. 615–639. DOI 10.1016/B978-0-12-803581-8.11890–9
3. V. Lemkova et al. Metal Matrix Composites from Severe Plastic Deformation by the Example of High-Pressure Torsion as a Promising Tool to Manufacture Smart Materials // Procedia Structural Integrity. 2026. Vol. 77. P. 279–291. DOI 10.1016/j.prostr.2026.01.037
4. Y. Nishida et al. Introduction to Metal Matrix Composites: Fabrication and Recycling // Introduction to Metal Matrix Composites. 2012. DOI 10.1007/978-4-431-54237-7
5. S. Seetharaman et al. Fundamentals of Metal Matrix Composites // Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. 2021. DOI 10.1016/B978-0-12-803581-8.00001–1.
6. E. Jung et al. Synthesis of ZrB₂ powders by carbothermal and borothermal reduction // Journal of Alloys and Compounds. 2012. V. 538. P. 164. V. 538. P. 164–168168. DOI 10.1016/j.jallcom.2012.05.076
7. J. Cinert et al. Preparation of ZrB₂ by boro/carbothermal reduction in SPS device // Ceramics-Silikáty. 2019. V. 63. No 1. P. 93–99. DOI 10.13168/cs.2019.0001
8. D. Ponomarev et al. Pulse plasma-chemical synthesis of ultradispersed powders of titanium and silicon oxide // IEEE Transactions on Plasma Science. 2013. V. 41. No 10. P. 2908–2912. DOI 10.1109/TPS.2013.2273559
9. P. Millet et al. Preparation of TiB₂ and ZrB₂. Influence of a mechano-chemical treatment on the borothermal reduction of titania and zirconia // Journal of Materials Science. 1996. V. 31. P. 351–355. DOI 10.1007/BF01139151
10. Yu. Vassilyeva et al. Electric arc vacuumless synthesis of IV–V group transition metal carbides // Transition Metal Chemistry. 2024. V. 49. P. 485–493. DOI 10.1007/s11243-024-00598-3
11. A. Svinukhova et al. Synthesis of titanium diboride by electric arc plasma in air // Materials Chemistry and Physics. 2024. Vol. 328. P. 129973. DOI 10.1016/j.matchemphys.2024.129973
12. D. Nikitin et al. In-situ carbide reinforced aluminium metal matrix composites obtained in pulsed arc plasma discharge // Ceramics International. 2025. Vol. 51. P. 19080–19090. DOI 10.1016/j.ceramint.2025.02.087
13. D. Nikitin et al. Synthesis of copper metal matrix composites reinforced with hard carbides via in-situ and ex-situ thermal plasma spraying // Composites Communications. 2026. Vol. 61. P. 102680. DOI 10.1016/j.coco.2025.102680

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWW-2025-0003).

