

№3(10) • 2025 **АПГРЕЙД**

Аддитивное производство и цифровая трансформация в промышленности

В этом выпуске:

Хозяйка медной горы: как аддитивные технологии и лазеры осваивают медь

Аддитивные технологии и Металлообработка 2025: деловая активность и демонстрация силы

По следам микроскопического преступления: дедуктивный анализ катастрофы NASA

3D-печать в строительстве: верить ли красивым картинкам?

Интервью • Промышленная политика • Медь • Наука — интрига • Сертификация • БПЛА • Проектирование • Реинжиниринг • Люди слова и дела • Наболело! • База знаний

Редакция

Главный редактор:
Дмитрий Трубашевский, моб.: +7 (916) 950-21-89, e-mail: chief_editor@industry3d.ru

Шеф-редактор:
Светлана Бакарджиева, моб.: +7 (910) 938-25-50, e-mail: busido.63@mail.ru

По вопросам сотрудничества и рекламы пишите на info@industry3d.ru.

Распространение

Журнал «АПГрейд» выходит шесть раз в год в формате бесплатного цифрового издания.

Точность содержания

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

Условия размещения статей

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

Реклама

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

Воспроизведение, хранение и использование:

Допускается создание одной копии материалов исключительно для личного некоммерческого использования в соответствии с законодательством РФ об авторском праве. Все права защищены. Без письменного разрешения правообладателя запрещены любое воспроизведение, изменение, распространение или иное использование материалов, кроме прямо разрешенных случаев.

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

О чем наше издание

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

Целевая аудитория

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

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

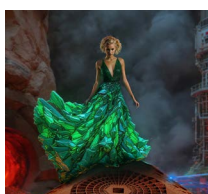
АПГрейд станет незаменимым источником знаний и вдохновения для всех, кто стремится быть на передовой технологического прогресса и использовать аддитивное производство для решения современных задач.

Основные темы

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

В номере:

Слово главного редактора.....	5
Аддитивные технологии и Металлообработка 2025: деловая активность и демонстрация силы.....	6
Тема номера: Хозяйка медной горы: как аддитивные технологии и лазеры осваивают медь	18
Как технологии 3D-печати меняют промышленность и почему это важно уже сегодня	40
Научный задел и рыночный передел	44
Быстрее, легче, эффективнее	52
DfAM — это не просто «напечатать деталь»	56
По следам микроскопического преступления: дедуктивный анализ катастрофы NASA.....	60
Двигатели для беспилотья: АП перехватывает инициативу	66
Не копии, а улучшенные версии	75
Наболело!.....	80
Магия тонких настроек	86
Люди слова и дела.....	90
ASTM представляет межотраслевую программу сертификации АТ	98
База знаний.	103



Коллаж на титульном листе создан с использованием нейросети.

Подписывайтесь на наши группы и каналы в соцсетях:

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



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

собственным экспертным мнением.

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

Подготовка статей, обзоров, интервью, освещение важных событий.

Гибкие тарифные планы по сотрудничеству в любом формате.

Пишите нам на info@industry3d.ru.

Читайте нас на industry3d.ru.





Медийная активность как диалог о безграничном

Трубашевский Дмитрий

Когда мы говорим «медийная активность», вы наверняка представите себе новостные ленты и соцсети. Но в этом номере мы переосмыслили этот термин, вплели в него игру слов: медь + активность. И это не случайно. Потому что сегодня именно медь — на острие технологической революции, а её освоение аддитивными методами стало символом дерзкого прорыва там, где ещё вчера царил консерватизм.

Интересно, что металл, известный тысячелетиями, веками служивший человечеству проводником и теплоотводом, вдруг стал «непокорным» для новых технологий. Его отражающая природа разбивала попытки печати инфракрасными лазерами, оставляя инженеров с несовершенными деталями. Казалось, сама Хозяйка Медной горы — та, что из уральских сказов, — бережно хранила свои секреты от непосвящённых.

Но прорыв случился. И ключом к нему стали лазеры видимого спектра — зелёные и синие. Их волшебство — в физике: если ИК-лазер поглощался медью лишь на 5%, то зелёный и синий подняли эту планку до 40–70%! Это не

«укрощение» меди, а диалог с ней. Диалог, который открыл двери к ранее невероятному: теплообменникам с фрактальными каналами, электродвигателям нового поколения с оптимизированными обмотками и интегрированным охлаждением, камерам сгорания для космоса из специально разработанных сплавов.

Рынок откликнулся мгновенно. Потребление меди в 3D-печати растёт лавинообразно: с 73 тонн в 2020 году до прогнозных 495 тонн к концу 2025-го. И это лишь начало. Ведь теперь мы создаём не просто детали, а шедевры инженерной мысли — как биметаллические конструкции с гарантированным сроком службы 30+ лет или алмазно-медные композиты с теплопроводностью 700 Вт/(м·К).

Но главное — меняется философия производства. Раньше мы спрашивали: «Как напечатать существующую деталь?» Теперь вопрос принципиально иной: «Как переизобрести её с нуля, используя свободу аддитивки?». Топологическая оптимизация, генеративное проектирование, гибридные материалы — вот инструменты этой революции. И медь, этот

«капризный» металл, ведёт нас вперёд, доказывая: нет задач, которые нельзя решить, если отбросить шаблоны.

Конечно, путь не устлан розами. Санкции, логистические разрывы, дефицит квалифицированных кадров — препоны отнимают много времени и сил. Но посмотрите на стенды российских аддитивщиков на «Металлообработке-2025»: Росатома, ЦАТ Ростеха, «Лазерных систем», i3D. Их разработки подтверждают: мы не догоняем, мы создаём свой путь.

Так что же такое «медийная активность» в 2025 году? Это гул лазеров, плавящих медь; это энергия инженеров, ломающих стереотипы; это уверенность, что будущее не где-то там — оно здесь, в наших цехах и КБ. Хозяйка Медной горы наконец открыла нам свои сокровища. И в этом — лучший ответ скептикам, которые твердят: «Работу работать надо, а не фантазировать».

Фантазируйте смелее. Внедряйте быстрее. И помните: медь — лишь первый шаг. Впереди — вся периодическая таблица Менделеева, ждущая своего часа. 

Прочти
меня на
сайте

Аддитивные технологии и Металлообработка 2025: деловая активность и демонстрация силы

Благодаря и вопреки, следуя магистральным путем мировых трендов и притормаживая на российских ухабах, отечественное аддитивное производство всё же год от года прибавляет в росте и весе на внутреннем рынке. Наглядным тому подтверждением стала аддитивная составляющая экспозиции прошедшей 26-29 мая в столичном Экспоцентре 25-ой юбилейной международной специализированной выставки «Оборудование, приборы и инструменты для металлообрабатывающей промышленности» «Металлообработка-2025». Образцы сложнейшей продукции для оборонки, машиностроения, энергетики, медицины соседствовали на стендах лидеров российской аддитивки с оборудованием, на котором они были изготовлены. Причем, ряд компаний демонстрировали свои машины в деле – посетители стендов могли наблюдать, как печатаются компоненты ответственных узлов и готовые изделия и обсудить со специалистами компаний нюансы технологий и возможности оборудования.

Отечественная аддитивка в последние годы настолько окрепла и возмужала, что даже переросла заданные ей показатели в утвержденной в 2021 году стратегии

развития этой сферы. С констатации этого вдохновляющего факта начал свое выступление на состоявшейся в рамках деловой программы выставки панельной сессии

«Аддитивные технологии: трансформация производственных процессов через инновации, стабильность и конкурентоспособность в эпоху цифровизации» за-



меститель директора департамента станкостроения и тяжелого машиностроения Минпромторга России Юрий Кузнецов. Он рассказал, что в Минпромторге подготовили актуализированный текст стратегии. Он теперь охватывает все предприятия и отрасли, в нем представлены ключевые направления, связанные с наукоёмкими производствами, а не только с инвестиционными технологиями. Новая версия стратегии была разослана крупнейшим отечественным производителям оборудования, материалов и софта, а также в ведущие профильные вузы для обсуждения и внесения предложений и замечаний. Таким образом обновленная стратегия должна стать плодом коллективного труда с

активным участием аддитивного сообщества.

Конечно, самая ожидаемая аудиторией тема в выступлениях ответственных работников органов исполнительной власти — это меры государственной поддержки конкретной сферы. Спикер отметил, что объемы финансирования аддитивки в последние годы позволяют ставить перед этой сферой амбициозные цели. Мерами поддержки НИОКР и создания нового оборудования охвачены проекты любого масштаба — от небольших стартапов и микроколлективов до крупных госкорпораций с многомиллиардными программами. В прошлом году Минпромторг совместно с Фондом содействия инновациям запустил отраслевую программу «Старт» для

начинающих разработчиков. Участники проекта — компании, коллективы разработчиков или даже частные лица — могут получить грант в объеме до 5 млн рублей без необходимости софинансирования. Главное условие — по итогам проекта должен быть создан прототип или оформлены результаты интеллектуальной деятельности. Это «посевная» стадия, позволяющая проверить идеи на практике. Следующий этап — для более зрелых разработок. Если проект показывает потенциал для коммерциализации, его разработчики могут претендовать на грант до 30 млн рублей, но уже с частичным софинансированием по программе «Развитие». Для эксклюзивных решений (например, штучное оборудо-



3D-принтер RusMelt 600M Топливного дивизиона «Росатома». Фото: «Компьютерра»

дование, которое производится раз в несколько лет) предусмотрены точечные субсидии заказчикам. Крупные предприятия или госкорпорации могут получить финансирование на разработку, собрав под проект цепочку исполнителей — от научных институтов до производственных компаний.

Развивается инфраструктура поддержки. Основным оператором здесь выступает Фонд развития промышленности (ФРП). Он предоставляет льготные займы на приобретение оборудования: 3–5% годовых в зависимости от происхождения техники (ниже — для российского, выше — для импортного).

Но главное новшество — программа «Списываемые займы». Если предприятие берет кредит, закупает и вводит оборудование в эксплуатацию, то после завершения инвестиционной фазы может обратиться в Минпромторг и получить субсидию до 100% основного долга. Фактически это полная компенсация капитальных затрат для критически важных производств.

Самым популярным инструментом стимулирования спроса остается компенсация скидки. Он работает с 2021 года и уже доказал эффективность. Этот механизм выравнивает конкуренцию с ино-

странными аналогами. Некоторые компании даже используют его для выхода на внешние рынки — программа распространяется и на экспортные контракты.

При этом надо понимать, что гранты и субсидии и другие меры поддержки от государства — это вовсе не раздача благотворительных «плюшек». К примеру, многие конкурентные преимущества и льготы получают компании, чья продукция официально признана отечественной и внесена в соответствующий реестр Минпромторга РФ. Однако порог входа туда регулярно повышается. И в этом году после внесения дополнений в постановление Правительства РФ № 719 ощутимо ужесточились требования к подтверждению производства российской промышленности

продукции. Изменения затронули и аддитивную сферу: если до их внесения в соответствующем реестре числились 23 аддитивные установки, имеющие заключение о подтверждении российского производства, то на сегодняшний момент под уточненные критерии подпали всего 4 машины.

Еще пример: для компаний, вышедших на рынок, предусмотрена компенсация до 70% затрат на НИОКР. Условие простое: на каждый рубль субсидии нужно продать оборудования на два рубля. Например, при поддержке в 100 млн рублей необходимо обеспечить продажи на 200 млн. То есть, разработка должна быть реально конкурентоспособной, ее воплощение — качественным, а маркетинговая политика производителя новинки — эффективной.



Акцент на отечественный суверенитет в новационных технологиях инжиниринга – почетная миссия АО «ЦАТ». Фото: АО «Центр аддитивных технологий»

Много ли отечественных компаний из аддитивки сегодня успешно сочетают в себе всё вышеперечисленное? Давайте честно: пока – не очень. Преимущество здесь имеют не просто крупные игроки, а те, кто обладает широким спектром технологий и штатом высококвалифицированных конструкторов и технологов, осуществляет полный производственный цикл от проектирования до финальной обработки деталей и способен обеспечить контрагентам единое окно обслуживания и комплексный подход к решению задач. Кто у нас в этом топе? Госкорпорации Ростех и Росатом, лучшие ЦАТы и весьма ограниченное количество ведущих частных компаний. В числе спикеров панельной сессии были представители руководства ряда таких компаний.

Одним из самых внушительных и активно посещаемых на «Металлообработке» был стенд компании «Росатом Аддитивные технологии». «РосАТ на выставке показал самый большой выпускаемый серийно в России 3D-принтер для SLM-печати различными металлами: титаном, алюминием, нержавеющей сталью, жаропрочными сплавами. Прежде такое оборудование крупногабаритного класса в России не производилось. Размеры области печати

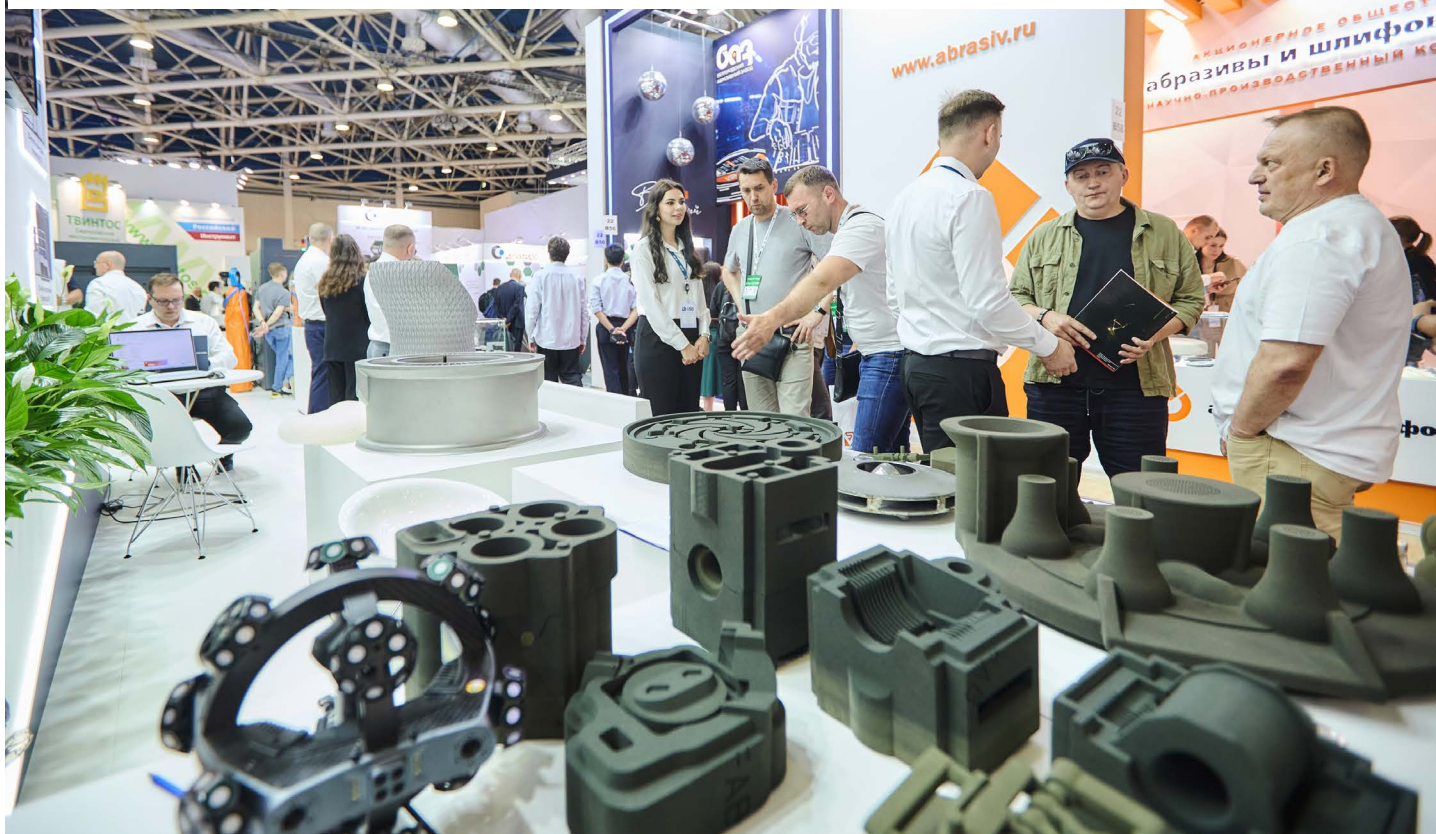
3D-принтера RusMelt 600M — 600×600×600 мм, а максимальная скорость печати — 60 см³/ч. Установка RusMelt 600M позволяет изготавливать металлические детали сложной геометрии с высокой точностью без использования оснастки при очень высоком коэффициенте использования материала. В выступлении на панельной сессии генеральный директор «РосАТ» Илья Кавелашвили рассказал и о других крупнейших проектах компании – напечатанных элементах, которые используются непосредственно внутри реактора (срок их службы — от 5 до 60 лет). Сейчас на стадии запуска — изготовленная методом 3D-печати выгородка диаметром 4,5 м, это совместный проект с Курчатовским институтом. И второй элемент – антидебризный фильтр нового поколения для атомных станций. «Важно отметить, — подчеркнул спикер, — мы не просто печатаем существующие детали, а полностью перерабатываем их конструкцию с учётом возможностей аддитивных технологий. Это повышает эксплуатационные характеристики, надёжность и функциональность изделий. Подобные решения уже применяются в атомной энергетике Пакистана, Индии, Южной Кореи и Франции». В этом году компания также запускает проект по

печати элементов корпуса реактора малой мощности. Это принципиально новый подход, позволяющий расширить сферу применения малых АЭС.

Не ограничиваясь использованием аддитивных технологий в собственном производстве, РосАТ нацелился на создание полной линейки оборудования для 3D-печати. Разработки компании включают металлическую порошковую 3D-печать и печать проволокой.

ЦАТ Ростеха в силу известных для компаний из сферы ОПК ограничений не мог продемонстрировать на своем стенде свои самые знаковые достижения, но на панельной сессии генеральный директор АО «ЦАТ» Алексей Мазалов рассказал о некоторых из них. ЦАТ производит широкий ассортимент изделий с использованием основных аддитивных технологий: селективное лазерное плавление (L-PBF), селективное лазерное спекание (SLS), прямое лазерное выращивание (DED) и стереолитографию (SLA). Компоненты авиадвигателя ПД-8, который сейчас проходит стадию активных испытаний, элементы корпуса малого космического аппарата, жаровая труба для газотурбинного двигателя — вот лишь несколько самых ярких примеров успешных проектов ЦАТа, реализованных за последние полтора

Песчаные литейные формы неизменно привлекают к себе внимание посетителей на всех отраслевых выставках. Фото: ООО «НПО «3Д-Интеграция»



года. Будучи научно-исследовательской компанией с собственным конструкторским бюро, ЦАТ активно развивает инжиниринговое направление. Заметным и по нынешним временам очень актуальным достижением для компании стал проект в области реверс-инжиниринга — воссоздание конструкции двух малогабаритных поршневых двигателей внутреннего сгорания для беспилотных летательных аппаратов – в 55 лошадиных сил и 130 лошадиных сил китайского производства. По результатам комплексного анализа исходных изделий изготовили опытные образцы, которые превосходили характеристики оригинальной конструкции на 5% по

ключевым параметрам. Последние штрихи перед переходом к пилотной партии и последующему серийному производству – работа над снижением себестоимости этих изделий. Учитывая недавнее решение президента РФ о том, что в России будут созданы как отдельный род войск Войска беспилотных систем, надо думать, спрос на новые двигатели будет стабильно высоким.

Владение основными аддитивными технологиями и способность обеспечить комплекс инжиниринговых и сервисных услуг – это сегодня пропуск в высшую лигу отечественной аддитивки. «Группа компаний i3D», прочно обосновавшаяся в ней уже с первых лет

своей деятельности, заметно упрочила свои позиции в прошлом году, выведя на рынок первую машину из разрабатываемой компанией «НПО «3Д-Интеграция» линейки промышленных 3D-принтеров по технологии L-PBF – малогабаритный однолазерный аддитивный комплекс AMT-16. На «Металлообработке 2025» на стенде группы компаний рядом с работающим AMT-16 демонстрировался результат второго этапа проекта — среднегабаритный двухлазерный аддитивный комплекс AMT-32 с габаритами рабочей области не менее 320×320×400 мм. Однако на панельной сессии «Группа компаний i3D», которую на ней представлял

генеральный директор ООО «Ай 3Д» Алексей Ембулаев, сосредоточила внимание на других направлениях. В своем докладе Ембулаев основной акцент сделал на инновационных решениях, обеспечивающих стабильность и конкурентоспособность предприятий. Компания i3D позиционируется как интегратор передовых аддитивных технологий, в том числе SLS, SLM, DLP, SLA, MBJ, BJ и других, предлагая широкий спектр возможностей для различных отраслей промышленности, включая аэрокосмическую, автомобильную, медицинскую и энергетическую сферы. При этом спикер наиболее подробно представил технологии VEAM и WAAM, сочетающие высокую точность, эффективность и низкую стоимость производства. Бесспорные преимущества VEAM — автоматическая регулировка лазеров, управление распределением энергии и возможность печати сложных геометрических форм без поддержек. У «Ай 3Д» есть собственный опыт изготовления конкретных изделий по этой технологии: это решетчатые рули, корпуса часов и лопасти, демонстрирующие универсальность и практическую применимость технологий в реальных условиях.

Еще одна перспективная технология, ныне активно продвигаемая «Группой ком-

паний i3D», — керамическая 3D-печать (Ceramic Binder Jetting). Её используют как вариант замены металлов в производстве, когда требуется высокая прочность изделия при его меньшем весе. Это может быть в том числе мелкосерийное производство сложных деталей для аэрокосмической отрасли. Она особенно хороша для производства рефлекторных зеркал и других высокотехнологичных компонентов. Ключевые преимущества карбида кремния — термостойкость, химическая инертность и высокая теплопроводность — делают его идеальным материалом для работы в агрессивных средах, например, в солнечной энергетике. На внутреннем рынке хорошо известна поставляемая под маркой AM.TECH линейка 3D-устройств для работы с керамикой, включающая пять машин различной конфигурации для исследований и производства. «Группа компаний i3D» и компания SIU System — одни из многих российских игроков, успешно работающих с Ceramic Binder Jetting.