16-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ ВЫСТАВКА

СТРАНА-ПАРТНЕР — 2026: ИНДОНЕЗИЯ



50 000 м²
выставочная площадь



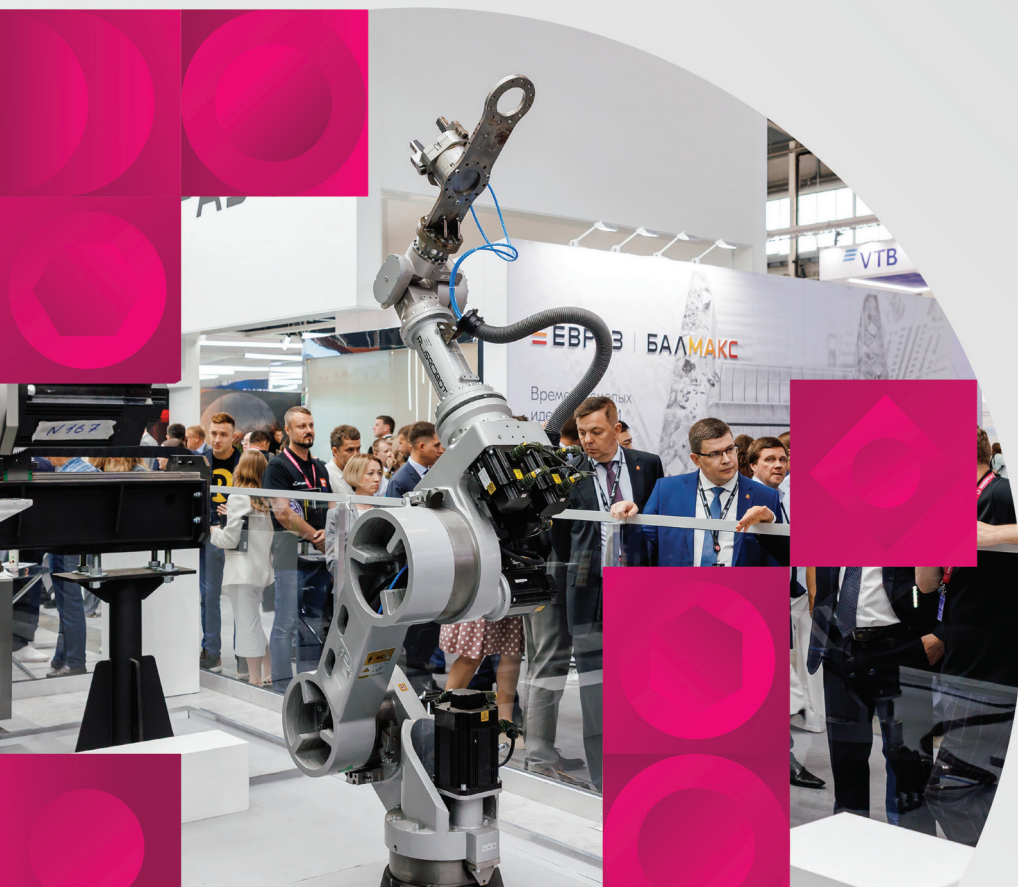
15 000
компаний и организаций



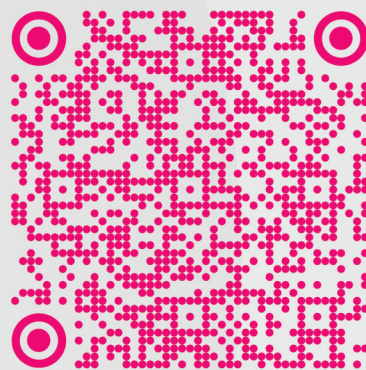
52 000+
посетителей
из 66 стран мира



100+
мероприятий деловой
программы



**ВЫБРАТЬ
ФОРМАТ УЧАСТИЯ**



25 weldex®

25-я Международная выставка
сварочных материалов,
оборудования и технологий

6–9.10.2026

Москва, Крокус Экспо



Узнать условия
участия

ITE®
ОРГАНИЗАТОР
ORGANISER



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



Выставка «3D-TECH – 2026»: развитие аддитивных технологий в России и ключевые тренды отрасли

С 16 по 19 июня 2026 года в Москве, в МВЦ «Крокус Экспо», пройдет специализированная выставка «3D-TECH» — ключевое событие для профессионального сообщества в сфере аддитивных технологий и 3D-печати в России.



Экспозиция 3D-технологий сформировалась как самостоятельное направление в рамках выставки прессформ и штампов Rosmould и в последние годы проходит как отдельная выставка «3D-TECH». Сегодня «3D-TECH» проводится совместно с выставками Rosmould и Rosplast, представляя на своей площадке единую производственную цепочку — от проектирования и прототипирования до серийного выпуска продукции.

Российский рынок аддитивных технологий: динамика и развитие

К концу 2025 — началу 2026 г. рынок аддитивных технологий в России демонстрирует устойчивый рост: за последний год его объем увеличился более чем на 20% и превысил 22 млрд рублей. Согласно прогнозу Ассоциации развития аддитивных технологий (ARAT), при сохранении текущих темпов к 2030 году показатель может вырасти до 58 млрд рублей.