Говоря о несомненных достижениях отечественной аддитивки в области крупногабаритного АП, нельзя не признать ведущей роли в этом петербургских научных и производственных центров. Центральной темой доклада ректора Санкт-Пе-

тербургского государственного морского технического университета и директора Института лазерных и сварочных технологий (ИЛИСТ) Глеба Туричина стало уникальное позиционирование российских разработчиков в нише крупногабаритных изделий от 60 см и более — сегменте, недоступном для стандартных SLM-установок. Примечательно, что в то время, как западные рынки демонстрируют замедление темпов развития лазерных технологий, в России наблюдается обратная тенденция. Наши специалисты добились значительного прогресса в двух ключевых направлениях: технологии прямого лазерного выращивания (DED) и электронно-лучевой наплавки (EBAM). Причем, как подчеркнул Туричин, эти направления развиваются по разным сценариям: если первое растет за счет производства оборудования, то второе — благодаря заказам на конкретные изделия.

Рассказывая о применяемых технологиях, Глеб Андреевич делал акцент на их проблемных сторонах. Особый интерес вызвал разбор пространственных заблуждений о WAAM-технологиях. Докладчик развеял миф о простоте этих решений, продемонстрировав, что реальные производственные процессы значительно сложнее, а получаемые заготовки зачастую

на 50% массивнее конечных изделий. Однако, по словам ректора СПбГМТУ, эти технологические вызовы не должны становиться препятствием для развития сферы АП — их преодоление требует сочетания инженерной смелости и высокой квалификации специалистов.

Образцом этого сочетания стала представленная в докладе инновационная отечественная разработка — метод наплавки трением с перемешиванием (Friction Stir Deposition). Созданная по заказу Росатома для производства биметаллических конструкций, эта технология решает задачи,

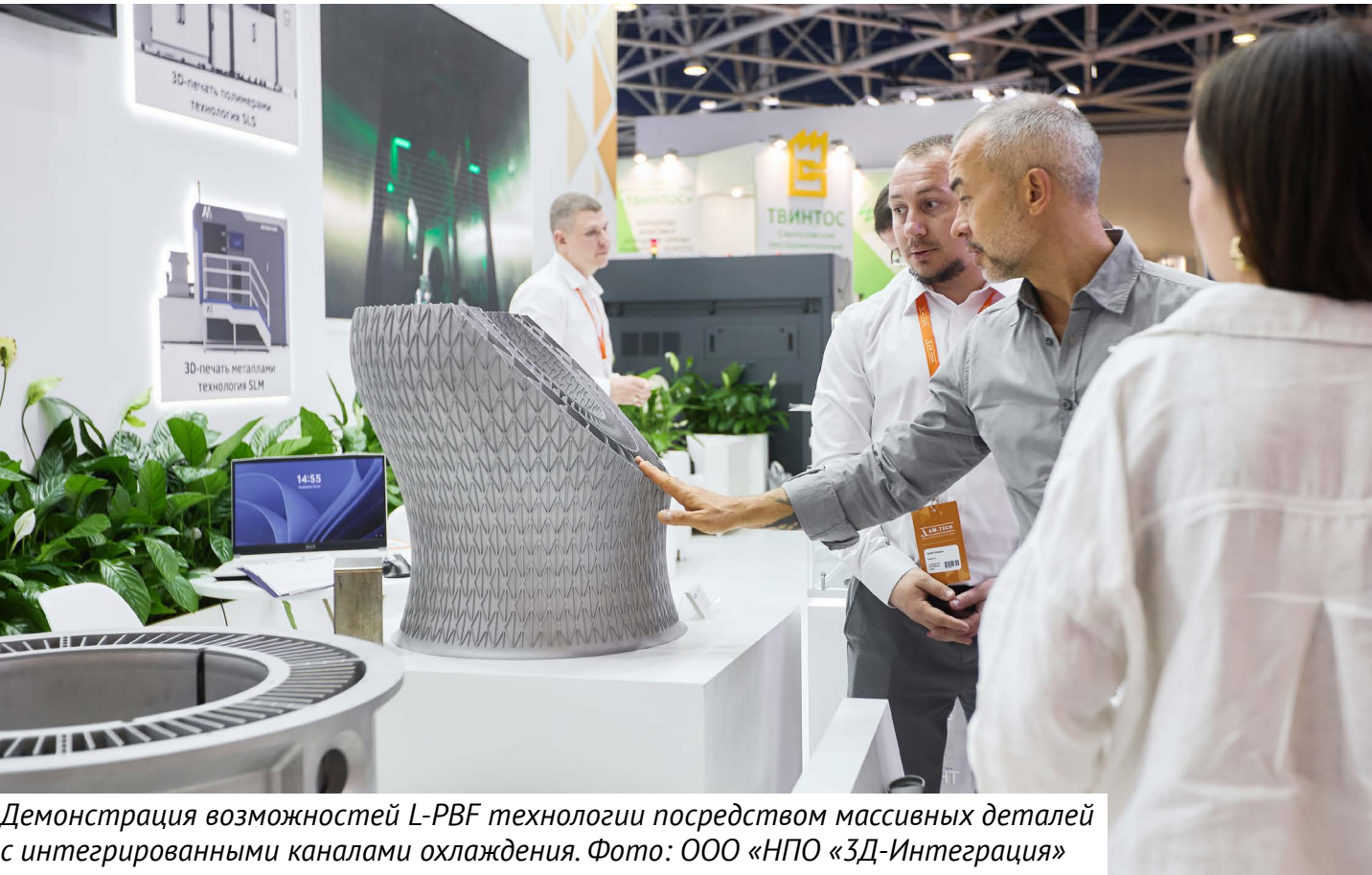
недоступные традиционным методам. Уникальная установка позволяет создавать сверхпрочные сталь-алюминиевые соединения с гарантированным сроком службы более 30 лет — решение, не имеющее на сегодня аналогов в мире.

Однако, как справедливо отметил Глеб Туричин, технологические успехи на пути к коммерциализации сталкиваются с серьезными экономическими вызовами. Производство даже одной 9,5-тонной конструкции остается чрезвычайно затратным процессом. Хотя цены на металлические порошки за три года снизились

на 40%, это не привело к пропорциональному удешевлению конечной продукции. Критическим ограничением остается и производительность оборудования при работе с массивными изделиями. Ответом на эти вызовы стали разработки университета, позволившие в шесть раз увеличить производительность установок — до рекордных 5 кг/ч. Внедрение модернизированных наплавочных головок с инновационной системой позиционирования уже дало впечатляющий результат — себестоимость производства 9,5-тонных конструкций сократилась вдвое.



Однолазерный аддитивный комплекс AMT-16 – очередной российский продукт и гордость «НПО «3Д-Интеграция». Фото: ООО «НПО «3Д-Интеграция»



Демонстрация возможностей L-PBF технологии посредством массивных деталей с интегрированными каналами охлаждения. Фото: ООО «НПО «3Д-Интеграция»

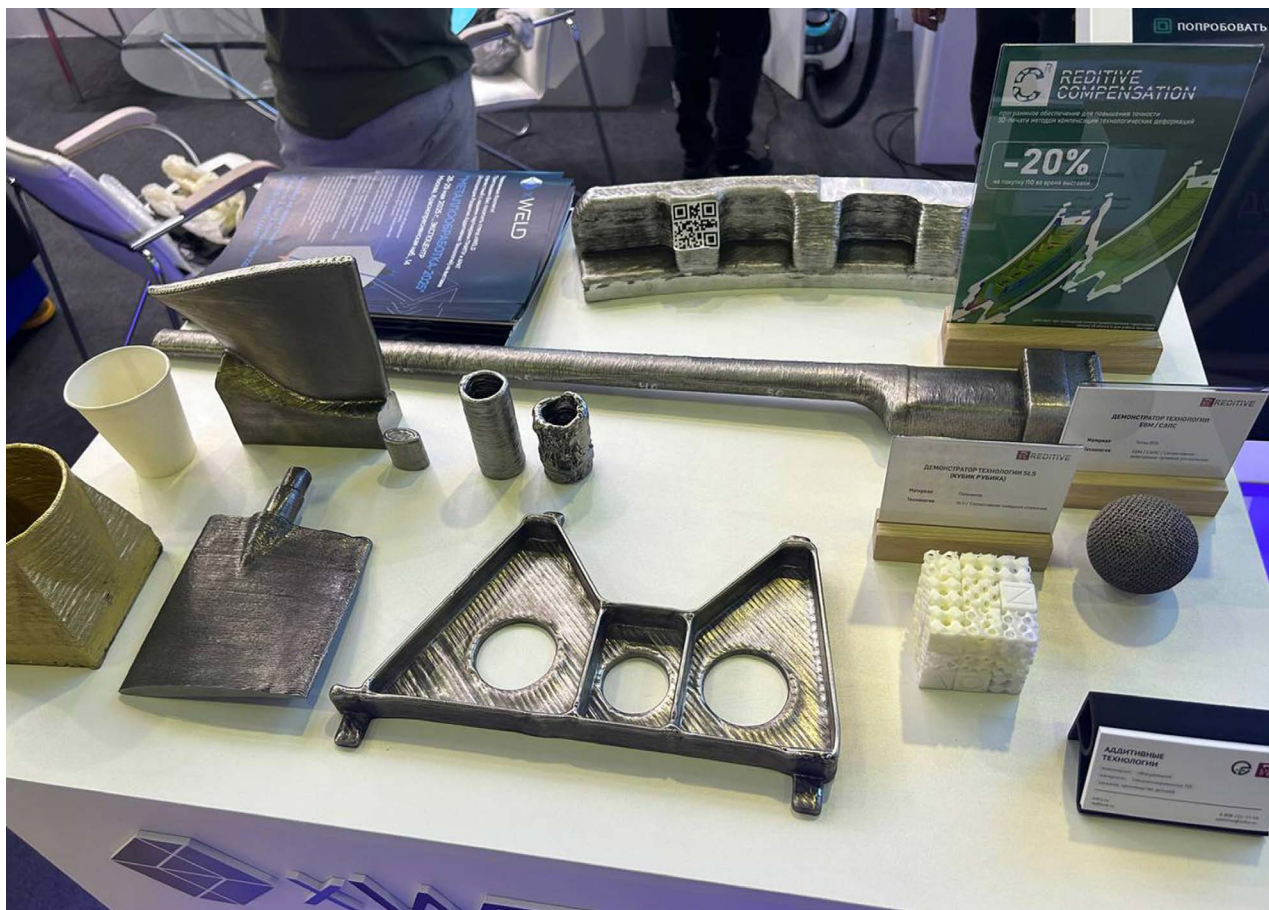
Представленные разработки уже сегодня находят практическое применение в таких стратегически важных отраслях, как атомная промышленность и ракетостроение.

В то время как ректор СПбГМТУ и директор ИЛИСТ зачитывал свой доклад, на стенде Корабелки представляли роботизированную установку прямого лазерного выращивания «ИЛИСТ-XL» и образцы изделий, полученные с помощью технологий дугового выращивания, лазерной и лазерно-дуговой сварки. А также демонстрировали свое оборудование в работе — выращивали впечатляющую камеру сгорания ЖРД.

Еще один флагман петербургской аддитивки, АО «Лазерные системы», — постоянный участник выставок «Металлообработка». На сей раз в центре внимания посетителей была новейшая разработка компании — промышленная установка селективного лазерного сплавления М-450-L. Это уникальное оборудование для печати крупногабаритных деталей из металл-порошковых композиций, открывающее новые возможности для развития аддитивных технологий в России. Его тоже можно было увидеть в деле: «Лазерные системы» на стенде демонстрировали печать одной детали на установке 500×500×500 мм четырь-

мя лазерами. Стенд компании посетила делегация Минпромторга РФ во главе с министром промышленности и торговли РФ Антоном Алихановым. Генеральный директор Дмитрий Васильев провел презентацию установки М-450-L, подробно рассказав о ее технических характеристиках и перспективных возможностях применения.

Какой отечественный изготовитель оборудования для 3D-печати поставщик услуг аддитивки не мечтает о крупных заказах? Например, оснастить аддитивную ферму, специализированный участок промышленного гиганта, или заключить с ним же контракт на печать крупной партии изделий.



Детали, выращенные с помощью технологий проволоочной наплавки. Фото: ООО «ИксВелд»

Однако сегодня всё активнее внедряют у себя АП компании из сегмента малого и среднего бизнеса. И их действительно не стоит недооценивать: и с единственного и самого простого принтера может начинаться будущий революционный мега-проект. Или, как минимум, дерзкий креативный стартап с мощным потенциалом. ЗАО «Биоград» (торговая марка 3DLAM) сделали акцент на работе с такими клиентами — и не прогадали. Руководитель направления аддитивных технологий «Биограда» Николай Дробченко рассказал о подходах своей компании к ведению бизнеса с МСБ. Эти клиенты часто не имеют опыта работы с адди-

тивными технологиями. При этом они — жесткие прагматики, тщательно считают деньги и требуют четких экономических обоснований внедрения АП. Компания разработала специальный алгоритм взаимодействия с клиентами: от технологического аудита предприятия и анализа номенклатуры изделий на пригодность для аддитивного производства до сравнения стоимости с традиционными методами производства и выделения изделий, требующих топологической оптимизации. Клиентам предлагается не просто продажа оборудования, а комплексные решения — либо контрактное производство, либо полный

цикл «машина плюс обучение».

Особенно ценит средний бизнес решения в области реверс-инжиниринга. В условиях санкций и проблем с поставками запчастей этот подход становится настоящим спасением для промышленных предприятий.

Компания также впечатлила масштабами роста: всего за год она увеличила парк оборудования с 4 до 10 машин и открывает уже второй цех контрактного производства. Их новая разработка — 3DLAM Mega — привлекла внимание многих участников выставки.

Побывав на стендах ведущих игроков российского рынка АП и послушав



На стенде ООО «ОНСИИТ» представлены 3D-принтеры по технологиям PBF: SLS и L-PBF/SLM. Фото: ООО «ОНСИИТ»

рассказы спикеров об их масштабных проектах и амбициозных планах, закономерно вновь задаешься наболевшим вопросом. А именно: если всё так хорошо, если есть необходимые знания и опыт и имеется доступ к ресурсам, почему аддитивка в России до сих пор не достигла точки бифуркации с последующим преобразованием из чего-то нишевого и экспериментального массовому производителю в признанный и востребованный инструмент повышения эффективности производства? Отвечая на этот вопрос, сами аддитивщики выделяют три основных барьера, препятствующие широкому внедрению АП: высокая стоимость, длительные сроки реализации и технологическая слож-

ность. При этом практика показывает, что для единичного производства и прототипирования аддитивные методы часто оказываются оптимальным решением.

На панельной сессии были также самокритично обозначены следующие болевые точки. Во-первых, сохраняется проблема по-

верхностного копирования технологий без должной адаптации и развития. Во-вторых, остро стоит вопрос качества сервисного обслуживания, которое пока не соответствует промышленным стандартам. В-третьих, в погоне за количеством многие производители жертвуют качеством



На стенде АО «Лазерные системы». На заднем фоне — флагман компании — установка М-450-Л. Фото: АО «Лазерные системы»

продукции. И наконец, процессы локализации требуют более взвешенного подхода при сохранении высоких стандартов.

Словом, отечественной аддитивке, что называется, есть, куда расти. При том, что многие делают ставку на высокотехнологичные применения в авиации или ядерной энергетике, огромный потенциал остается нереализованным в массовых производствах. Яркий пример — рынок оснастки объемом 100+ миллиардов рублей, где аддитивные технологии пока занимают лишь небольшую долю.

Также предлагалось создание цифрового каталога проверенных деталей, который может стать мостом между технологическими возможностями и практическими нуждами промышленности. Этот подход особенно актуален в условиях современных логистических ограничений.

Как справедливо отметили участники, аддитивные технологии — это не просто модный тренд, а реальный инструмент трансформации производства. Но для его полноценного внедрения необходимо комплексное решение четырех задач: активная популяризация технологий, улучшение сервисной поддержки, создание удобных бизнес-решений и разви-

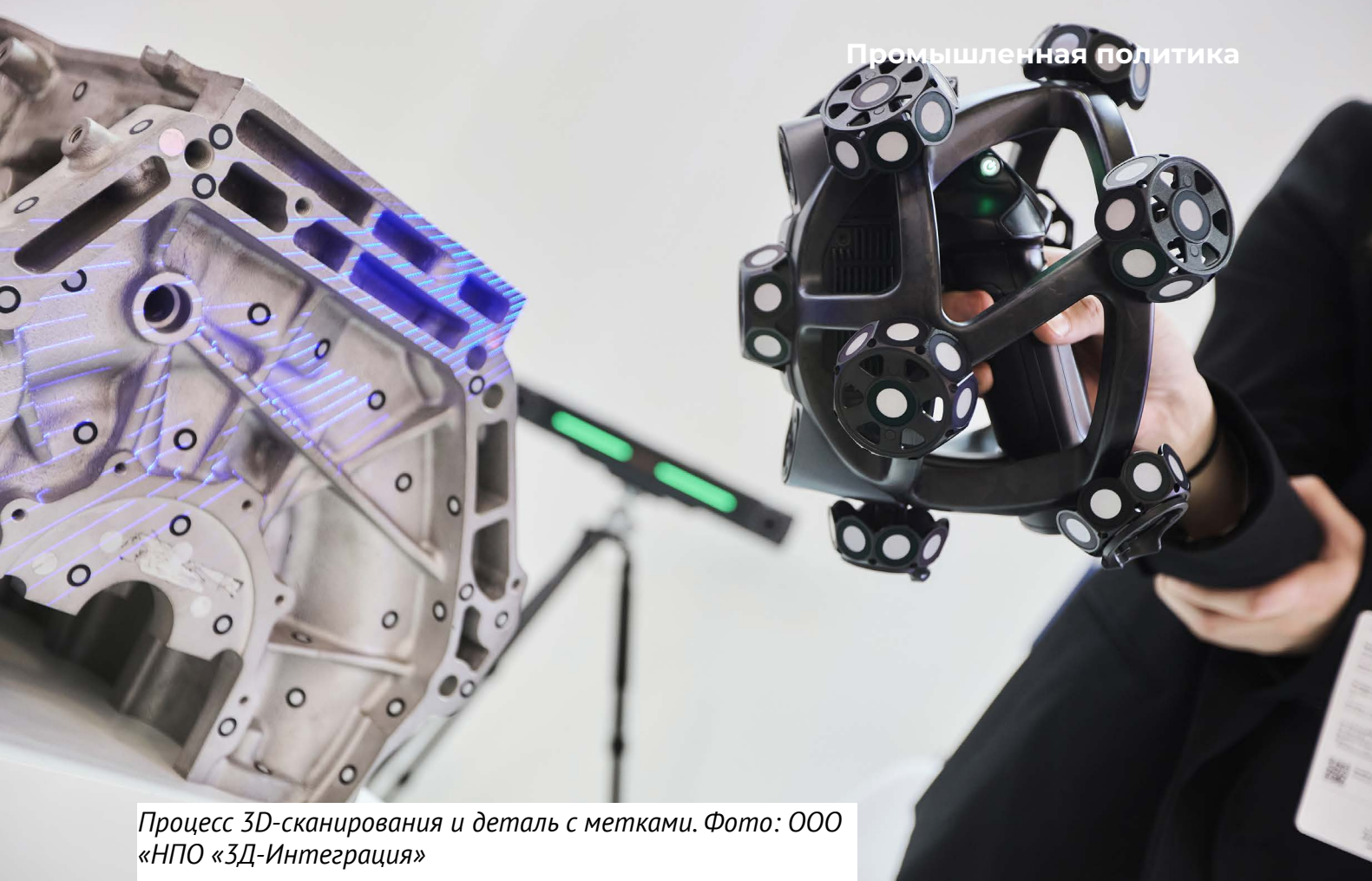
тие профильных образовательных программ.

Подготовка кадров для АП — отдельная непростая тема. Если несколько лет назад основным препятствием продвижения аддитивных технологий был консерватизм технологов, то сегодня ситуация меняется благодаря притоку молодых специалистов, знакомых с аддитивными технологиями еще со студенческой скамьи. Их знания в области CAD-систем и цифрового проектирования помогают переосмыслить традиционные производственные процес-

сы. Они готовы стать драйверами изменений на предприятиях, но им приходится преодолевать сопротивление устоявшихся систем и консерватизм старших поколений управленцев. Ведь решение о внедрении АП и масштабах его использования принимает топ-менеджмент компаний, главные конструкторы и технологи, и именно их нужно обучать в первую очередь. Передовые компании, в том числе ЦАТ Ростеха, Группа компаний I3D, ЗАО «Биоград», ведут эту работу для своих клиентов. Создаются курсы



Демонстрация опыта компаний на стендах часто сопровождается обилием успешно реализованных проектов. Фото: АО «Лазерные системы»



Процесс 3D-сканирования и деталь с метками. Фото: ООО «НПО «3Д-Интеграция»

разного уровня — от базовых, доступных широкому кругу сотрудников, до углубленных программ с практическим обучением на производственных площадках. Однако всё это должно стать системной инициативой в масштабах отрасли.

Помимо технических навыков, важно формировать у специалистов понимание экономической целесообразности аддитивного производства. Многие предприятия, особенно средний и малый бизнес, тщательно оценивают затраты и выгоды перед внедрением новых решений. Образовательные инициативы помогают им увидеть потенциал технологий не только в создании прототипов, но и

в серийном производстве, реверс-инжиниринге и оптимизации конструкций.

Еще одним направлением является популяризация аддитивных технологий среди студентов и молодых инженеров. Несмотря на растущий интерес, многие до сих пор слабо представляют возможности 3D-печати и ее применение в промышленности. Компании активно участвуют в выставках, организуют мастер-классы и сотрудничают с вузами, чтобы вдохновить новое поколение на работу в этой сфере.

Образование — это не просто обучение навыкам, а создание экосистемы, где технологии, кадры и бизнес-задачи взаимно дополняют друг друга. Только так

можно обеспечить устойчивое развитие отрасли и реализовать ее потенциал в полной мере.

В целом выставка «Металлообработка 2025» показала: несмотря на имеющиеся вызовы, российская сфера аддитивных технологий демонстрирует зрелость в осознании своих проблем и готова к их системному решению.



Светлана Бакарджиева

Хозяйка медной горы: как аддитивные технологии и лазеры осваивают медь



Прочти
меня на
сайте

Название «Хозяйка медной горы» — не просто красивая метафора, а глубокий символ, связывающий прошлое, настоящее и будущее одного из древнейших спутников человечества — меди. Оно отсылает нас к мудрым уральским сказам Павла Бажова, где могущественная дух-покровительница недр бережно хранит свои сокровища — малахит и медь — открывая их лишь тем, кто уважает камень и металл, обладает смелостью и мастерством.





Введение

Мы выбрали это название потому, что медь — гораздо больше, чем просто один из ресурсов. Это почти одушевленная стихия со своим непростым «характером» и «капризами». Веками ее уникальные свойства — непревзойденная электропроводность и теплопроводность — определяли ее применение. Однако в эпоху аддитивных технологий медь долго оставалась «непокорной». Традиционные методы, такие как использование ИК-лазеров, разбивались о ее отражающую природу, словно сама Хозяйка Медной горы скрывала свои истинные возможности от непосвященных. Казалось, вековые преимущества металла стали его проклятием в мире 3D-печати, оставляя инженеров с несовершенными деталями.

Эта статья — рассказ о том, как ученые и инженеры нашли «волшебный ключ» к ее сокровищнице: лазеры видимого спектра — зеленые и синие. Они стали прорывом, позволившим не «укротить», а вступить в диалог с могущественной Хозяйкой, понять и принять ее природу. Благодаря им медь раскрыла прежде недоступный потенциал. Сегодня мы создаем невероятно сложные конструкции, о которых раньше лишь мечтали: от микроскопических теплоотводов с идеальной геометрией до моноблочных камер сгорания для космоса, работающих в экстремальных условиях.

Но суть названия глубже. Это не история покорения, а история сотрудничества. Успех пришел через глубокое уважение к материалу, понимание его физики и разработку технологий, которые работают с медью, а не против нее. Известный издревле металл, верный спутник цивилизации, обретает новую жизнь в самых передовых сферах и продуктах, как наземных, так и космических, становясь символом технологического возрождения.

Сегодня аддитивное производство меди переживает настоящий бум. Высокотехно-

логичные отрасли радикально переосмысливают проектирование и производство. Там, где раньше требовались десятки деталей, теперь печатают единые оптимизированные конструкции. Там, где инженерная мысль упиралась в жесткие ограничения, открывается простор для инноваций.

В этом увлекательном путешествии по миру современных медных технологий вы узнаете:

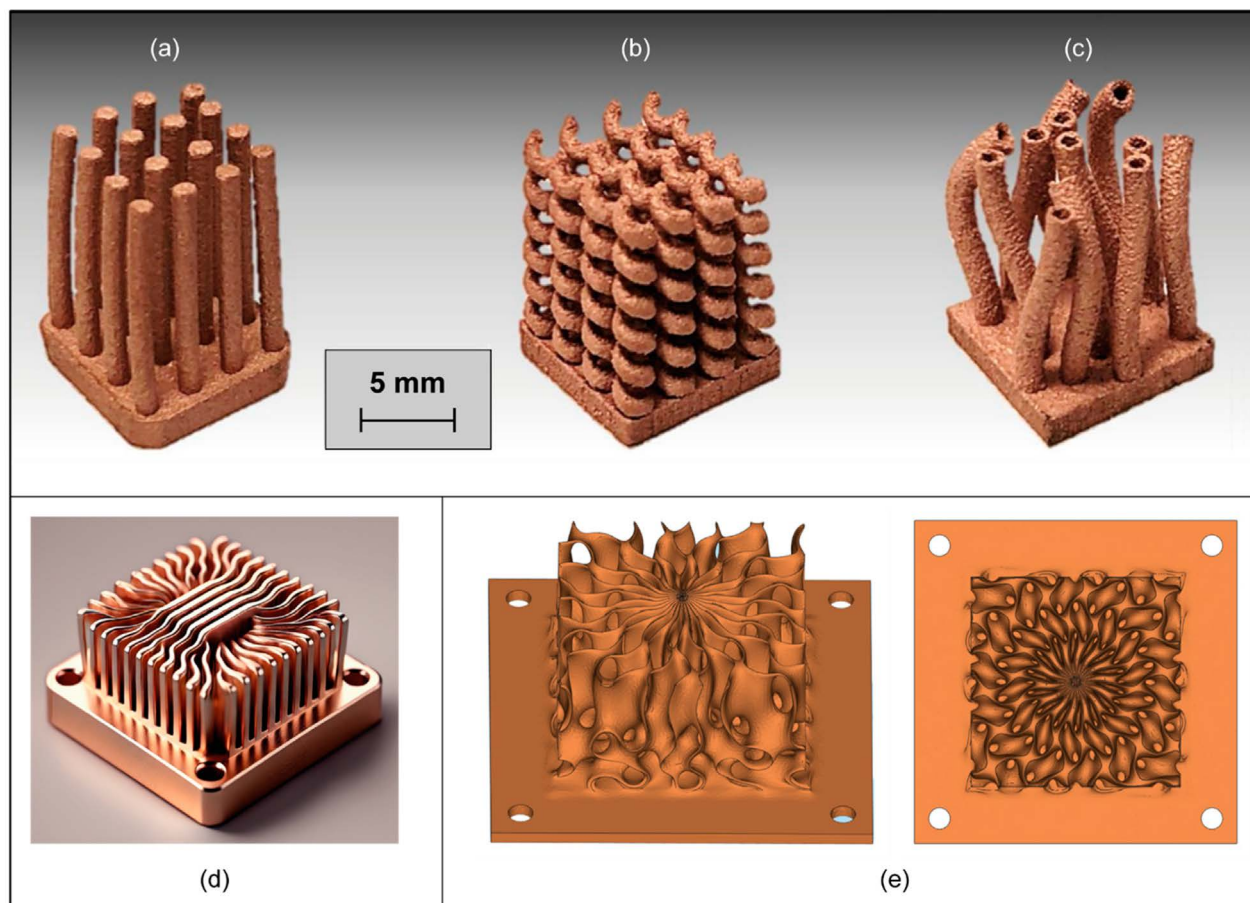
- Как инженеры нашли способ «договориться» с капризной природой металла;
- Какие революционные возможности открывает 3D-печать меди в различных отраслях;
- Почему именно сейчас происходит переломный момент для аддитивного производства;
- Какие невероятные перспективы ждут эту технологию в ближайшем будущем.

Это история не только о лазерах и принтерах, но и о людях, которые, преодолевая казавшиеся непреодолимыми барьеры, создают будущее уже сегодня.

Медь в аддитивном производстве: рынок, сферы применения и технологический прорыв

Рынок аддитивного производства меди переживает экспоненциальный рост. Согласно исследованиям AMPOWER, потребление медного и бронзового материала в 3D-печати составило 73 тонны в 2020 году, а к концу 2025 года прогнозируется скачок до 495 тонн — почти семикратное увеличение за пятилетний период. Этот взрывной рост обусловлен уникальными преимуществами аддитивных технологий при работе с медью, включая возможность создания сложных геометрических форм, недостижимых традиционными методами, сокращение материальных отходов и ускорение цикла прототипирования.

Ключевые секторы внедрения медной 3D-печати сфокусированы на трех стратеги-



Примеры различных элементов медных радиаторов, в том числе разработанных с помощью топологической (фрактальной) оптимизации, и изготовленных по технологии L-PBF (Constantin et al., 2020, Addit. Manuf., 35, 101268)

ческих направлениях:

1. В электродвигателях аддитивные технологии позволяют изготавливать оптимизированные обмотки со встроенными системами охлаждения, повышающие эффективность энергопередачи.

2. Теплопроводящие элементы, такие как микрорадиаторы и теплообменники с фрактальной геометрией каналов, демонстрируют на 25-40% лучшую теплопередачу благодаря свободе проектирования для аддитивного производства.

3. Аэрокосмическая отрасль использует 3D-печатные медные компоненты, (особенно сплавы GRCop), в камерах сгорания ракетных двигателей и системах терморегулирования, где критичны сочетание теплопроводности и жаропрочности.

Традиционные сферы применения меди продолжают оставаться основой её промышленного значения. В электротехнике

медь сохраняет статус незаменимого материала для производства проводов, печатных плат, трансформаторов и электродвигателей благодаря своей рекордной электропроводности (58-59 МСм/м). В теплообменных системах её используют при изготовлении радиаторов, трубопроводов HVAC (от англ. Heating, Ventilation and Air Conditioning — это специализированные трубные системы, используемые в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) и микромодулей охлаждения, где решающее значение имеет исключительная теплопроводность (401 Вт/(м·К)). В машиностроении медные сплавы находят применение в подшипниках, направляющих и износостойких элементах транспортных систем, тогда как энергетическая отрасль использует их в силовых кабелях и фотоэлектрических установках. Эти традиционные направления применения,

усиленные возможностями аддитивных технологий, создают мощный синергетический эффект, открывающий новый этап промышленной революции.

Материалы для аддитивного производства меди разделяются на два ключевых типа. Чистая медь (99,9% Cu) обладает рекордной электропроводностью (58–59 МСм/м), однако её обработка традиционными методами затруднена из-за крайне высокой отражательной способности в инфракрасном диапазоне.

Как подчеркивает эксперт Константин Бабкин из Института лазерных и сварочных технологий СПбГМТ, «для сравнения электропроводности материалов используют международный стандарт IACS (от англ. International Annealed Copper Standard), где 100% соответствует проводимости отожжённой меди. Например, специализированный сплав БрХЦр (CuCrZr), содержащий 99% меди, 1% хрома и циркония, демонстрирует проводимость не менее 86% IACS. Его теплопроводность составляет ~330 Вт/(м·К) против 401 Вт/(м·К) у чистой меди, термостойкость достигает 400°C, а предел прочности — 450 МПа, при этом сохраняя технологичность обработки.

Сплав БрХЦр широко применяется в теплообменниках и электротехнических ком-

понентах, тогда как чистая медь остаётся незаменимой для сверхнагруженных элементов: обмоток с высокой плотностью тока и критических узлов теплоотвода. Хотя свойства сплава несколько уступают чистой меди (электропроводность ниже на 14 процентных пунктов по IACS), его преимущества — возможность повторного использования порошка, совместимость со стандартным оборудованием и высокая производительность. Ключевой момент — обязательная термическая обработка готовых изделий».

Для экстремальных условий, особенно в аэрокосмической отрасли, сплавы GRCop-42/84 (Cu-Cr-Nb), разработанные NASA, демонстрируют исключительные свойства: теплопроводность 300–320 Вт/(м·К), рабочую температуру до 800°C и предел прочности 550 МПа.

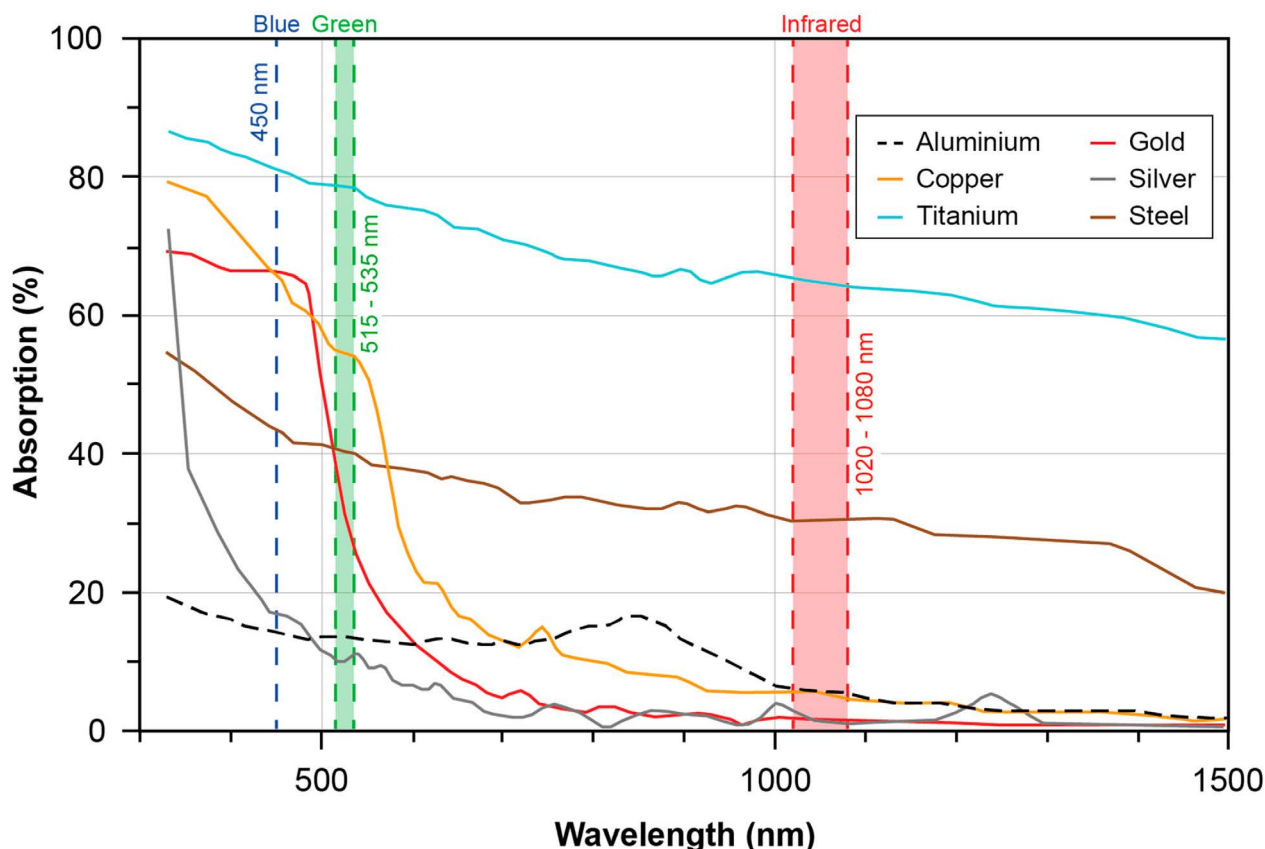
Этот баланс между функциональностью и технологичностью определяет выбор материалов для конкретных задач аддитивного производства.

Технологии аддитивного производства меди

Аддитивное производство меди сталкивается с уникальными технологическими барьерами, обусловленными фундаментальными физическими свойствами этого металла.

Важными союзниками аддитивщиков для работы с чистой медью сегодня все чаще становятся лазеры видимого спектра, о чем свидетельствуют современные исследования в области лазерных технологий. Физические свойства этого металла раскрывают интересную закономерность: если инфракрасное излучение с длиной волны 1064 нм поглощается всего на 5%, то переход к зеленому (515 нм) и синему (450 нм) диапазонам радикально увеличивает эффективность взаимодействия до 40-70% и 60-65% соответственно. Этот фундаментальный принцип, подтвержденный работами Brabazon и коллег (2020), заложил основу для нового подхода в аддитивном производстве.

Синие лазерные системы, основанные на прямых диодных технологиях, совершили настоящую революцию в обработке меди. Доктор К. Мюллер из Института лазерных технологий RWTH Aachen отмечает принципиально иной характер взаимодействия синего излучения с медной поверхностью, обеспечивающий стабильное и контролируемое плавление. Однако эти системы сталкиваются с объективными ограничениями: относительно низкое качество луча ($M^2 > 1.5$), ограничен-



Зависимость поглощения от длины волны лазерного излучения для различных металлов (Stepien et al. Pure Copper: Advanced Additive Manufacturing, 2022, Глава 11)

ная возможность фокусировки (не менее 200 мкм) и существенно более высокая стоимость по сравнению с традиционными ИК-источниками.

Зеленые лазеры, генерируемые через сложный процесс нелинейного преобразования частоты в специальных кристаллах, представляют собой вершину точности в лазерной обработке. Профессор А. Окамото из Университета Осаки подчеркивает их уникальную способность сочетать микроскопическое фокусное пятно (до 20 мкм) с исключительным уровнем поглощения в меди. Но и здесь технологии сталкиваются с рядом вызовов: хроматиче-

ские аберрации, вызванные остаточным ИК-излучением, нестабильность параметров при продолжительной работе и значительная стоимость оборудования.

Перспективы развития лазерных технологий для меди, согласно последним исследованиям Zhang и соавторов (2023), связаны с созданием гибридных систем, интегрирующих преимущества разных типов излучения. Особый интерес представляет разработка волоконных лазеров с прямой генерацией зеленого света, которая может устранить многие существующие технологические ограничения и открыть новые горизонты в прецизионной обработке

этого капризного, но исключительно важного для промышленности металла.

Синие лазерные системы, основанные на прямых диодных технологиях, совершили настоящую революцию в обработке меди. Доктор К. Мюллер из Института лазерных технологий RWTH Aachen отмечает принципиально иной характер взаимодействия синего излучения с медной поверхностью, обеспечивающий стабильное и контролируемое плавление. Однако эти системы сталкиваются с объективными ограничениями: относительно низкое качество луча ($M^2 > 1.5$), ограниченная возможность фокусировки (не менее 200 мкм)

и существенно более высокая стоимость по сравнению с традиционными ИК-источниками.

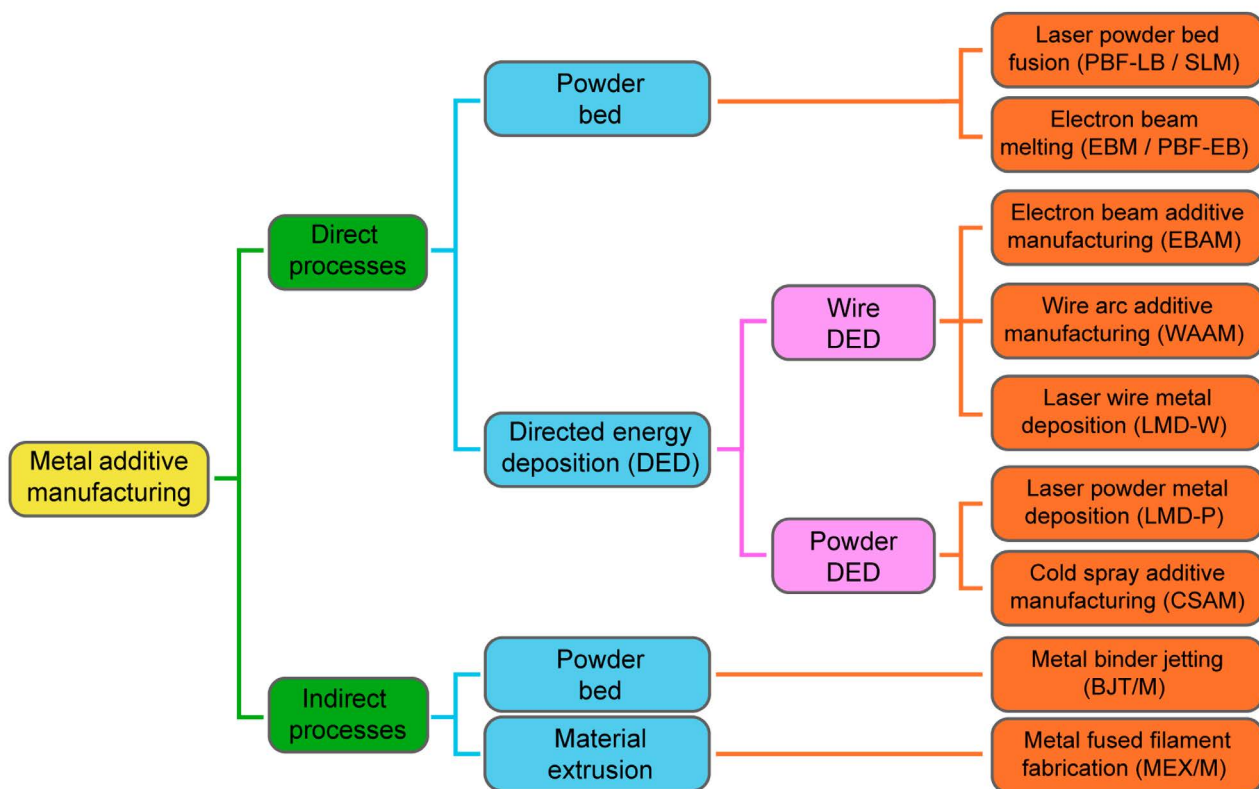
Зеленые лазеры, генерируемые через сложный процесс нелинейного преобразования частоты в специальных кристаллах, представляют собой вершину точности в лазерной обработке. Профессор А. Окамото из Университета Осаки подчеркивает их уникальную способность сочетать микроскопическое фокусное пятно (до 20 мкм) с исключительным уровнем поглощения в меди. Но и здесь технологи сталкиваются с рядом вызовов: хроматические aberrации, вызванные остаточным ИК-излучением, нестабильность параметров при продолжительной работе и значительная стоимость оборудования.

Перспективы развития лазерных технологий для меди, согласно последним исследованиям Zhang и соавторов (2023), связаны с созданием гибридных систем, интегрирующих преимущества разных типов излучения. Особый интерес представляет

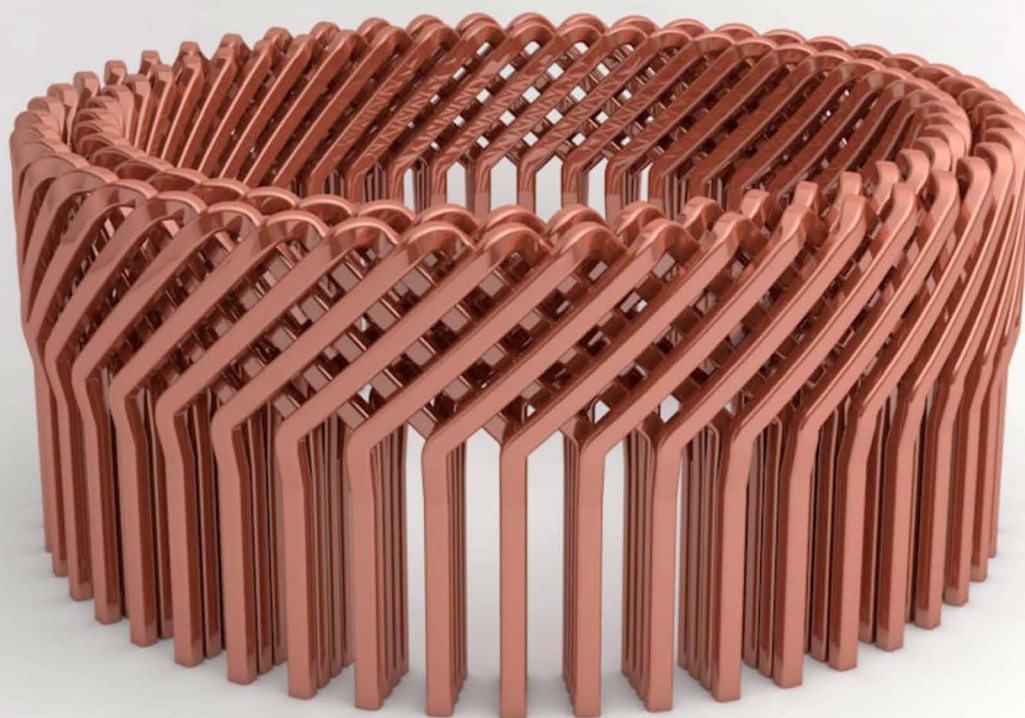
разработка волоконных лазеров с прямой генерацией зеленого света, которая может устранить многие существующие технологические ограничения и открыть новые горизонты в прецизионной обработке этого капризного, но исключительно важного для промышленности металла.