Как отмечает исполнительный директор ARAT и советник президента АО «ТВЭЛ» Ольга Оспенникова, одним из ключевых драйверов роста российского рынка аддитивных технологий остается курс на технологическую независимость и стратегическое импортозамещение. Наблюдается активное развитие собственной материаловедческой базы: ожидается расширение номенклатуры отечественных металлических порошков и полимерных композиционных материалов.

Также в условиях ограниченного доступа к иностранному ПО российский рынок стремится к цифровой суверенизации — отечественные компании не только адаптируют существующие технологии, но и разрабатывают собственные решения в сфере 3D-оборудования и ПО.

Заметно усиливается интеграция аддитивных технологий в серийное и мелкосерийное производство. Если ранее 3D-печать использовалась для прототипирования, то сегодня предприятия машиностроения, авиастроения и энергетики внедряют ее для изготовления функциональных деталей и оснастки.

Отдельное направление развития — расширение применения аддитивных технологий в медицине, включая производство имплантатов, хирургических моделей и индивидуальных изделий. Также растет интерес к аддитивным технологиям со стороны образовательных и научных центров, что формирует кадровую базу отрасли.

Таким образом, на рубеже 2025–2026 гг. аддитивные технологии в России переходят из стадии технологического освоения в фазу практического промышленного применения, формируя устойчивый спрос на оборудование, материалы и инженерные решения.

«3D-TECH – 2026»: платформа для профессионального диалога

В июне выставка «3D-TECH – 2026» представит международную экспозицию производителей и поставщиков промышленного и профессионального 3D-оборудования, 3D-сканеров, программного обеспечения, материалов и услуг в сфере аддитивного производства, востребованных в машиностроении, авиационной и медицинской промышленности, приборостроении и других производственных отраслях. Среди компаний, подтвердивших свое участие в выставке «3D-TECH – 2026» — 3D LAM, 3DSL.A.ru, AM-TECH, Bambulab, Creality 3D, Globatek, Range Vision, REC, «ИНФАБ», «3D Вижн», LIDER-3D, «Диполь Технологии», «ИРЗ ТЕСТ», «Лазерные системы», «Лазеры и аппаратура», «ОНСИНТ», «Росатом Аддитивные технологии», «СИНКАМ», «Ф2 инновации» и другие.

Форум аддитивных технологий

Ключевым событием деловой программы «3D-TECH – 2026» станет Форум аддитивных технологий. Программа форума структурирована тематически: машиностроение и станкостроение, взаимодействие государства и производителей, внедрение технологий в промышленность, применение аддитивных технологий в медицине.

Совместное проведение «3D-TECH» с выставками Rosmould и Rosplast усиливает практическую ценность мероприятия, позволяя участникам рассматривать аддитивные технологии как часть единой производственной экосистемы.

Приглашаем посетить выставку «3D-TECH – 2026» специалистов, заинтересованных во внедрении современных производственных технологий: инженеров, конструкторов, технологов, руководителей предприятий и представителей научного сообщества.

Зарегистрироваться на выставку можно на сайте www.3dtech-expo.ru, бесплатный билет по промокоду **RM26-UENKV.**

3D-TECH

by rosmould

Международная специализированная выставка оборудования и материалов для аддитивного производства

От идеи
до готового
изделия

4

ТЕПЕРЬ ДНЯ!

16–19 июня 2026

МВЦ «Крокус Экспо»
Москва

РЕГИСТРАЦИЯ
ОТКРЫТА



Отсканируйте QR-код
для бесплатного билета

3dtech-expo.ru

 GEFERA MEDIA



**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

ОРГАНИЗАТОР ВЫСТАВКИ



Национальный союз производителей и поставщиков
оборудования и инструмента для металлообработки

СТАТЬ ЭКСПОНЕНТОМ



ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПАРТНЕР

РИТМ
МАШИНОСТРОЕНИЯ



ПРИ ПОДДЕРЖКЕ **РСПП**



NMF-EXPO.RU

nsh@nmf-expo.ru