Для работы с медью и медными сплавами можно выделить следующие известные аддитивные технологии:

1. Синтез на подложке/селективное лазерное плавление СЛП (L-PBF/SLM) — доминирующая технология, где традиционные инфракрасные (ИК) лазеры (1064 нм) поглощаются медью всего на 2–5% из-за высокой отражательной способности. Это приводит к нестабильному плавлению порошка, вызывая образование дефектов типа «замочная скважина» (англ. Keyhole) — пор, возникающих из-за избыточной плотности энергии, а также LOF-пор (англ. Lack of Fusion) — пор, образующихся вследствие неполного сплавления. Кроме того, возникает риск повреждения оптики отражённой



Общая классификация методов аддитивного производства для металлов и сплавов (Singh Khandpur et al. Metals 2024, 14(12), 1464)



Рендер бесконечных возможностей синергии проектирования и аддитивного производства медных обмоток электродвигателей. Фото: Additive Drives

энергией. Альтернативные решения на основе зелёного (например, проект «SLM in Green» от Fraunhofer ILT с лазером с длиной волны 515 нм) и синего (в частности система BLUE IMPACT с лазером с длиной волны 450 нм компании Shimadzu) лазерного излучения демонстрируют существенно более высокие показатели поглощения энергии — 40-70% и 60-65% соответственно, что обеспечивает значительно более стабильный и контролируемый процесс плавления.

2. Синтез на подложке/электроннолучевое плавление ЭЛП (E-PBF/EBM) — использует вакуумную среду (10^{-4} мбар) и высокоэнергетические электронные пучки (60 кВ), обеспечивая глубокое проплавление и плотность деталей до 99,5%. Критически важна деоксидация водородом при 1093°C для снижения содержания кислорода с 500–800 ppm до <50 ppm, что критично для вакуумных применений (ускорители частиц). Ограничения: высокая шероховатость поверхности (R_a 25–35 мкм), требующая электрохимической полировки, и специализированные порошки (45–106 мкм).

3. Прямой подвод энергии и материала (DED) — ключевая технология для ремонта, модификации и создания крупногабаритных медных деталей. В отличие от SLM, DED работает с порошком или проволокой, расплавляя их лазером, электронным лучом или плазмой, что позволяет восстанавливать изношенные компоненты (теплообменники, электроды) и формировать гибридные конструкции (медь–сталь). Здесь оптимальны синие лазеры (450 нм) с поглощением 65–70%, обеспечивающие скорость наплавки в 10 раз выше ИК-аналогов, (например, системы NUBURU). DED поддерживает чистую медь, сплавы (CuCrZr, GRCo-84) и графен-модифицированные порошки, но уступает SLM в точности (± 100 –200 мкм) и требует финишной обработки. Применяется в аэрокосмосе (ремонт сопел), энергетике (биметаллические переходники) и электронике (теплоотводы). Перспективы — гибридные DED+ЧПУ системы и мультилазерные установки для работы с разнородными материалами.

4. Листовая ламинация / ультразвуковое аддитивное производство (UAM) — осно-



Тема номера

вано на ультразвуковой сварке (20–40 кГц) медных листов толщиной 100–500 мкм без полного расплавления материала. Позволяет создавать биметаллические структуры (медь-алюминий, медь-сталь) с прочностью на сдвиг до 100 МПа. Однако ограничено рабочей температурой <250°C и применяется преимущественно для теплообменников и электротехнических компонентов.

5. Экструзия материала (MEX/FFF/FGF) — использует медную нить, пруток или гранулы со связующим полимером. Технология FFF (Markforged) обеспечивает плотность 96–98% после спекания, но имеет низкую точность (±100 мкм). Инновационный метод импульсной экстракции PEP (Sublimation 3D) сочетает 3D-печать и порошковую металлургию, решая проблему обработки высокоотражающих металлов и позволяя создавать тонкостенные структуры толщиной до 0,3 мм.

6. Струйная печать связующим (Binder Jetting) — экономична для серийного про-

изводства (сокращение циклов на 40%, Desktop Metal, AM.TECH). Нанесение связующего на медный порошок (15–45 мкм) с последующим спеканием дает плотность 97–98% и электропроводность до 90% IACS (сплав C18150). Недостатки: усадка до 20%, ограниченная точность (±50 мкм) и, порой, необходимость инфильтрации и/или горячего изостатического прессования для повышения механических свойств.

7. Фотополимеризация в ванне (DLP) — использует фотополимеризацию медно-фотополимерных композитов (Holo). Обеспечивает рекордное разрешение (±25 мкм) и скорость (затвердевание слоя <10 сек), но требует двухэтапной обработки: печать «зеленой» детали с последующим удалением связующего полимера и спеканием. Теплопроводность достигает 95% от литой меди, что идеально для микрорадиаторов процессоров и шин питания сложной формы.

Табл. Сравнение технологий аддитивного производства меди

Технология	Поглощение энергии	Плотность	Точность	Скорость	Ключевые преимущества	Основные применения
SLM (ИК-лазер)	2-5%	97-98%	±50 мкм	До 500 см³/ч (64 лазера)	Высокая производительность, широкий выбор материалов	Аэрокосмические компоненты, медицинские имплантаты
SLM (Зеленый лазер)	40-70%	>99,5%	±20-30 мкм	До 300 см³/ч (многолазерные системы)	Высокая плотность, улучшенная проводимость	Микрорадиаторы, электронные компоненты
EBM	Высокое (эл. луч)	99,5%+	±100 мкм	20-30 см³/ч	Вакуумная обработка, минимальное окисление	Космические и вакуумные системы
Binder Jetting	Не требуется	97-98%	±50 мкм	50+ см³/ч	Экономичность, высокая скорость	Серийное производство электротехники
DLP	Не требуется	96-98%	±25 мкм	25-40 см³/ч	Высокая точность	Микро-теплообменники, оптические структуры
DED	65-70% (синий)	98-99,5%	±100-200 мкм	60-240 см³/ч	Ремонт крупных деталей	Восстановление компонентов, биметаллические конструкции
UAM	Не требуется	99%+	±50 мкм	10-20 см³/ч	Холодное соединение металлов	Гибридные структуры (медь-алюминий)

Зеленые и синие лазеры в аддитивном производстве меди

Современное аддитивное производство переживает революционный перелом благодаря разработке специализированных лазерных технологий для обработки меди. Если традиционные ИК-лазеры демонстрировали существенные ограничения при работе с этим материалом, то новые зеленые и синие лазерные системы, преодолевая технологические и экономические барьеры, открывают принципиально новые промышленные перспективы.

Однако, как отмечают эксперты, вопрос выбора оптимального лазерного решения не столь однозначен. Константин Бабкин поясняет: «Фундаментальные преимущества меди — её уникальная теплопроводность и электропроводность, существенно снижаются при введении легирующих добавок, что одновременно уменьшает и коэффициент отражения. Именно поэтому в случаях, когда это технологически возможно, предпочтение отдается чистой меди. Следует учитывать, что отражательная способность меди значительно варьируется в зависимости от длины волны — переход из инфракрасного диапазона в видимый спектр многократно увеличивает поглощение, что теоретически должно упрощать процессы 3D-печати и сварки».

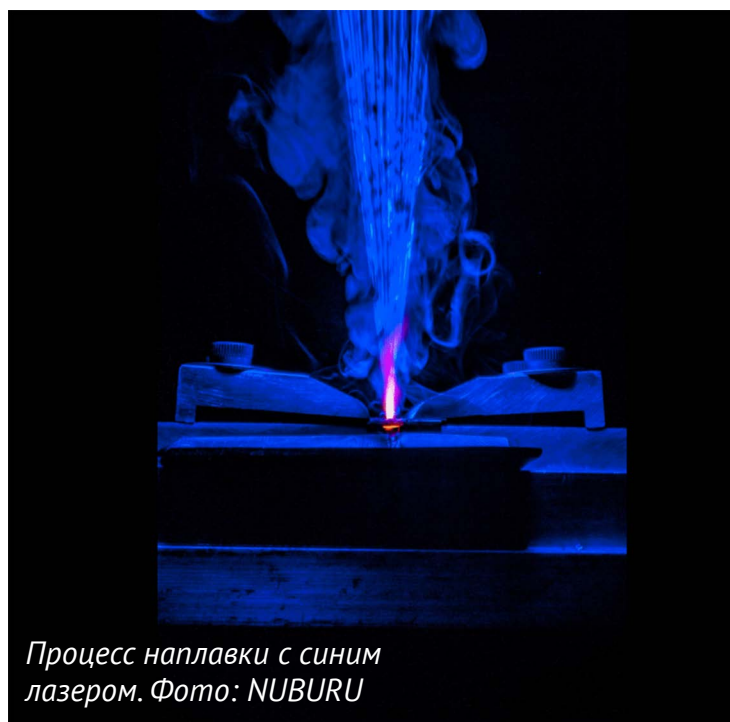
Этот технологический парадокс — необходимость баланса между чистыми медными составами с их превосходными физическими свойствами, но сложной обработкой, и более технологичными, но менее проводящими сплавами — продолжает оставаться одним из ключевых вызовов для аддитивного производства.

Практическое применение новых лазерных технологий сталкивается с существенными ограничениями. Как поясняет Бабкин: «Использование синих диодных лазеров в L-PBF/SLM технологиях пока не оправдано, тогда как в DED-процессах они

конкурируют с многомодовыми волоконными системами, проигрывая по цене в 50 раз. Лишь в исключительных случаях синий лазер может стать оптимальным решением».

Константин Бабкин рекомендует: «Волоконные лазеры высокой мощности отлично справляются со сплавом БрХЦр, обеспечивая высокую производительность, практически 100% плотность, а также обладают невысокой ценой и универсальностью. Обычно рекомендуется использовать принтер с лазером мощностью 700 Вт, а лучше — 1000 Вт, чтобы избежать проблем. Недостатком является высокий порог генерации волоконных лазеров: рабочий диапазон начинается с 10% (или 100 Вт), что может быть избыточным для некоторых материалов и режимов. Однако уже анонсированы волоконные лазеры с более низким минимальным уровнем мощности (от 5% от номинала)».

Зелёные лазеры, демонстрируя лучшие характеристики фокусировки (благодаря длине волны 515 нм) и качества излучения, тем не менее имеют серьёзные технологические ограничения. «Эти системы, являющиеся второй гармоникой стандартных волоконных или дисковых лазеров, дей-



Процесс наплавки с синим лазером. Фото: NUBURU

ствительно повышают детализацию печати, но снижают производительность, — отмечает эксперт. — Проблемы хроматических aberrаций, нестабильность параметров излучения и высокая стоимость пока делают их применение в 3D-печати экономически нецелесообразным».

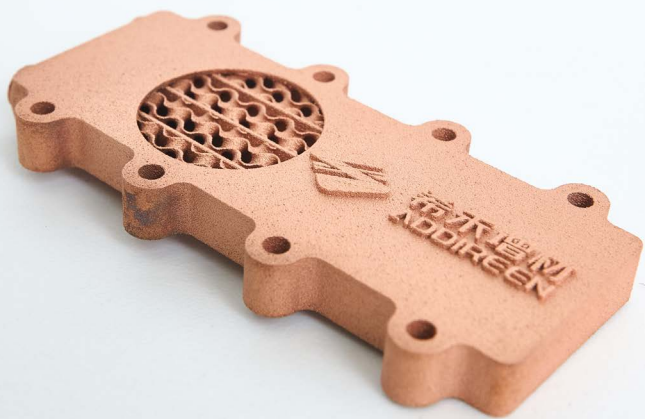
Перспективы развития лазерных технологий обработки меди видятся в постепенном преодолении существующих технических ограничений. По мнению Бабкина, «зелёные лазеры, избавившись от текущих «детских болезней», могут занять нишу обработки чистой меди, которая остаётся проблемной зоной для традиционных ИК-систем». Однако на текущем этапе выбор оптимальной лазерной технологии требует тщательного анализа конкретных производственных задач и экономических факторов.

Максим Бурмистров, ведущий инженер-конструктор ООО «ЮЗТС»: «Данные исследований NUBURU, а также наш практический опыт подтверждают: чистая медь отражает 95-98% энергии ИК-лазера (1064 нм). Это приводит не только к нестабильному плавлению и образованию пор, но и создает риск повреждения оптики из-за отраженной мощности, причем отражается уже сфокусированный луч, что было свое-

го рода неожиданностью. Зеленый и синий лазеры существенно снижают эту проблему за счет повышенного поглощения — до 40-70% и 60-65% соответственно, — обеспечивая более контролируемый процесс плавления. При этом для медных сплавов, таких как бронзы и латуни, обладающих более высоким исходным поглощением в ИК-диапазоне, традиционные ИК-лазеры остаются эффективным решением. Обработка чистой меди лазером требует осознанного выбора технологии, диктуемого физикой и экономикой. Зеленые лазеры обеспечивают приемлемое качество излучения, но их стоимость остается барьером. Синие лазеры — попытка привнести что-то новое в L-PBF процесс. В условиях растущей конкуренции со стороны азиатских производителей устойчивые стратегии включают фокус на гибридные системы, оптимизацию процессов под доступные материалы, (например, CuCrZr для ИК), и добавленную стоимость в виде инженерных решений и поддержки».

Как отмечает Максим Бурмистров: «Зеленые лазеры премиум-сегмента, например, VPG Laserone от ООО «ВПГ Лазеруан» (ранее IPG Photonics), стоят в 1,5–2 раза дороже ИК-аналогов сопоставимой мощности из-за сложности генерации излучения. Ки-

Как отмечает Максим Бурмистров: «Зеленые лазеры премиум-сегмента, например, VPG Laserone от ООО «ВПГ Лазеруан» (ранее IPG Photonics), стоят в 1,5–2 раза дороже ИК-аналогов сопоставимой мощности из-за сложности генерации излучения. Китайские производители, такие как Addireen, предлагают более доступные зеленые модули — примерно в 1,3 раза дороже ИК-систем, оказывая давление на рынок. Синие лазеры мощностью 200 Вт в комплекте с оптикой и источниками питания стоят порядка \$40 000 (без учёта стоимости самого принтера или робота). Это технически и экономически оправданное решение для задач, где критична скорость осаждения, а не максимальное разрешение».



Демонстраторы возможностей L-PBF печати и трижды периодических минимальных поверхностей, полученные из меди с помощью оборудования Addireen. Фото: ООО НПО “3Д-Интеграция”

тайские производители, такие как Addireen, предлагают более доступные зеленые модули — примерно в 1,3 раза дороже ИК-систем, оказывая давление на рынок. Синие лазеры мощностью 200 Вт в комплекте с оптикой и источниками питания стоят порядка \$40 000 (без учёта стоимости самого принтера или робота). Это технически и экономически оправданное решение для задач, где критична скорость осаждения, а не максимальное разрешение».

Вышеупомянутая выше компания Addireen занимается разработкой и производством высококачественных зеленых лазеров с длиной волны 532 нм, которые востребованы в прецизионной микрообработке, биомедицинских приложениях, лазерной маркировке и научных исследованиях. Компания использует твердотельные лазерные технологии с диодной накачкой, обеспечивая высокую стабильность пучка, низкий уровень шумов и длительный срок службы. Их системы отличаются компактной конструкцией с эффективным тепловым управлением, что критично для сохранения когерентности и мощности лазера в непрерывном и импульсном режимах. Addireen предлагает решения с мощностью от единиц милливатт до нескольких ватт, включая модули с возможностью модуляции частоты и интеграции в автоматизированные

системы. Для специализированных задач компания разрабатывает OEM-решения с индивидуальными параметрами, такими как нестандартная длительность импульсов, поляризация или форма пучка, что делает их оборудование гибким инструментом для высокотехнологичных отраслей. На российском рынке интересы Addireen представляет компания AM.TECH — признанный разработчик и интегратор передовых аддитивных технологий и решений для 3D-сканирования.

Области применения этих технологий чрезвычайно разнообразны. В электронике они используются для создания токопроводящих элементов с интегрированными системами микроохлаждения и производства высокочастотных компонентов. Аэрокосмическая отрасль применяет их для изготовления камер сгорания с совершенными системами охлаждения и высокоэффективных теплообменников для двигателей. В энергетике эти технологии помогают создавать компоненты для возобновляемых источников энергии, включая солнечные панели и ветрогенераторы, а также улучшать конструкции электрогенераторов.

Перспективы развития лазерных технологий для обработки меди выглядят весьма многообещающе. «Для западных производителей конкурентная стратегия заключает-

Для западных производителей конкурентная стратегия заключается в разработке инновационных платформ, локализованной технической поддержке и создании гибридных систем (ИК + синий/зеленый лазер), что соответствует ключевым трендам 2024 года

ся в разработке инновационных платформ, локализованной технической поддержке и создании гибридных систем (ИК + синий/зеленый лазер), что соответствует ключевым трендам 2024 года», — отмечает Максим Бурмистров. Не менее важна разработка специализированных медных порошков, оптимизированных для работы с этими типами излучения. Автоматизация процессов позволит вывести производство на новый уровень, сделав его более эффективным и доступным для массового применения.

Эти инновационные технологии действительно открывают новую эру в аддитивном производстве, предлагая уникальное сочетание высочайшей точности, энергоэффективности и широкого спектра промышленных применений. Они не просто решают существующие проблемы обработки меди, но и создают основу для будущих технологических прорывов в самых разных отраслях промышленности.

Производство порошков и контроль качества

Производство металлических порошков для аддитивных технологий является критически важным этапом, определяющим качество и функциональность конечных изделий. Среди ключевых методов выделяются газовое распыление и плазменные технологии, каждый из которых обладает уникальными преимуществами и ограничениями.

Газовое распыление включает три основных метода: VIGA (вакуумная индукционная плавка с газовым распылением),

PIGA (плазменная индукционная плавка с газовым распылением) и EIGA (электродная индукционная плавка с газовым распылением). VIGA подходит для широкого спектра сплавов, но требует дорогостоящего оборудования. PIGA обеспечивает повышенную чистоту порошка, однако стоимость исходных материалов остается высокой. EIGA, исключая контакт расплава с тиглем, достигает максимальной чистоты, что делает его идеальным для ответственных применений, таких как аэрокосмическая промышленность.

Плазменные технологии представлены методами плазменного распыления и PREP (распыление с плазменным вращающимся электродом). Плазменное распыление ограничено выбором материалов из-за использования проволоки, тогда как PREP обеспечивает отличную текучесть порошка и минимальное количество газовых включений, что критично для сложных деталей с высокими требованиями к плотности.

Критерии качества порошков включают чистоту (минимальное содержание примесей), форму частиц (сферичность для улучшения текучести) и гранулометрический состав (оптимальное распределение размеров). Высокая насыпная плотность также является ключевым параметром, влияющим на качество печати.

Инновационные решения в производстве порошков представлены системами UniMelt от 6K Additive и Direct Powder System от Metal Powder Works. UniMelt использует микроволновую технологию, обеспечивая энергоэффективность и возможность переработки отходов. Direct Powder System



предлагает непрерывное производство с гибкостью в составе сплавов, что сокращает энергопотребление и повышает экологичность процессов.

Контроль качества на всех этапах производства порошков гарантирует соответствие строгим требованиям аддитивных технологий, обеспечивая надежность и долговечность конечных изделий. Внедрение инновационных методов и систем позволяет не только улучшить характеристики порошков, но и снизить затраты, открывая новые возможности для промышленного применения.

Применения 3D-печати медью в электродвигателях

Аддитивное производство меди открывает новые горизонты в создании электродвигателей, предлагая инновационные решения для повышения их эффективности, снижения веса и улучшения терморегулирования. Технологии 3D-печати, такие как SLM и Binder Jetting, позволяют изготавливать сложные компоненты, которые невозможно получить традиционными методами. Особое внимание уделяется обмоткам и роторам, где медь играет ключевую роль благодаря своей высокой электропроводности и теплопроводности.

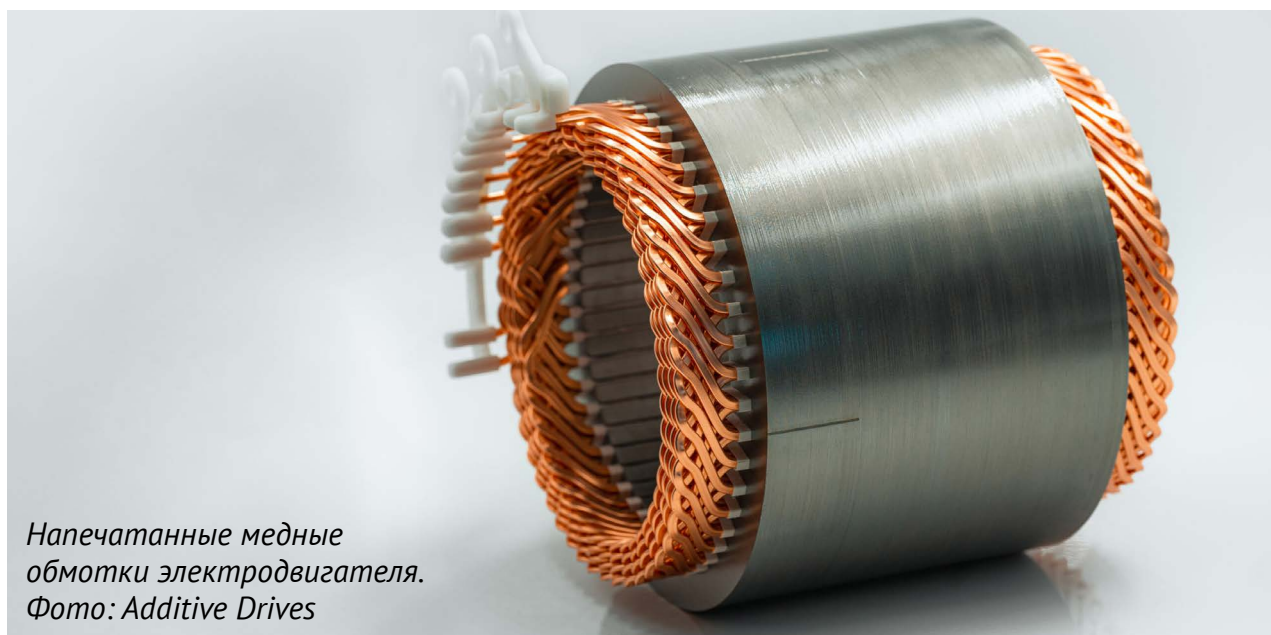
3D-печать обмоток: L-PBF и Binder Jetting

Лазерная технология L-PBF/SLM, использующая чистый медный порошок, обеспечивает максимальное заполнение пазов (до 95%) и снижение электрического сопротивления на 15-20%. Это достигается за счет оптимизированного поперечного сечения витков и интеграции теплоотводящих каналов, что устраняет локальные перегревы. Например, метод L-PBF позволяет создавать обмотки с интегрированными системами охлаждения, что значительно улучшает тепловые характеристики двигателей.

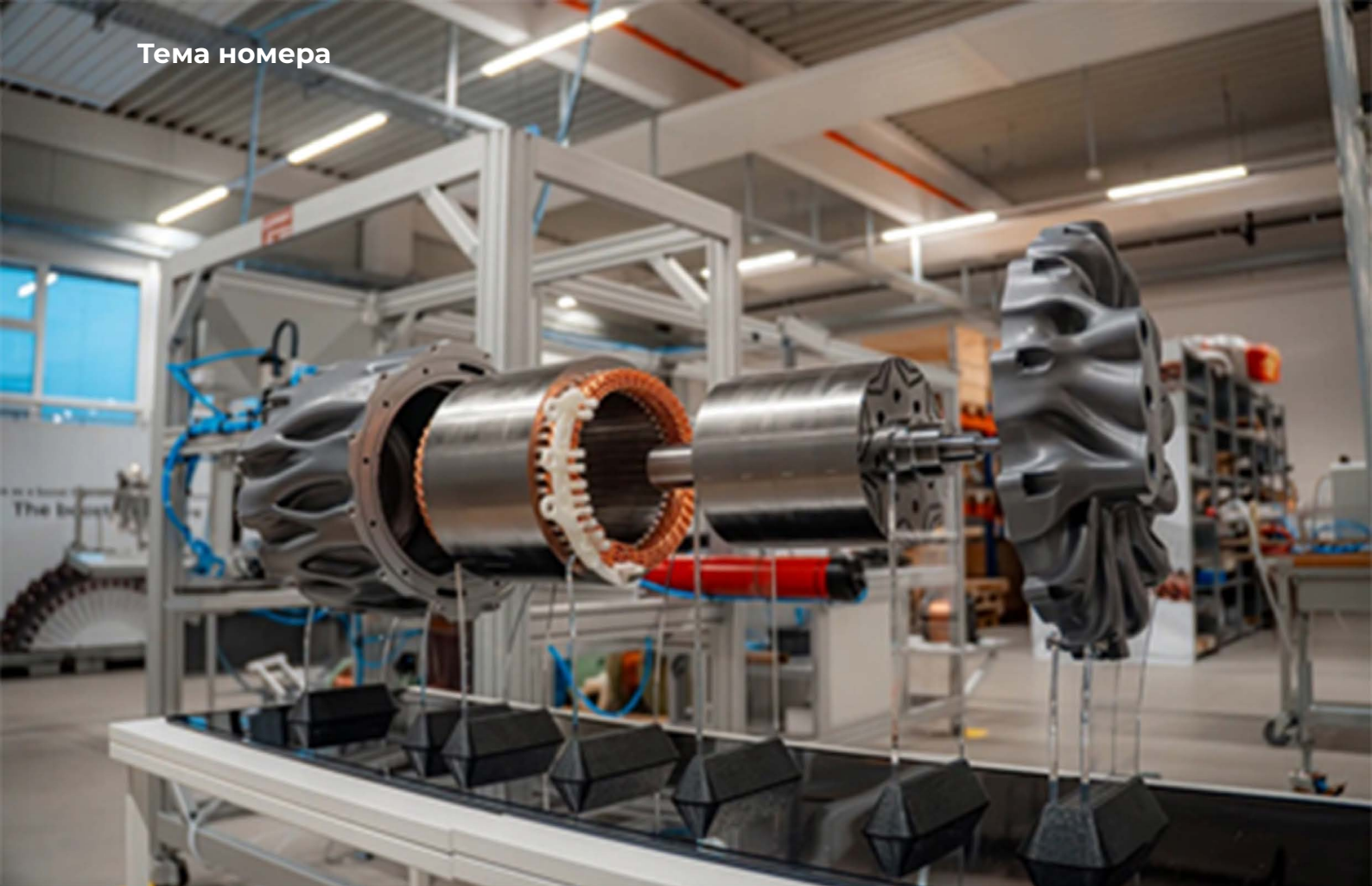
Binder Jetting, в свою очередь, предлагает экономические преимущества: сокращение производственных этапов на 40%, снижение энергозатрат на 35% и минимизацию отходов материала (до 98% использования). Хотя точность этого метода (± 50 мкм) уступает L-PBF (± 20 -30 мкм), он идеально подходит для серийного производства, где важны скорость и стоимость.

Медные роторы: сравнение литья и L-PBF

Традиционное литье медных роторов обеспечивает высокую электропроводность, но ограничено в сложности конструкции. В отличие от него, L-PBF позволяет создавать роторы со свободной геометрией, оптимизированным распределением материала



*Напечатанные медные обмотки электродвигателя.
Фото: Additive Drives*



Электродвигатель с большой долей напечатанных компонентов. Фото: Additive Drives

и интегрированными системами охлаждения. Например, L-PBF-печать роторов для электромобилей демонстрирует снижение потерь на 15-25% и увеличение общего КПД двигателя на 3-5%. Однако себестоимость L-PBF пока остается высокой, что делает эту технологию более подходящей для премиальных решений.

Кейсы Ford, GH Induction и Additive Drives

Компания **Ford** внедрила 3D-печатные индукционные нагреватели муфты переключения передач в трансмиссии Ford Transit, используя электроннолучевую технологию E-PBF. Результаты показали равномерное распределение тепла при температурах выше 800°C, повышение стабильности работы на 30% и снижение энергопотребления на 15-20%.

GH Induction разработала технологию 3DPCoil, основанную на E-PBF, для производства медных катушек с интегрированным охлаждением. Такие катушки обладают

повышенной энергоэффективностью (92% против 75% у традиционных) и ресурсом, превышающим 150 000 циклов.

Additive Drives представила революционное решение для 3D-печатных обмоток статора, обеспечивающее коэффициент заполнения до 65% и снижение потерь энергии на 25-30%. Их технология позволяет создавать индивидуальные витки с переменной толщиной проводника, что значительно улучшает тепловые и электрические характеристики двигателей.

Энергоэффективность и терморегулирование

Аддитивные технологии позволяют оптимизировать конструкции электродвигателей, интегрируя сложные системы охлаждения и улучшая распределение тепла. Например, 3D-печатные обмотки с микроканалами охлаждения снижают температуру на 15-20°C, что увеличивает срок службы

двигателей на 30-40%. Кроме того, использование медных сплавов, таких как CuCrZr, обеспечивает высокую теплопроводность и устойчивость к термическим нагрузкам.

Внедрение этих технологий уже демонстрирует значительный экономический эффект: снижение себестоимости на 15-20%, сокращение сроков разработки в 3-4 раза и уменьшение эксплуатационных затрат до 30%. Перспективы включают дальнейшую интеграцию с цифровыми системами управления, разработку композитных материалов и автоматизацию производственных процессов.

Таким образом, 3D-печать меди в электродвигателях не только повышает их производительность, но и открывает путь к созданию более компактных, легких и энергоэффективных решений для различных отраслей промышленности.

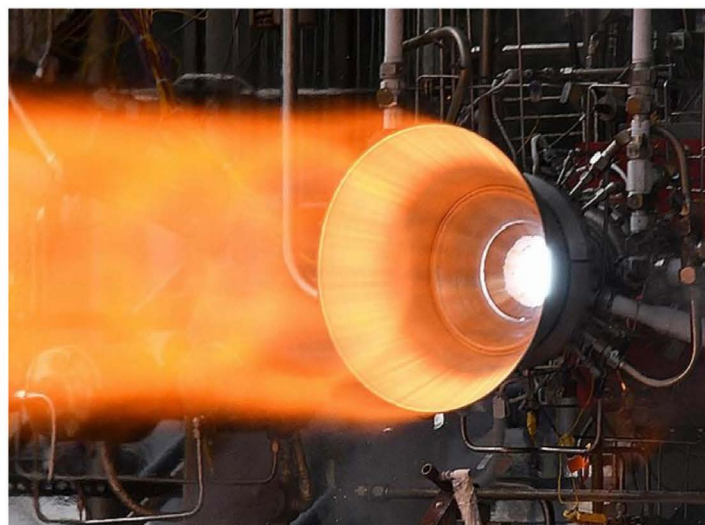
Аэрокосмические решения

Медные сплавы, разработанные NASA, такие как GRCo-42 и GRCo-84, стали ключевыми материалами в аэрокосмической промышленности благодаря своим уникальным свойствам. Эти сплавы на основе меди с добавлением хрома и ниобия обладают высокой теплопроводностью (300–320 Вт/(м·К)), термостойкостью (до 800°C) и механической прочностью (предел прочно-

сти до 550 МПа). Их применение в камерах сгорания ракетных двигателей позволяет выдерживать экстремальные температуры и давления, обеспечивая долговечность и надежность. Например, сплав GRCo-84 используется в моноблочных камерах сгорания с интегрированными системами охлаждения, что значительно снижает вес и повышает эффективность двигателей.

Одним из успешных примеров применения этих сплавов является двигатель Launcher E-2, где GRCo-42 использовался для создания камеры сгорания методом L-PBF. Этот подход сократил количество деталей на 80% и уменьшил время производства с 6–8 месяцев до 3–4 недель. Другой кейс — Rocket Lab, которая применяет GRCo-84 в своих ракетных двигателях, сочетая его с титаном и никелевыми сплавами для создания гибридных конструкций. Такие решения обеспечивают увеличение тяги на 15–20% и снижение массы на 25–35%.

Гибридные конструкции, объединяющие медь и никель, открывают новые возможности в аэрокосмической технике. Например, камеры сгорания, напечатанные методом DED (P), сочетают жаропрочные никелевые сплавы (Inconel 718) с медными компонентами (GRCo-42), что улучшает теплопередачу и снижает термические напряжения. Такие конструкции демонстрируют увеличение



Биметаллическая камера сгорания: внутренняя часть изготовлена из сплава GRCo-84 по технологии L-PBF, а внешняя – из Inconel 625 по технологии EB-DED. Фото: NASA

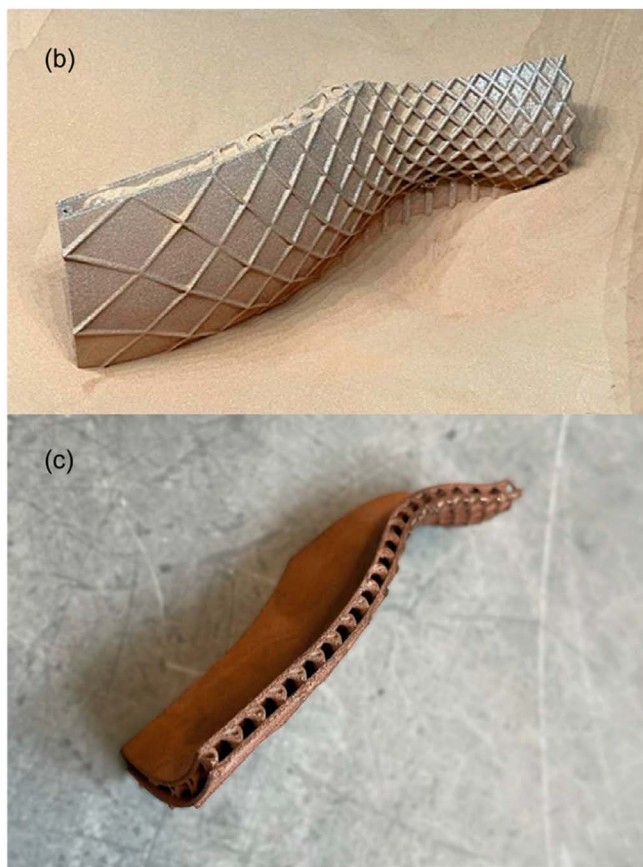
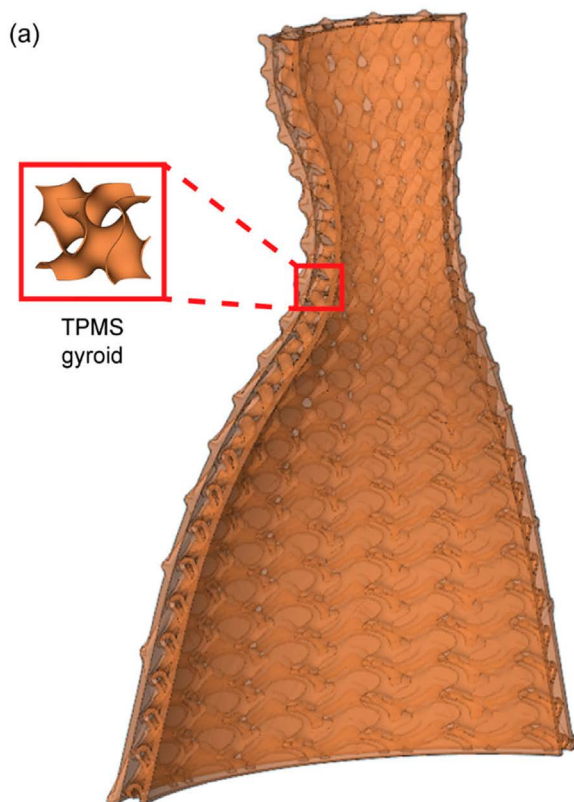
теплопроводности на 180–200% и ресурса на 300+ циклов по сравнению с традиционными аналогами.

Технологии аддитивного производства, такие как L-PBF, DED (P) и E-PBF, играют важную роль в создании этих инновационных решений. L-PBF обеспечивает высокую точность (± 50 мкм) и плотность (99,5+%), что критично для прецизионных деталей. DED (P) позволяет производить крупногабаритные компоненты с интегрированными системами охлаждения, а E-PBF, работая в вакууме, идеально подходит для обработки чистых медных сплавов с минимальным окислением. Например, в проекте LCUSP NASA использовало L-PBF для печати камер сгорания из GRCop-84, которые успешно выдержали давление свыше 1400 psi и температуру до 3000°C.

Также очень часто в аддитивном производстве используются все преимущества

проектирования DfAM, что подтверждается применением ячеистых структур и трижды периодических минимальных поверхностей, ТПМП (англ. Triply Periodic Minimal Surfaces, TPMS). Эти структуры представляют собой сложные геометрические фигуры с нулевой средней кривизной, которые периодически повторяются в трех измерениях. Среди наиболее известных примеров таких поверхностей — гироид (Gyroid), алмазная (Diamond) и примитивная (Primitive/Schwarz P) структуры. Эти уникальные формы обладают рядом преимуществ, делающих их особенно ценными для аддитивного производства.

Одним из ключевых достоинств ТПМП является их высокая удельная прочность, достигаемая за счет оптимального сочетания пористости и жесткости. Благодаря сложной геометрии эти структуры эффективно передают тепло и жидкости, что открывает



Сектор камеры сгорания с трижды периодическими минимальными поверхностями TPMS, напечатанный из меди по технологии L-PBF: модель CAD (a); деталь после удаления порошка (b); готовая деталь после пескоструйной обработки (c) (Singh Khandpur et al. *Metals* 2024, 14(12), 1464)

широкие возможности для создания высокопроизводительных теплообменников и биосовместимых имплантов. Кроме того, использование таких поверхностей позволяет значительно снизить вес деталей без ущерба для их прочности, что особенно важно в аэрокосмической отрасли, где каждый грамм на счету.

В аддитивном производстве ТПМП находят применение в самых разных областях. В аэрокосмической промышленности они используются для создания облегченных, но прочных компонентов. В инженерных системах ТПМП улучшают гидродинамику теплообменников, повышая их эффективность. Таким образом, трижды периодические минимальные поверхности открывают новые горизонты для аддитивных технологий, позволяя создавать инновационные изделия, которые невозможно получить традиционными методами изготовления.

Перспективы развития включают дальнейшую оптимизацию составов сплавов, например, разработку GRCo90 с повышенным содержанием ниобия, а также внедрение цифровых технологий, таких как ИИ-оптимизация конструкций и предиктивное моделирование износа. Эти инновации позволяют создавать еще более эффективные и надежные аэрокосмические системы, сокращая сроки разработки и снижая затраты.

Терморегулирование и инновационные материалы

Современные технологии терморегулирования и аддитивного производства меди открывают новые горизонты в создании высокоэффективных систем охлаждения и теплопередачи. Инновационные материалы и методы обработки позволяют достичь рекордных показателей теплопроводности, долговечности и энергоэффективности. В этой части мы рассмотрим ключевые разработки в области терморегулирования, включая передовые теплообменники, ал-

мазно-медные композиты, графен-модифицированные порошки и технологию холодного напыления.

Теплообменники нового поколения

Компании Addtoshape S.r.L и CoolestDC представили революционные решения в производстве теплообменников с использованием аддитивных технологий. Addtoshape разработала биметаллические медные теплообменники с бионическими каналами охлаждения и интегрированными температурными датчиками. Эти устройства на 40% компактнее традиционных аналогов и демонстрируют на 35-40% более высокую тепловую эффективность. CoolestDC совместно с EOS создала интегрированные охлаждающие пластины для центров обработки данных, обеспечивающие температурную стабильность с отклонением всего $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Эти решения снижают энергопотребление на 15-20% и увеличивают плотность оборудования на 50-70%, что делает их идеальными для высоконагруженных серверных стоек и силовой электроники.

Алмазно-медные композиты

Прорывная разработка Харбинского технологического института — алмазно-медные композиты — демонстрирует теплопроводность до $700 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, что почти вдвое превышает показатели чистой меди. Эти материалы сочетают в себе высокую теплопередачу с низким коэффициентом теплового расширения ($\leq 10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), что критически важно для аэрокосмической техники и электроники. Технология включает струйное нанесение алмазного порошка с медным связующим и последующее спекание, что позволяет создавать сложные бионические структуры с интегрированными теплоотводами. Применение таких композитов в космических аппаратах, процессорных системах охлаждения и термоядерных установках открывает новые возможности для управления тепловыми потоками в экстре-

мальных условиях.

Графен-модифицированные порошки

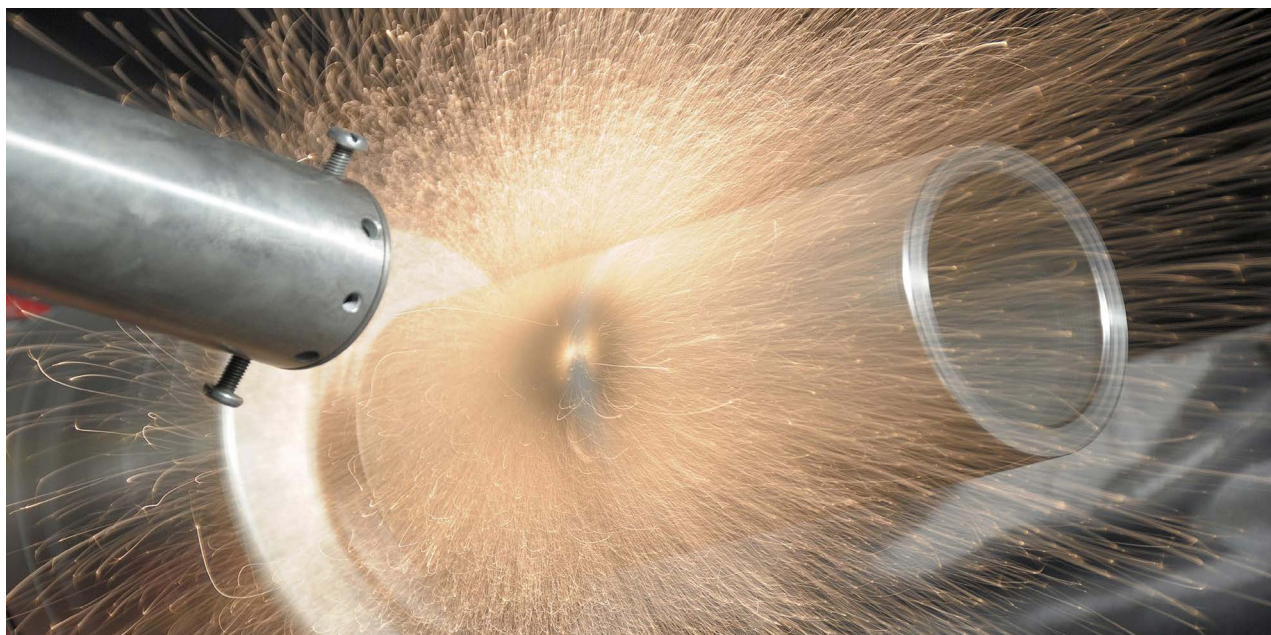
Совместные исследования Уппсальского университета и Graphmatech привели к созданию графен-модифицированных медных порошков, которые кардинально меняют подход к лазерной 3D-печати. Покрытие частиц порошка графеном толщиной 10-50 нм снижает отражательную способность меди с 95% до 28% для ИК-лазеров, что значительно улучшает качество плавления. Детали, напечатанные из таких порошков, обладают плотностью 99,2-99,5% и теплопроводностью 410 Вт/(м·К). Эти материалы особенно востребованы в электронике для производства теплоотводящих подложек и 3D-печатных шин питания, а также в аэрокосмической отрасли для создания сопловых вкладышей и систем охлаждения двигателей.

Холодное напыление для ремонта

Технология холодного газодинамического напыления (ColdSpray) меди, разработанная Plasma Giken, предлагает уникальный метод ремонта и модернизации металлических деталей без термического воздействия. Частицы меди напыляются со скоростью 300-1200 м/с при температуре 30-500°C, формируя слои с прочностью 90-110% от основного

металла. Этот метод исключает деформации и коррозию, характерные для традиционной сварки, и сокращает время ремонта в 3-5 раз. Применяется для восстановления посадочных поверхностей, уплотнительных участков и создания биметаллических деталей в аэрокосмической, энергетической и транспортной отраслях. Например, ремонт турбинных лопаток или коленвалов с использованием этой технологии увеличивает их срок службы в 2-3 раза.

Инновации в области терморегулирования и материаловедения, такие как алмазно-медные композиты и графен-модифицированные порошки, задают новые стандарты эффективности и надежности. Технологии холодного напыления и аддитивного производства теплообменников демонстрируют, как современные методы обработки меди могут решать сложные инженерные задачи. Эти разработки не только улучшают эксплуатационные характеристики устройств, но и способствуют устойчивому развитию, снижая энергопотребление и материальные отходы. Будущее терморегулирования — за интегрированными, многофункциональными решениями, созданными с учетом экстремальных условий и требований цифровой эпохи.



Технология ColdSpray для быстрого ремонта или придания поверхностям деталей новых свойств. Фото: TWI Ltd

«При печати чистой медью требуется значительный подогрев плиты построения, — поясняет эксперт Константин Бабкин. — Однако при температурах выше 100°C начинается активное спекание и окисление порошка даже при минимальном содержании кислорода в защитной атмосфере. Это неизбежно приводит к снижению электропроводности – ключевого свойства меди».

Совершенство и дефекты в аддитивном производстве меди

Аддитивное производство меди представляет собой сложный технологический процесс, где малейшие отклонения могут привести к критическим дефектам. Особенно это актуально для аэрокосмической отрасли, где требования к качеству деталей исключительно высоки. Основные проблемы включают различные виды пор, трещин и структурную неоднородность.

Как отмечают эксперты, обработка чистой меди сопряжена с дополнительными сложностями. «При печати чистой медью требуется значительный подогрев плиты построения, — поясняет эксперт Константин Бабкин. — Однако при температурах выше 100°C начинается активное спекание и окисление порошка даже при минимальном содержании кислорода в защитной атмосфере. Это неизбежно приводит к снижению электропроводности – ключевого свойства меди».

«На практике наибольшее применение для L-PBF-технологии находят малолегированные бронзы с высокой тепло- и электропроводностью (содержащие около 99% меди). Опыт синтеза малолегированных бронз показывает практическую применимость ИК-лазеров — стандартного оборудования для L-PBF как в России, так и за рубежом. Критическим параметром является температура подогрева плиты построения: её изменение даже на 50°C приводит к резкому увеличению дефектов (пор и несплав-

лений) в структуре материала. Экономический аспект также играет важную роль: при нагреве до 150–200°C происходит интенсивное окисление порошка, контактирующего с деталью. Для повторного применения таких оборотных порошков задача отделения окисленных частиц от годных к повторному применению представляется крайне сложной. По факту же, печать с относительно высокими температурами подогрева плиты построения (в зависимости от плотности заполнения плиты построения) часто ограничивается однократным применением металлопорошковых композиций из-за невозможности отделения годного порошка», — делится опытом Алексей Мазалов, генеральный директор АО «ЦАТ».

Для преодоления этих ограничений инженеры разрабатывают специализированные сплавы. Никелевые составы типа Inconel 718 демонстрируют исключительную термостойкость, титановые сплавы сочетают легкость и прочность, а медные композиции вроде GRCo-42 обеспечивают превосходное терморегулирование.

Термическая обработка играет ключевую роль в достижении оптимальных характеристик. В то время как никелевые сплавы приобретают дополнительную прочность за счет пластичности, алюминиевые составы становятся более гибкими. Ряд медных сплавов (например, GRCo) сохраняет уникальный баланс прочности и термостойкости, оставаясь устойчивыми к многократным тепловым нагрузкам.

Таким образом, аддитивное производ-

ство меди требует тщательного контроля всех параметров процесса — от состава защитной атмосферы до режимов термической обработки. Только комплексный подход позволяет минимизировать дефекты и получить детали, соответствующие самым строгим промышленным требованиям.

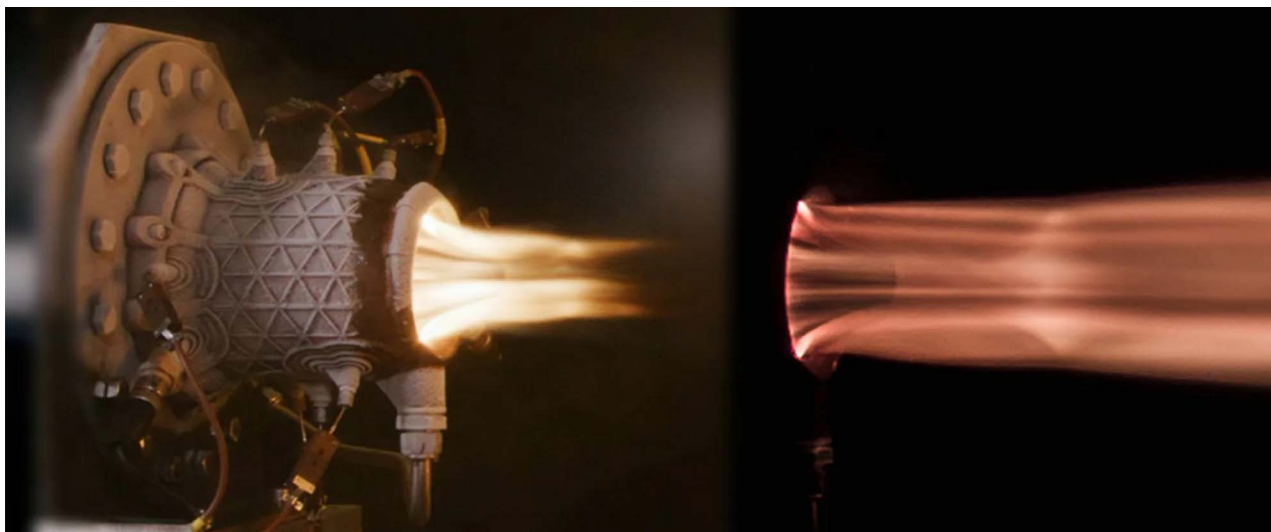
Влияние ИИ на проектирование и управление качеством в аддитивном производстве меди

Искусственный интеллект перестал быть вспомогательным инструментом — он стал ключевым фактором преобразований в работе с медью. В авангарде этой революции компания LEAP 71 (ОАЭ), бросившая вызов традиционному инженерному процессу. Их вычислительная модель Noyron заменила ручное CAD-моделирование автономным генеративным проектированием. Задавая параметры, — тягу, тип топлива, термонагрузки, ИИ создает оптимизированную конструкцию за минуты вместо месяцев. Например, жидкостный ракетный двигатель тягой 5 кН был спроектирован ею за 2 недели, а клиновоздушный (от англ. aerospike, аэро-спайк) — за 3 недели. Для меди, капризной и требовательной, это прорыв: Noyron создает системы охлаждения с каналами переменного сечения до 0,8 мм в камерах сгорания из CuCrZr, где керосин циркулирует,

отводя тепло от стенок, нагретых до 3000°C. В двигателе аэроспайк ИИ решил проблему перегрева центрального шипа, спроектировав сеть микроканалов, по которым жидкий кислород снижает температуру с 3500°C до 250°C на поверхности. Выбор CuCrZr здесь не случаен — сплав сочетает теплопроводность (~330 Вт/(м·К)), прочность (450 МПа) и технологичность печати на оборудовании EOS M290.

Испытания в июне 2024 года в Великобритании стали триумфом подхода: данный двигатель проработал 11 секунд на жидком кислороде и керосине, подтвердив стабильность тяги с первой попытки. Данные тестов автоматически загружались в Noyron, запустив цикл самообучения для корректировки будущих конструкций. Это замкнуло петлю «проектирование — производство — верификация», сократив путь от чертежа до огневых испытаний с месяцев до недель.

Но ИИ меняет не только проектирование — он трансформирует контроль качества на молекулярном уровне. Системы компьютерного зрения на базе сверточных нейронных сетей CNN (от англ. Convolutional Neural Networks) анализируют видео печати в реальном времени, выявляя дефекты слоев: нитеобразные структуры из-за неточностей температуры, отклонения в выкладке порошка или сплавлении меди. Датчики в установках L-PBF отслеживают стабиль-



Испытания клиновоздушного двигателя с тягой на 5 кН. Фото: LEAP 71

ность плавления, предупреждая о риске пористости в медных сплавах. Алгоритмы научились прогнозировать деформации меди при нагреве платформы свыше 100°C и корректировать параметры «на лету», минимизируя окисление порошка. А инструменты с проверкой печати могут автоматически анализировать 3D-модель на совместимость с медными сплавами: они проверяют минимальную толщину стенок (от 0,3 мм), углы свеса, термоусадку, рекомендуя постобработку, — например, горячее изостатическое прессование (HIP) для GRCor-84, повышающее плотность до 99,5%. Для повторного использования порошка ИИ оценивает уровень окисления частиц CuCrZr, сокращая отходы на 15–30% и экономя до \$50/кг.

Ключевые прорывы здесь — в устранении «слепых зон» производства. Традиционный подход требовал 3–6 месяцев ручных итераций для проектирования; ИИ сокращает его до 2–3 недель. Визуальный осмотр деталей после печати снижал брак на 20–30%; мониторинг слоя CNN повысил эффективность до 40%. Проблема непроплавов (LOF-пор), характерная для ИК-лазеров из-за отражения от меди, при использовании синих лазеров с их высоким поглощением (65–70%) существенно снижается.

Гибридные ИИ-системы объединяют генеративный дизайн (как Noyron) с контролем качества в реальном времени, сжимая цикл «проектирование — испытания» до одной недели. Цифровые двойники медных компонентов — теплообменников, сопел ракетных двигателей — будут предсказывать износ на основе данных испытаний, аналогичных тем, что получены для GRCor-84. А ИИ-стандартизация порошков решит проблему разброса свойств материалов: алгоритмы прогнозируют поведение медных композиционных материалов (графен-Cu, алмаз-Cu) при печати, гарантируя стабильность параметров от партии к партии.

ИИ не просто оптимизирует процессы — он создает инженерный язык, на котором

медь, древний и капризный металл, обретает новую выразительность. Широкий спектр применений — от создания сложных криволинейных каналов в ракетных двигателях до изготовления микрорадиаторов с идеальной геометрией — это стало уже нашей реальностью, выкованной алгоритмами.

Заключение

Аддитивное производство меди — это не просто технологический прорыв, а настоящая революция, которая перекраивает границы возможного. Медь, когда-то капризный металл, сопротивлявшийся традиционным методам обработки, превратилась в материал будущего, открывающий двери для инноваций в электронике, энергетике, аэрокосмической и других ведущих и наукоемких отраслях. Зеленые и синие лазеры стали тем волшебным ключом, который позволил раскрыть её потенциал, создавая детали с недостижимой ранее точностью и эффективностью.

Но самое удивительное — это даже не сами технологии, а то, как они меняют наше представление о производстве. Где раньше требовались десятки деталей и сложные сборки, теперь появляются единые, генеративно оптимизированные конструкции. Где когда-то были ограничения, теперь — свобода для инженерной мысли. Медь, многовековой спутник человечества, обретает новую жизнь, становясь материалом для космических двигателей, теплоотводов и энергоэффективных электромоторов.

Будущее уже здесь, и оно блесит медным отливом. Остается только задаться вопросом: какие ещё горизонты откроются, когда мы научимся полностью понимать этот удивительный металл? Одно можно сказать наверняка — путь вперёд будет таким же ярким, как луч лазера, плавящий медь в нечто совершенно новое.



Дмитрий Трубащевский



Прочти
меня на
сайте



Как технологии 3D-печати меняют промышленность и почему это важно уже сегодня

Аддитивные технологии больше не являются утопической мечтой — они стали реальным инструментом, трансформирующим промышленность. Металлическая 3D-печать, объединяющая инновации в материаловедении, цифровом проектировании и инженерии, уже сегодня переопределяет стандарты в ключевых отраслях, от авиастроения до медицины. В этой статье мы разберем, как это происходит, какие перспективы открываются и почему Россия активно участвует в этой технологической гонке.

Современная 3D-печать металлом — это не просто послойный синтез, а сложный процесс, где точность измеряется микронами. Наиболее распространенная технология — селективное лазерное плавление или L-PBF/SLM. Лазерный луч, сканирующий поверхность порошка по заранее созданной компьютерной программе, расплавляет частицы металлического порошка, слой за слоем создавая детали с уникальной геометрией.

Но L-PBF — не единственный метод. Электронно-лучевая плавка E-PBF/EBM использует поток электронов в вакууме, что идеально подходит для работы с тугоплавкими сплавами, такими как титан. А семейство технологий наплавки DED-P/W позволяет восстанавливать изношенные детали, добавляя металлический порошок или проволоку именно туда, где это необходимо.

Эти технологии уже доказали свою эффективность.

Например, Airbus с их помощью сократил сроки производства топливных форсунок с шести месяцев до двух недель, а SpaceX использует 3D-печать для создания ключевых компонентов ракетного двигателя Raptor 3.

Часто в основе металлической 3D-печати лежат именно высокотехнологичные порошки. Их производство включает атомизацию (распыление расплава металла в инертной среде), сфероидизацию (придание части-



цам идеальной формы) и многоступенчатую фильтрацию для достижения однородности. Например, для L-PBF критически важен строгий контроль granulometрии: размер частиц должен находиться в диапазоне 15–45 микрон, чтобы обеспечить оптимальное спекание и минимизировать пористость.

Когда речь заходит о металлической 3D-печати, многие сразу представляют себе титан — и не зря. Сплав Ti6Al4V является, пожалуй, самым известным в этой сфере. Его главный козырь — потрясающее сочетание прочности и легкости. Именно поэтому в авиации, особенно российской, без него никуда — от турбинных лопаток до элементов шасси.

Но что действительно впечатляет, так это медицинские применения. Титановые импланты настолько хорошо приживаются в организме, что со временем костная ткань буквально срастается с ними. Правда, есть нюанс — печатать такие детали приходится в аргонной среде (или в вакууме, если речь идет о технологии электроннолучевой плавки), иначе металл активно реагирует с кислородом.

Алюминиевые сплавы — совсем другая история. Они легче титана в полтора раза, и это открывает

массу возможностей там, где важен каждый грамм. Сплав AlSi10Mg, например, отлично подходит для автомобильных компонентов и авиационных интерьеров. Но если нужна особая прочность, стоит обратить внимание на зарубежный сплав Scalmalloy® — этот сплав со скандием по механическим свойствам приближается к титану, оставаясь при этом значительно легче.

С нержавеющей сталью ситуация особая. 316L — настоящая рабочая лошадка пищевой и химической промышленности. Из нее делают буквально всё — от форсунок для молочного производства до насосов для агрессивных сред. А вот сталь 17-4PH после печати требует дополнительной термообработки, зато получается невероятно прочной.

Но если говорить о на-

стоящих экстремалах, то это, конечно, жаропрочные стали. Inconel 718 спокойно выдерживает температуры, при которых большинство металлов уже течет как пластилин (более 1000°C). Неудивительно, что его используют в самых горячих точках авиадвигателей и ракетных соплах. Правда, обрабатывать его — то еще удовольствие, обычный инструмент тут быстро сдается.

Что радует, российские производители не отстают. «ВСМПО-Ависма» и «Нормин» делают отличный титановый порошок, «Валком-ПМ» (Русал) освоил производство алюминиевых сплавов, а «Центротех» работает над никелевыми сплавами. Конечно, пока не все получается идеально, но прогресс у всех отечественных производителей очевиден.



Минимизация количества компонентов в новом двигателе Raptor 3 по сравнению с Raptor 1 и 2 стала возможна благодаря аддитивному производству. Фото: SpaceX

Если десять лет назад 3D-печать металлами казалась чем-то из области фантастики, то сегодня это уже рабочий инструмент в самых разных отраслях. И что интересно — российские компании не просто пробуют технологию на вкус, а активно внедряют ее в реальное производство.

Возьмем, к примеру, космос. В Роскосмосе уже печатают детали спутников из титана и алюминия — там, где на счету каждый грамм, а прочность должна быть на высоте. Традиционные методы изготовления часто не позволяют создать оптимальную по весу и форме деталь, а вот 3D-печать с этой задачей справляется на ура.

Не отстает и атомная отрасль. В Росатоме напечатанные детали используют в реакторах на быстрых нейтронах. Помните тот самый ТВЭЛ, испытанный в 2022 году? Это был серьезный шаг — доказать, что напечатанные элементы могут работать в таких экстремальных условиях.

Но, пожалуй, самые впечатляющие результаты — в медицине. В том же питерском НИИ им. Вредена титановые импланты печатают индивидуально под каждого пациента. Представьте: вместо того чтобы подгонять человека под стандартные изделия, врачи создают имплант, кото-

рый идеально повторяет анатомию. Реабилитация после таких операций проходит быстрее, а результаты — лучше. Да и хирургические инструменты теперь можно делать буквально «под руку» конкретного врача — из той же нержавеющей стали.

Нефтяники и газовики тоже присматриваются к технологии. Газпром и Роснефть тестируют напечатанные клапаны и элементы насосов — те самые, что работают в агрессивных средах. Оказалось, что коррозионностойкие сплавы, напечатанные на 3D-принтере, порой служат дольше традиционных.

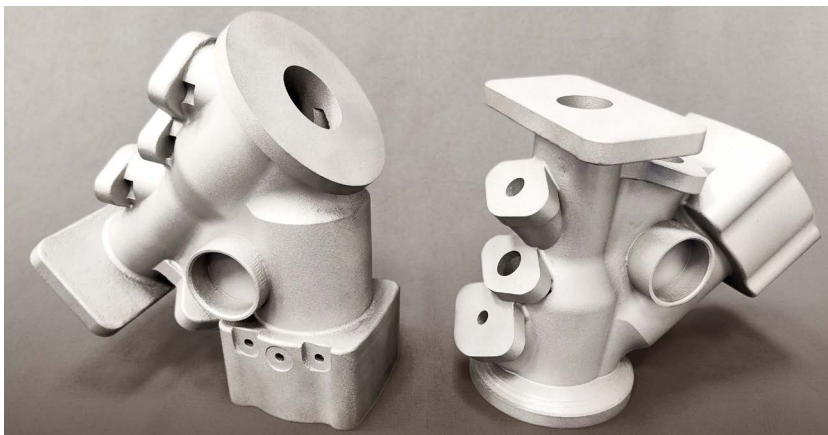
Авиастроители из Ростеха уже используют напечатанные детали в военных самолетах и беспилотниках. Тот же титан — легкий и прочный — идеально подходит для ответственных узлов. В судостроении ситуация похожая: турбинные лопатки, элементы охлаждения — все это уже можно печатать.

Но, пожалуй, самое нео-

жиданное применение — у РЖД. Они экспериментируют с печатью деталей для локомотивов: от подшипников до элементов тормозных систем. А ведь еще несколько лет назад это казалось чем-то из разряда «когда-нибудь в будущем».

Отдельная история — ремонт с помощью 3D-печати. Вместо того чтобы менять целую деталь, теперь можно восстановить только изношенную часть. Это и быстрее, и дешевле. В энергетике так чинят теплообменники, в судостроении — гребные валы, а в нефтянке — участки труб. Даже в оборонке технология пригодилась — когда запчасти сложно достать, печать становится настоящим спасением.

Кстати, есть и совсем неожиданные примеры. Та же «Балтика» печатает заготовки для головок розлива пива. Казалось бы, где пиво и где 3D-печать? Но оказывается, и здесь технология находит применение.



3D-печать заготовок под фрезеровку наливных головок для розлива пива и напитков для компании «Балтика».
Фото: СПИН



Технологическая платформа AM.TECH L-PBF-принтеров по металлам и сплавам. Фото: AM.TECH

Примеры успешных применений можно приводить и дальше, что в очередной раз доказывает, что российские госкорпорации активно внедряют 3D-печать металлами в свои производственные процессы, и это позволяет им решать сложные задачи, снижать затраты и повышать конкурентоспособность. В условиях санкций и необходимости импортозамещения 3D-печать становится стратегически важным инструментом для развития отечественной промышленности.

Основой любой аддитивной лаборатории и центра аддитивного производства является 3D-принтер. SLM-установки, такие как те, что представлены на технологической платформе AM.TECH, сочетают в себе высочайшую точность (до 20 микрон) и универсальность, работая с титаном, алюминием, сталью и другими материалами, что делает их пригодными для решения 80% промышленных задач. Эти принтеры полностью соответствуют концепции Industry 4.0, поддерживая автоматизацию процессов и удаленный кон-

троль. Для бизнеса это открывает не только возможность значительной экономии (до 50% за счет сокращения отходов), но и перспективы выхода на новые рынки.

Сегодня металлическая 3D-печать — это не просто технологическая новинка, а реальный инструмент для трансформации производства, способный сократить время выхода новой продукции в десятки раз, а это позволит вам быть намного проворнее конкурентов.

Но дело не только в скорости. Эти технологии открывают возможности для создания деталей со сложной геометрией, которые просто невозможно изготовить традиционными методами. Речь о топологически оптимизированных конструкциях, облегченных элементах с внутренними каналами охлаждения — о тех решениях, которые раньше оставались лишь на бумаге.

Еще один важный момент — логистика. Вместо того чтобы хранить на складах тонны запчастей, можно перейти на модель «печать по требованию». Это значит

меньше складских затрат, меньше «замороженных» денег в запасах и при этом — полная готовность к любым запросам клиентов.

Оборудование, которое представлено на AM.TECH, — это не траты, а инвестиции с понятной отдачей. Взгляните на опыт SpaceX: они смогли сократить цикл разработки с нескольких лет до месяцев именно благодаря аддитивным технологиям.

В заключение хочется подчеркнуть, что металлическая 3D-печать больше не является уделом энтузиастов. Она становится основой промышленной революции XXI века, и Россия, несмотря на все сложности, занимает в этом процессе достойное место. Оборудование, которое уже сегодня выпускается под маркой «Сделано в России», превращает эту революцию из абстрактной мечты в реальный инструмент для развития бизнеса. Если вы еще не задумывались о внедрении аддитивных технологий, сейчас — самое время начать. 

Дмитрий Трубаhevский

Прочти
меня на
сайтеПрочти
меня на
сайте

Часть 1 Часть 2

Научный задел и рыночный передел

Каковы они, реалии российского аддитивного производства? Несмотря на прорывные разработки в этой сфере, промышленность продолжает скептически относиться к новым технологиям, предпочитая проверенные, традиционные решения.

Почему конструкторы до сих пор не верят в аддитивные материалы? Как системы непосредственного контроля за процессом 3D-печати и искусственный интеллект могут перевернуть контроль качества в 3D-печати? И главное — сможет ли Россия догнать в аддитивке Китай и Запад, или мы навсегда останемся в роли догоняющих?

На эти и другие острые вопросы отвечает Иван Алексеевич Иванов — заместитель генерального директора – директор ИМИМ (ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ»)/научный руководитель Передовой инженерной школы МАСТ (Университет науки и технологий МИСИС), один из ведущих экспертов в области аддитивного производства.

Честный разговор о прорывах, препонах и будущем высокотехнологичной промышленности — в нашем материале.

– Когда речь заходит о стоп-факторах, тормозящих широкое внедрение аддитивного производства в стране, обычно в первую очередь упоминается недоста-

ток нормативно-технической документации, необходимой для легитимизации аддитивных технологий при производстве изделий ответственного применения. Проблема действительно хроническая. Поделитесь, пожалуйста, вашим видением ее решения.

– Действительно, отсутствие нормативно-технической документации (сокращенно НТД) является одним из ключевых барьеров внедрения аддитивных технологий. Давайте попытаемся разобраться в причинах низкого темпа разработки НТД, необходимой для применения 3D-печати в ответственном машиностроении. Под ответственным машиностроением понимается энергетическое, в том числе атомное машиностроение, авиакосмическая промышленность и прочие отрасли, где цена ошибки – это человеческие жизни и/или техногенная катастрофа. В этих отраслях в части материалов и конструкторских решений присутствует понятный консерватизм, который исходит из того, что луч-



ше использовать проверенные временем решения и не экспериментировать с новыми материалами и технологиями. Для того, чтобы преодолеть этот барьер, требуется доказать, что свойства аддитивных материалов как минимум не хуже, чем у полученных традиционно, при этом показывать это придется на изделиях, которые уже спроектированы, причем, спроектированы специально под классические производственные технологии. В связи с этим основная задача — активно развивать научный задел по направлению АТ, системно формировать базы данных свойств аддитивных материалов, показывать, что технически есть возможность контролировать качество материала при серийном производстве изделий со сложной внутренней структурой. Развитие научного задела приведет к формированию технических решений, а это, в свою очередь, — база для обоснования НТД.

Собственно, АО «НПО «ЦНИИТМАШ» вообще и ИМИМ как подразделение в частности, формирует научный, технический заделы и активно участвует в работе над формированием НТД. Приведу несколько примеров. В 2016 году мы разработали SLM-установку 3D-печати MeltMaster3D-550, на которой было напечатано самое габаритное в РФ изделие специального назначения из жаропрочного сплава ВЖ-159 с характерным размером 600 мм и весом более 50 кг. Изделие соответствовало всем требованиям технического задания. АО «НПО «ЦНИИТМАШ» участвует в комплексной научной программе Госкорпорации «Росатом», в рамках которой разрабатываются новые технологические подходы, связанные с управлением структурой и свойствами (по сути — качеством) аддитивного материала, а также внедряются in-situ системы контроля, позволяющие оценивать равномерность нанесения порошкового слоя и теплофизические условия формирования твердой фазы. Использование in-situ



Иванов Иван Алексеевич.

Фото: ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

систем контроля — шаг вперед в разработке новых методик оценки соответствия требованиям, предъявляемым к аддитивному материалу изделия с развитой внутренней структурой. Можно предположить, что использование томографических исследований исправило бы ситуацию, но в условиях серийного производства проведение томографии слишком затратно по времени и ресурсам, к тому же этот метод позволяет идентифицировать только физическую неоднородность (поры, трещины), оставляя за бортом такие параметры качества, как структура и механические свойства.

Сейчас на базе накопленного опыта наша команда работает над новыми подходами к цифровой паспортизации аддитивных изделий и материалов. Важно, что под цифровым паспортом материала понима-



Установка MeltMaster3D-550 и напечатанная крыльчатка. Фото: Страна Росатом

ется материал каждого синтезированного изделия. Ключевой особенностью разрабатываемых подходов, во-первых, является фиксация цифрового следа формирования материала в процессе 3D-печати — потока данных от систем непосредственного контроля. И, во-вторых, разработка цифровых двойников, связывающих данные от систем контроля со структурой, механическими свойствами, а также с физической неоднородностью.

Таким образом, ускорение темпов развития аддитивного производства требует комплексного подхода, включающего научные исследования, нормативное регулирование и внедрение цифровых инструментов контроля качества. Только так можно преодолеть недоверие конструкторов и регулирующих органов к аддитивным технологиям и обеспечить широкое применение аддитивных технологий в ответственном машиностроении.

– Расскажите подробнее о конкретных шагах, касающихся разработки нормативно-технической документации, принятых подразделением, которым вы руководите, и о том, каких результатов уже удалось достичь.

– Мы уже говорили, что отсутствие нормативно-технической документации суще-

ственно замедляет внедрение аддитивных технологий. Представители АО «НПО «ЦНИИТМАШ» входят в рабочую группу, которая ведет активную работу в рамках плана мероприятий по внедрению на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ) конкретных типов изделий, полученных с применением аддитивных технологий. Очевидно, это задача непростая и для применения АТ в ОИАЭ потребуется разработать документы по стандартизации, содержащие информацию о свойствах АТ материала; порядок оценки соответствия в разных формах; аттестованные методики испытаний и контроля; создать базу данных свойств материалов в составе изделий; провести корректировку ФНП. Хочу отметить, что достаточно большой задел, которым можно воспользоваться, сформирован для традиционных процессов сварки и наплавки, являющихся родственными аддитивным технологиям. Естественно, необходимо учитывать особенности аддитивного процесса.

– Упомянутые вами системы контроля в реальном времени наверняка будут работать с привлечением возможностей искусственного интеллекта?

– Да, конечно. Важно отметить, что in-situ системы контроля рассматриваются как часть системы управления 3D-принтером.

Отсутствие нормативно-технической документации существенно замедляет внедрение аддитивных технологий. Представители АО «НПО «ЦНИИТМАШ» входят в рабочую группу, которая ведет активную работу в рамках плана мероприятий по внедрению на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ) конкретных типов изделий, полученных с применением аддитивных технологий/

От систем контроля приходит поток данных, который необходимо проанализировать. Именно для анализа целесообразно воспользоваться алгоритмами искусственного интеллекта. Это позволит не просто идентифицировать отклонение от технологического процесса, а предсказывать влияние текущей траектории процесса на конечное качество выращиваемых изделий. И, если прогноз окажется неудовлетворительным, то, не останавливая печать, можно “на лету” изменить стратегию печати, тем самым обеспечив требуемое качество продукции. В качестве простого примера: можно идентифицировать деградацию мощности лазерного излучения и скорректировать ее, тем самым обеспечив требуемое энергозатрачивание.

Таким образом, использование систем контроля в сочетании с технологиями машинного обучения и реализацией обратной связи открывает новые горизонты для повышения качества и эффективности аддитивного производства. Это направление уже сейчас демонстрирует значительный потенциал, но, тем не менее, требует дальнейшего развития.

– А вы в ИМИМ ЦНИИТМАШ используете или планируете использовать алгоритмы ИИ?

– В Институте мы активно используем искусственный интеллект для решения разных задач, в том числе для направления аддитивных технологий. Приведу несколько примеров. Первый связан с использованием инструментов для диагностики корректности установки лазерно-оптических

систем. Вторым примером является использование машинного обучения для разработки режимов 3D-печати новых материалов. На базе собранной статистики разработана модель, которая существенно уменьшает число тестовых печатей образцов при подборе режима сплавления сплошного металлического материала, контуров, поддержек и ячеистых структур.

– Всё это касается в основном технологии СЛС?

– Отвечая на ваш вопрос касательно технологии СЛС, поясню: да, для нас это наиболее знакомая и хорошо изученная технология. Но хочу отметить, что в рамках реализации комплексной научной программы Госкорпорации «Росатом» исполнителями — а это АО «НИИ НПО «ЛУЧ», АО «НИИГрафит» и пр. — был охвачен весь спектр технологий и разработано соответствующее оборудование.

– Насколько сложно реализовать подобные системы контроля для гибридного производства, которое может сочетать в себе две аддитивные технологии и/или традиционную механообработку? И как регламентировать такие процессы в нормативной документации?

– Чтобы уверенно ответить на этот вопрос, нужно наработать соответствующий опыт. В настоящий момент планируется сотрудничество с Псковским государственным университетом по оснащению их гибридных установок камерами на базе КМОП матриц для контроля параметров в зоне сплавления. Результаты работы покажут, насколько это легко или сложно.



– Как вы оцениваете текущее состояние российского рынка SLM-технологий? Мы наблюдаем несколько успешных игроков, но при этом в целом на рынке складывается ситуация, как среди хищников в прерии, где каждый борется за выживание, порой используя не совсем корректные методы конкуренции. Безусловно, конструктив вносят АРАТ и КАТ, которые пытаются объединить усилия отечественных разработчиков, чтобы обеспечить реальное импортозамещение. Как вы считаете, насколько такие инициативы актуальны сегодня? Или нам все же нужно делать ставку на здоровую конкуренцию, которая, признаем честно, в России пока не сформировалась?

– Действительно, сейчас большое количество отечественных производителей аддитивных установок вывели на рынок 3D-принтеры на любой вкус и в разном ценовом диапазоне. Более того, на текущий момент имеются в продаже установки, построенные на отечественных источниках лазерного излучения, отечественных системах сканирования и использующие отечественные программно-аппаратные средства для управления процессом 3D-печати. В качестве примера приведу двухлазерную установку MeltMaster3D-300HT, разработанную в нашем институте, в которой используются источники лазерного излучения производства ВНИИТФ (ЯОК, Госкорпорация «Росатом») и сканато-

ры разработки АО «НИИ НПО «ЛУЧ» (Научный дивизион Госкорпорации «Росатом»).

Что касается ситуации на рынке в целом, полагаю, что ключевая проблема не в количестве установок и их производителей, а в том, что наш рынок АТ крайне мал — всего 1% от мирового. Его потенциал пока не реализован и наша общая задача – ускорить его формирование. Как только рынок сформируется, уверен, работы хватит всем.

– Какие шаги реализуются в вашем институте для ускорения внедрения аддитивных технологий в реальное производство?

– Все инициативы по внедрению аддитивных технологий, в которых я и мои коллеги участвуют, связаны с концепцией «треугольника» М. А. Лаврентьева «наука, кадры, производство», которая легла в основу создания Сибирского отделения Академии наук СССР и Новосибирского Академгородка.

Первое – наука. Это участие нашего института в ряде проектов, входящих в комплексную научную программу Госкорпорации «Росатом». По сути, это формирование научного задела, о котором я говорил ранее. Второе – кадры. В Университете науки и технологий МИСИС совместно с Научным дивизионом Госкорпорации «Росатом» при участии сотрудников ЦНИИТМАШ была создана и успешно функционирует передовая инженерная школа МАСТ (Материаловедение, Аддитивные и Сквозные Технологии), в которой запущена специальная программа магистратуры «Аддитивные технологии». В ЦНИИТМАШ уделяется много внимания молодежи, мы смогли обеспечить возможность учиться и работать одновременно. Такой подход позволяет формировать собственный кадровый потенциал, участвующий в решении реальных задач предприятия. И, самое важное, – производство. Наш институт активно участвует в разработке и внедрении аддитивных технологий, (включая работу по созда-

нию НТД), на предприятиях, производящих высокотехнологичную продукцию, в том числе специального назначения. Все эти шаги связаны друг с другом и направлены на преодоление имеющихся барьеров для ускорения формирования рынка аддитивных технологий в РФ.

– Складывается впечатление, что в России слишком сосредоточились на разработке СЛС-систем, практически игнорируя другие направления. Западные и китайские компании активно развивают высокопроизводительные системы, например, проволоочной наплавки, мультиматериальной печати, фотополимерные технологии и альтернативные металлопорошковые методы (как у компании Seurat). Не рискуем ли мы заикнуться на технологии с ограниченным потенциалом развития, упустив гораздо более перспективные векторы?

– Я полностью согласен с тем, что СЛС-технологии сегодня находятся в фокусе внимания, возможно, даже избыточного. Тем не менее, важно понимать, что это лишь одна из граней аддитивного производства. В рамках комплексной научной программы Росатома мы активно работаем над развитием других направлений, которые также имеют огромный потенциал.

Один из примеров — создание гибридных установок, сочетающих наплавку, фрезеровку и лазерную обработку, что позволяет добиваться высокой точности и качества. Эти установки уникальны тем, что объединяют сразу несколько технологий: наплавку, фрезерную обработку и лазерные методы. Такой подход позволяет создавать изделия с высокой точностью и сложной геометри-

ей, что особенно важно для современного производства.

Еще одно перспективное направление — проволоочные технологии наплавки WAAM/LWAM/EBF3. Они предоставляют широкие возможности для контроля структуры и свойств материала, а также позволяют получать качественную поверхность готовых изделий. По сути, LWAM схожа с SLM в плане управления энергоподводом, но при этом дает возможность четко отслеживать тепловую историю процесса. Это крайне важно для создания деталей, которые будут работать в экстремальных условиях.

Я глубоко поддерживаю вашу точку зрения о необходимости развивать не только SLM, но и другие аддитивные технологии. И радует, что в России этот процесс уже идет. Мы наблюдаем, как развивается более сбалансированный и технологически разнообразный подход к аддитивному производству.

– Несколько лет назад правительственные чиновники прогнозировали, что Россия сможет к 2027–2030 году занять около 10% мирового рынка аддитивного производства. Сейчас, с учётом геополитической ситуации, эти планы кажутся нереалистичными. Не рискуем ли мы потерять и то, что имеем, безнадёжно отставая от Китая, который активно продвигает своё оборудование через дилеров?

– Конечно, конкурировать с Китаем и другими странами исключительно сложно. Однако ускорить в РФ темп роста рынка аддитивных технологий вполне возможно. Ранее мы уже обсуждали ряд практических шагов, которые предпринимаются для внедрения АТ. Но я бы хотел еще раз заострить внима-

Конкурировать с Китаем и другими странами исключительно сложно. Однако ускорить в РФ темп роста рынка аддитивных технологий вполне возможно. Ранее мы уже обсуждали ряд практических шагов, которые предпринимаются для внедрения АТ.

ние на инициативах по разработке семейства стандартов с требованиями к цифровому паспорту аддитивного материала и изделия, а также требований к аддитивному оборудованию. Ключевой особенностью этого семейства стандартов является фиксация условий формирования параметров качества материала при 3D-печати изделия. Уже в этом году планируется создать на базе Альметьевского государственного технологического университета «Высшая школа нефти» центр аддитивных технологий, оснащенный оборудованием, соответствующим требованиям разрабатываемых стандартов. Далее на базе этого центра планируется запустить опытное производство изделий для нефтяной отрасли и начать формировать открытую базу данных свойств аддитивных материалов.

Хотя массовый прорыв нашей продукции АТ на мировой рынок в ближайшее время маловероятен, в стратегических для государства отраслях мы можем добиться серьёзных результатов. Как только появятся первые успешные кейсы с подтверждённым качеством продукции, процесс может получить экспоненциальное развитие. Возможно, 10% и более — это слишком амбициозная цифра, но переломить ситуацию в приоритетных направлениях — реально.

– Не мешает ли нам закрытость границ в получении новых знаний о мировом рынке, его прорывах и трендах?

– Санкции не мешают получать знания – просто всё стало дороже. В России уже есть значительные разработки в области аддитивных технологий. У нас появилось много инжиниринговых компаний, создающих собственные принтеры. Есть как минимум две компании, производящие отечественные лазерные источники, и несколько — выпускающих системы сканирования лазерного излучения.

Что касается материалов, у нас достаточно производителей качественных порошков. Появляются и собственные робо-

тизированные системы с отечественными компонентами. Санкционное давление в целом подтолкнуло российские предприятия к созданию собственного научного и технического задела.

Так что нет, закрытость границ скорее ускоряет процесс разработки собственных узлов и комплектующих, а также появление отечественных конструкторских и научных школ по направлению АТ.

– Насколько российские компоненты для аддитивных технологий (лазеры, сканеры и др.) сегодня надежны, доступны и готовы к использованию коммерческими компаниями? Насколько оправданы распространённые опасения по поводу того, что они якобы значительно уступают западным и китайским аналогам? Мы часто слышим, что после неудачного опыта с российским оборудованием компании отказываются не только от конкретного производителя, но и от аддитивных технологий в целом.

– Безусловно, приобретение готового китайского оборудования проще, но это путь, ведущий к технологической зависимости. Нам необходимо развивать собственные решения. Да, первые неудачи с российским оборудованием отталкивают



Примеры деталей, напечатанных на установках MeltMaster3D.
Фото: ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

Безусловно, приобретение готового китайского оборудования проще, но это путь, ведущий к технологической зависимости. Нам необходимо развивать собственные решения. Да, первые неудачи с российским оборудованием отталкивают заказчиков, но без практического внедрения и обратной связи мы не сможем совершенствовать технологии.

заказчиков, но без практического внедрения и обратной связи мы не сможем совершенствовать технологии. Это сложный путь, но единственный, который обеспечит реальную технологическую независимость страны в аддитивных технологиях. Именно поэтому мы сознательно идём на риск использования отечественных компонентов в своём оборудовании: источников концентрированной энергии, систем сканирования лазерного излучения, отечественных программно-аппаратных средств. Для большинства разрабатываемых у нас установок уже используются отечественные узлы. Так, например, для установки MeltMaster3D-1000C с рабочей зоной 1000 мм на 1000 мм – используется отечественная кластерная восьмилазерная система сканирования производства АО «НИИ НПО «ЛУЧ». Конечно, не всё гладко, и есть определённые сложности, но наши установки работают, причем, не хуже, чем иностранные аналоги. Установки можно посмотреть в АО «НПО «ЦНИИТМАШ» в любое время.

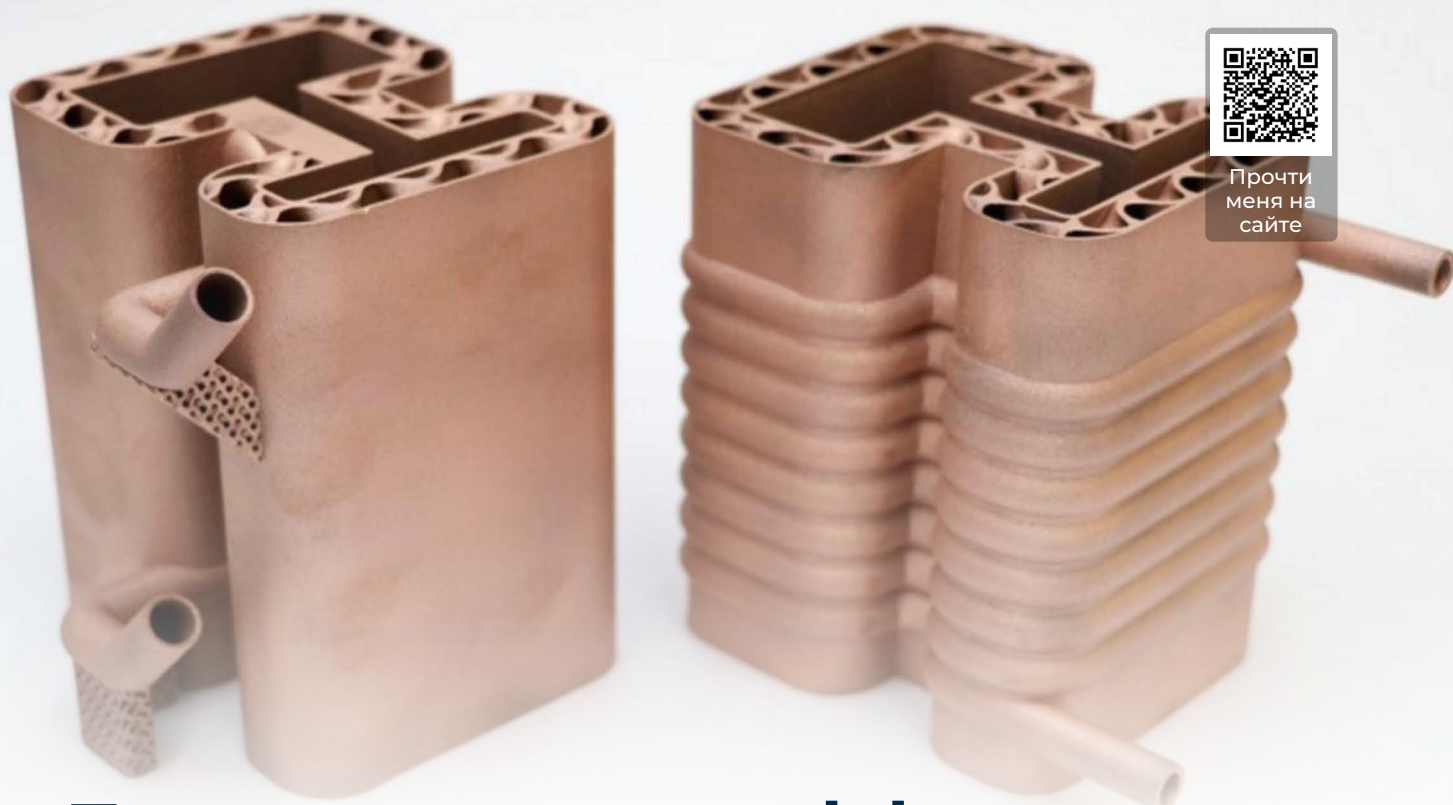
– До сих пор не появился безотказный метод убедить государство серьезнее относиться к развитию аддитивных технологий. Согласно исследованию KAT, в 2024 году объем российского рынка составил 15,5 млрд. рублей — это капля в море по сравнению с другими направлениями из высокотехнологичного сегмента индустрии – с той же роботизацией, сферой IT. Может быть, стоит вкладывать в 10 раз больше, чтобы показать реальный потенциал аддитивки не для прототипирования

– здесь уже всё работает, а для сложной промышленной продукции, поддержки нового инженерного мышления у молодежи и заводских конструкторов?

– Мы приходим к выводу о том, что главная проблема аддитивного производства – недоверие промышленности. Можно сколько угодно рассказывать о преимуществах аддитивных технологий, но без конкретных успешных кейсов это не сработает. Государство поддерживает отрасль через ассоциации и научные программы, но для прорыва нужны долгосрочные инвестиции и практические результаты.

Нам нужно создавать прецеденты – реальные изделия, прошедшие полный цикл исследований, демонстрирующие повторяемость свойств, экономию материалов до 95%. Когда появятся такие примеры и распределенная база данных о свойствах материалов, процесс пойдет экспоненциально. Тогда рынок начнет развиваться сам, даже без дополнительных мер. Создание таких прецедентов должно стать частью национальной технологической политики: пилотные проекты с высокой степенью открытости, стандартизации и промышленной апробации должны быть включены в государственные программы импортозамещения и технологического суверенитета. Только так можно запустить цепную реакцию доверия, инвестиций и масштабирования, которая выведет аддитивные технологии на уровень системообразующих отраслей. 

**Беседовали: Дмитрий Трубашевский
и Светлана Бакарджиева**



Прочти
меня на
сайте

Быстрее, легче, эффективнее

Оптимизация фотонного поглотителя с использованием аддитивных технологий и конформных каналов охлаждения

В современных синхротронных установках требования к точности и надёжности оборудования постоянно растут. Это связано с увеличением яркости пучка и необходимостью поддерживать стабильность его положения на уровне нанометров. Одна из ключевых задач, стоящих перед инженерами, — оптимизация компонентов, работающих в условиях экстремальных тепловых нагрузок. Среди таких элементов ключевую роль играют фотонные поглотители — устройства, защищающие оборудование от избыточного излучения, возникающего при работе ондуляторов и других источ-

ников синхротронного излучения.

Традиционно такие поглотители изготавливаются методом механической обработки и вакуумной пайки медных трубок, формирующих систему охлаждения. Однако этот подход имеет ряд ограничений: сложные внутренние геометрии реализовать невозможно, процесс сборки трудоёмкий, а качество каждого соединения требует тщательного контроля. В результате на изготовление изделия уходит много времени, увеличивается его масса и всё это приводит к снижению эффективности системы охлаждения.

И здесь на помощь приходят технологии аддитивного производства (АП), в частности методы лазерного (L-PBF/SLM) и электронно-лучевого (E-PBF/EBM) плавления порошков. Эти технологии революционно меняют подход к проектированию и изготовлению подобных компонентов.

Благодаря уникальной свободе формообразования стало возможным создание конформных охлаждающих каналов, точно повторяющих контуры нагреваемых поверхностей. Это позволяет улучшить теплообмен, снизить температуру элемента и повысить его долговечность за счёт

уменьшения термического напряжения.

В ходе одного из последних исследований, проведённого на базе Diamond Light Source, был предложен и протестирован новый подход к созданию поглотителя с использованием аддитивного производства из медного порошка. Цель состояла в том, чтобы разработать и сравнить две концепции внутренней структуры охлаждения — «горизонтальную» и «спиральную». Обе модели были созданы на основе упрощённой версии существующего поглотителя, что позволило сосредоточиться на ключевых участках теплопередачи и провести численное моделирование термических характеристик.

Наиболее эффективной в ходе испытаний оказалась «горизонтальная» модель поглотителя. В сравнении с исходной конструкцией, использовавшейся в Diamond Light Source, она продемон-

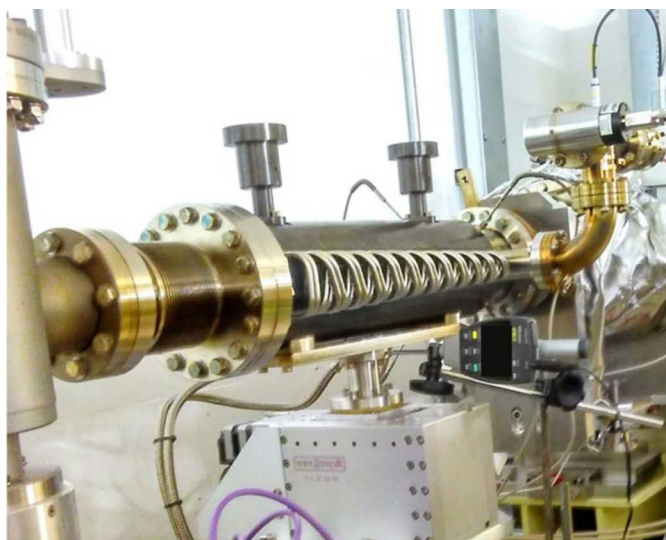
стрировала впечатляющие результаты: снижение максимальной температуры на 11%, уменьшение перепада давления в системе охлаждения на 82% и сокращение массы на 86%. Ключевым достижением стало объединение 21 отдельной запаянной трубки в монолитную конструкцию, что значительно упростило производство и повысило надёжность.

Исходный поглотитель длиной 600 мм с множеством ручных паяных соединений, хотя и обеспечивал необходимую прочность, отличался высокой трудоёмкостью изготовления и потенциальной уязвимостью к утечкам. Для оптимизации были разработаны две альтернативные модели. Горизонтальная версия с увеличенными до 8 мм каналами и минимальным количеством изгибов показала лучшие результаты по совокупности параметров. Альтернативная спиральная модель с плотными канала-

ми, несмотря на хорошие показатели теплообмена, уступила по гидродинамическим характеристикам.

Окончательные выводы сделаны на основе комплексных испытаний, включавших как компьютерное моделирование, так и натурные эксперименты с фотополимерными прототипами. Полученные данные убедительно доказали преимущества «горизонтальной» конфигурации для практического применения в синхротронных установках.

Переход на аддитивное производство медных поглотителей столкнулся с рядом технологических сложностей. Главная проблема - высокая отражательная способность меди в инфракрасном диапазоне, осложняющая лазерное плавление. Однако даже при использовании доступных низкоомных систем удалось достичь приемлемого качества печати.



Пример традиционно изготовленного медного поглотителя с паянными в вакууме медными охлаждающими трубами (слева) и из нержавеющей стали (справа).

Исследование эталонных образцов выявило среднюю шероховатость 7-9 мкм на внешних поверхностях и 15-20 мкм внутри каналов, что требует дополнительной обработки для вакуумных применений. Точность геометрии оказалась на высоком уровне – отклонения не превысили 0,1 мм. Уровень пористости в 6,2%, хотя и превышает идеальные 3%, стал значительным улучшением по сравнению с предыдущими работами.

Анализ показал, что основная причина дефектов связана не с настройками лазера, а с несовершенством системы подачи порошка. Для решения этой проблемы рассматриваются два подхода: замена щеточных ракелей на жесткие лезвия и применение горячего изостатического прессования

готовых деталей. Эти меры должны обеспечить необходимую герметичность для работы в условиях сверхвысокого вакуума.

Применение решётчатых структур позволило значительно снизить массу детали, однако привело к небольшому (около 4%) росту температуры. Этот эффект объясняется уменьшением объёма теплопроводящего материала между нагреваемой поверхностью и охлаждающими каналами. Компенсировать такое температурное увеличение можно за счёт оптимизации геометрии внутренних полостей и увеличения площади контакта.

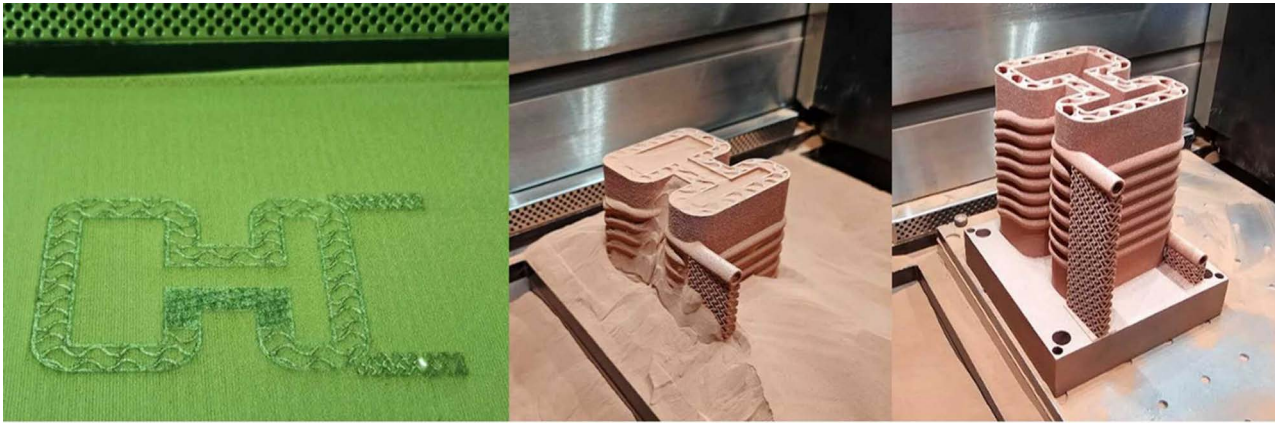
Особое внимание в исследованиях уделялось гидравлическому сопротивлению системы охлаждения. Эксперименты с фотополимерными прототипами

показали, что спиральная конфигурация, несмотря на лучшие показатели теплообмена, создаёт значительно больший перепад давления (3,68 бара) по сравнению с горизонтальной моделью (0,33 бара). Это подчёркивает важность поиска баланса между эффективностью теплопередачи и энергопотреблением системы.

Расчёты и испытания выявили, что уменьшение длины каналов даёт больший эффект в снижении гидравлического сопротивления, чем увеличение их диаметра. Горизонтальная модель с оптимизированной геометрией продемонстрировала впечатляющее 82%-ное снижение перепада давления по сравнению с традиционной конструкцией (1,85 бара), что открывает перспективы для значительного уменьшения энергопотре-



Напечатанные на 3D-принтере фотополимерные прототипы с концепцией горизонтальной и спиральной конструкции



(a)

(b)

(c)

Процесс L-PBF (a), медный напечатанный поглотитель с катушкой на платформе печати принтера в порошке (b) и без порошка (c)

бления насосов и снижения вибраций в системе. Эти результаты подтверждают важность тщательной обработки геометрии каналов при проектировании охлаждающих систем.

Аддитивное производство открывает новые горизонты не только в плане функциональности, но и в контексте экономики. За счёт уменьшения количества деталей и отказа от ручной пайки время изготовления может быть сокращено почти вдвое. Если ранее производство одного поглотителя занимало около пяти месяцев, то теперь, с учётом всех этапов постобработки, можно уложиться в два месяца.

Помимо очевидных технических преимуществ, внедрение аддитивных технологий в производство поглотителей благотворно повлияет на всю инфраструктуру синхротронной станции. Уменьшение размеров устройств позволит освободить пространство

для новых, более сложных экспериментальных установок. Снижение уровня вибраций, связанных с работой насосов, улучшит стабильность пучка, что особенно важно для будущих проектов с повышенными требованиями к точности.

Однако массовому внедрению аддитивных технологий пока препятствует ряд нерешённых задач. Предстоит кропотливая работа по оптимизации режимов печати, созданию новых методов финишной обработки и всестороннему исследованию характеристик получаемых материалов. Особую сложность представляет точная оценка теплопроводности аддитивно изготовленных медных деталей в сравнении с традиционной бескислородной медью (OFHC) — это важнейший параметр для теплонагруженных элементов. Не менее актуальными остаются проблемы устранения микропористости и соблю-

дения жёстких допусков на рабочих поверхностях, где даже незначительные отклонения могут критически повлиять на работоспособность всего узла.

Представленное исследование демонстрирует реальный потенциал аддитивного производства в области создания высокотехнологичных компонентов для синхротронов. Оптимизация через конформные каналы охлаждения, уменьшение массы и объёма, сокращение цикла изготовления — всё это делает АП не просто альтернативой традиционным методам, а настоящим прорывом в подходе к проектированию и производству.



Дмитрий Трубашевский

Адаптированный источник:
<https://journals.iucr.org/s/issues/2025/04/00/gui5005/index.html>.

Прочти
меня на
сайте

metamorphic

University of
Nottingham

TSL TORR SCIENTIFIC LTD

Science and
Technology
Facilities Council
RAL SpaceCo-funded by:
Project: 10033462Innovate
UK

DfAM — это не просто «напечатать деталь». Это шанс переизобрести её с нуля

Знакомо звучит? Берёте старую деталь, немного облегчаете, добавляете пару рёбер жёсткости — и вуаля, «оптимизированная для 3D-печати» версия готова. Технически да, это DfAM (Design for Additive Manufacturing). Но по сути — всего лишь косметическая процедура. К слову, помимо DfAM, которое все чаще использует сообщество, существуют и другие термины, отражающие различные подходы к проектированию и производству с учетом возможностей и ограничений аддитивных технологий: DfX – Design for X (проектирование для X, где X – любая характеристика/ требование), DfM – Design for Manufacturing (проектирование для производства), MfAM – Manufacturing for Additive Manufacturing (производство для аддитивного производства).



DfX – Design for X (проектирование для X, где X – любая характеристика/требование), DfM – Design for Manufacturing (проектирование для производства), MfAM – Manufacturing for Additive Manufacturing (производство для аддитивного производства).

В мире промышленного дизайна вершится тихая революция. Традиционные подходы к проектированию сталкиваются с новыми возможностями аддитивного производства, заставляющими инженеров пересматривать фундаментальные принципы своей работы. Это не просто смена инструментов — это трансформация самого мышления.

Возьмем концепцию DfX — проектирование для конкретных характеристик. Здесь «X» становится свое-

образным компасом, указывающим на истинные приоритеты разработки. Когда инженер фокусируется на стоимости (DfCost), весе (DfLightweight) или простоте сборки (DfAssembly), он часто сталкивается с необходимостью мучительных компромиссов. Аддитивные технологии ломают эти барьеры, предлагая решения, где деталь может быть одновременно и легкой, и прочной, и экономичной. Секрет в том, чтобы перестать рассматривать эти параметры

как взаимоисключающие.

Традиционный DfM — проектирование для производства — всегда напоминал игру с жесткими правилами. Углы выемки для литья, доступность для инструмента при механической обработке — эти ограничения годами формировали облик промышленных изделий. Но в мире аддитивных технологий старые правила перестают работать. Вместо них появляются новые соображения: как поведет себя материал при

*Проект QTEAM создания квантового космического гравиметра – полимерный прототип и отпечатанный корпус.
Фото: Metamorphic Additive Manufacturing Ltd.*



послойном наплавлении, где возникнут термические напряжения, как ориентация детали на платформе повлияет на ее конечные свойства. Парадоксально, но, чтобы освоить DfM для аддитивного производства, сначала нужно забыть о традиционных производственных ограничениях.

Настоящий прорыв начинается с DfAM — проектирования, которое использует уникальные возможности аддитивных технологий. Здесь мы уже не адаптируем прежние решения, а создаем принципиально новые. Топологическая оптимизация превращает массивные металлические блоки в ажурные структуры, напоминающие костную ткань, — и это не эстетическое решение, а

строгий инженерный расчет. Внутренние каналы и полости становятся не проблемой для производства, а преимуществом, позволяющим создать системы охлаждения или подачи жидкости прямо внутри детали.

Но настоящая магия происходит на уровне MfAM, когда производственные специалисты перестают быть просто исполнителями и становятся полноправными соавторами проекта. Они знают, как небольшой поворот детали на платформе может сократить время печати на 15%, где добавить технологические полости для последующей обработки, как распределить материал, чтобы минимизировать внутренние напряжения.

Эволюция от DfM через DfAM к MfAM — это путь от

вопроса «Как мы всегда это делали?» через «А что, если сделать иначе?» или «Как нам перевести эту деталь на печать?» к «Как сделать это идеально?». Современные CAD-системы уже стирают границы между этими этапами, позволяя инженерам сразу видеть последствия своих решений. Но главное изменение — культурное. В передовых компаниях исчезает разделение на «конструкторов» и «технологов», уступая место междисциплинарным командам, где дизайнер, инженер и специалист по материалам работают вместе с первым днём проекта.

Возможно, именно в этом секрет тех «инопланетных» решений, которые начинает создавать промышленность. Когда стираются не только границы между проектиро-

*Квантовый космический гравиметр
проекта QTEM в сборе.
Фото: Metamorphic Additive
Manufacturing Ltd.*



metamorphic



University of
Nottingham
UK · CHINA · MALAYSIA



Science and
Technology
Facilities Council

Co-funded by:
Project: 10031462



Innovate
UK



Как же перейти от «печатабельного» к «идеальному»? Во-первых, забудьте о стандартных CAD-подходах. Генеративное проектирование — не панацея, иногда нужны расчёты «на салфетке». Во-вторых, спрашивайте «почему» на каждом шагу: почему эта деталь имеет такую форму? Почему здесь толщина 3 мм? Часто ответ — «потому что так делали всегда». И главное — найдите в команде «еретика», который будет ставить под сомнение устоявшиеся подходы.

ванием и производством, но и границы в головах инженеров, открывается пространство для по-настоящему инновационных решений. И это только начало новой эры в промышленном дизайне.

Поэтому лучше каждый новый сложный проект следует начинать с того, чтобы сознательно убрать из головы всё, что вы знали о «нормальных» методах производства. Потому что настоящая сила аддитивных технологий — не в повторении старого, а в создании того, что раньше было попросту невозможно.

Форма должна соответствовать функции, даже если результат напоминает арт-объект. Структура — это не шаблонные сетчатые заполнения, а топология, идеально работающая с конкретными нагрузками. Материал — не просто «нержавейка или титан», а сложное распределение свойств в объёме, как в живой ткани.

Да, это сложнее, чем просто загрузить модель в слай-

сер. Но именно так рождаются решения, которые не на 20%, а в разы эффективнее традиционных.

Возьмём, к примеру, проект QTEAM, реализуемый при финансовой поддержке Innovate UK (программа Industrial Strategy Challenge Fund), создания квантового космического гравиметра для измерения микроскопических изменений гравитации от нескольких компаний, в числе которых Metamorphic Additive Manufacturing Ltd., Ноттингемский университет, Torr Scientific и RAL Space. Без аддитивных технологий это была бы громоздкая система с десятками вакуумных камер и магнитных катушек.

Но в компании пошли другим путём:

- Объединили десятки деталей в одну сложную структуру, напечатанную как единое целое.

- Интегрировали вакуумные каналы прямо в стенки корпуса.

- Спроектировали магнитные поля как 4D-геометрию, изменяющуюся в пространстве и времени.

В результате прибор стал компактнее, легче и энергоэффективнее аналогов, при этом точнее их.

Так как же перейти от «печатабельного» к «идеальному»? Во-первых, забудьте о стандартных CAD-подходах. Генеративное проектирование — не панацея, иногда нужны расчёты «на салфетке». Во-вторых, спрашивайте «почему» на каждом шагу: почему эта деталь имеет такую форму? Почему здесь толщина 3 мм? Часто ответ — «потому что так делали всегда». И главное — найдите в команде «еретика», который будет ставить под сомнение устоявшиеся подходы.

Аддитивное производство — это не просто технология. Это билет в мир, где ограничения определяют не станки, а только законы физики. 

Дмитрий Трубашевский

Прочти
меня на
сайте

По следам микроскопического преступления: дедуктивный анализ катастрофы NASA

Когда 9 февраля 2021 года камера сгорания ракетного двигателя, изготовленная методом селективного лазерного плавления L-PBF из медного сплава GRCo-42, внезапно разлетелась на куски во время плановых огневых испытаний на стенде Центра космических полетов имени Маршалла NASA, никто не ожидал, что это событие станет началом масштабного расследования, которое изменит подход к контролю качества в аддитивном производстве. За 11,27 секунды до катастрофы произошло то, что поставило под сомнение надежность одного из самых перспективных материалов для космических двигателей и превратилось в одно из самых показательных и дорогостоящих ЧП в истории космического материаловедения.

Эта камера сгорания была центральным элементом экспериментальной тяговой сборки TCA (thrust chamber assembly) проекта LLAMA (Long-Life Additive Manufacturing Assembly) — флагманской программы

NASA по внедрению аддитивных технологий в производство ракетных двигателей. Инженеры создавали её как демонстратор технологии — первый в истории полноразмерный ракетный двигатель, полностью на-

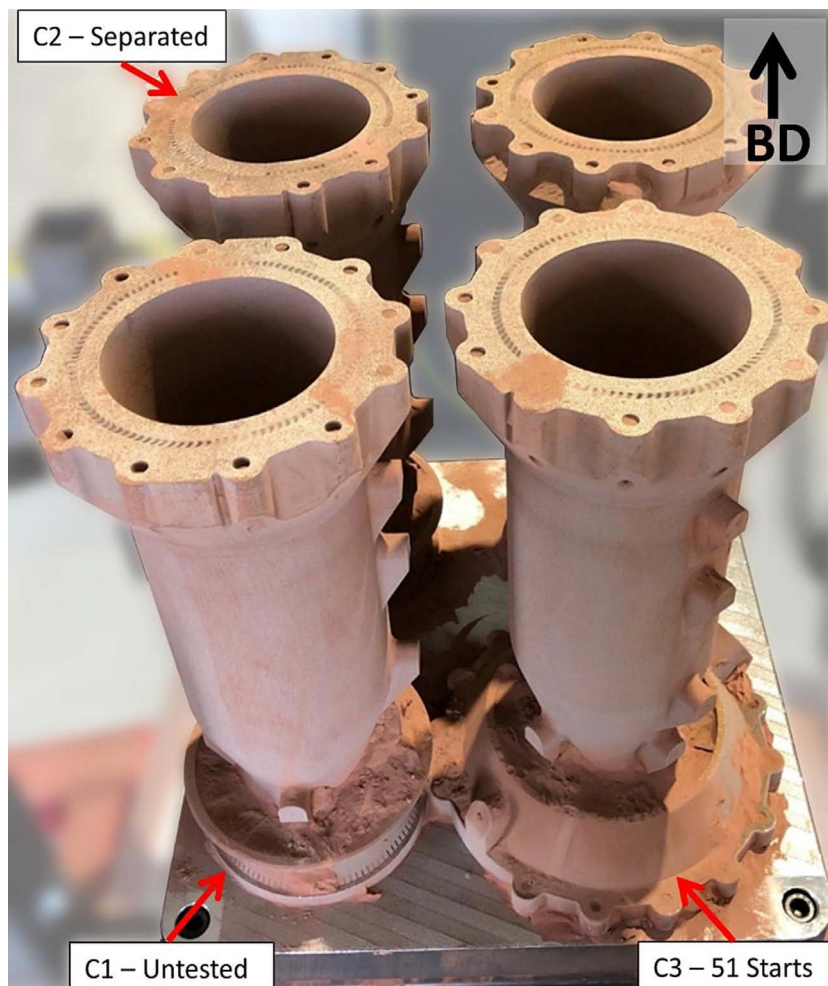
печатанный методом L-PBF из перспективного сплава GRCo-42. Этот уникальный медный сплав с добавлением 4 ат.% хрома и 2 ат.% ниобия разрабатывался специалистами Исследовательского центра Гленна



NASA специально для работы в экстремальных условиях — при температурах до 800°C и давлениях выше 100 атмосфер, где обычные медные сплавы быстро теряют прочность.

Печать четырех камер сгорания (C1, C2, C3 и одна дополнительная) началась 30 декабря 2019 года, производилась на установке EOS M400-1 и потребовала 226,8 кг порошка. Технические журналы, которые позже тщательно изучала аварийная комиссия, зафиксировали четыре остановки процесса, два из которых были критическими и незапланированными. Первая и вторая остановки произошли на высоте 118,7 мм и 262,4 мм от поверхности рабочей платформы — оператору потребовалось 26 и 66 минут соответственно для очистки системы перелива порошка, в течение которых камера построения оставалась открытой для проникновения воздуха. Третья остановка произошла из-за скачка напряжения в сети на отметке 323,4 мм. Четвертая была вызвана полным отключением электроэнергии, когда печать остановилась на 350,7 мм — система оставалась без питания почти 2 часа, хотя защитная атмосфера сохранялась.

Каждая из этих остановок оставила свой невидимый глазу, но критически важ-

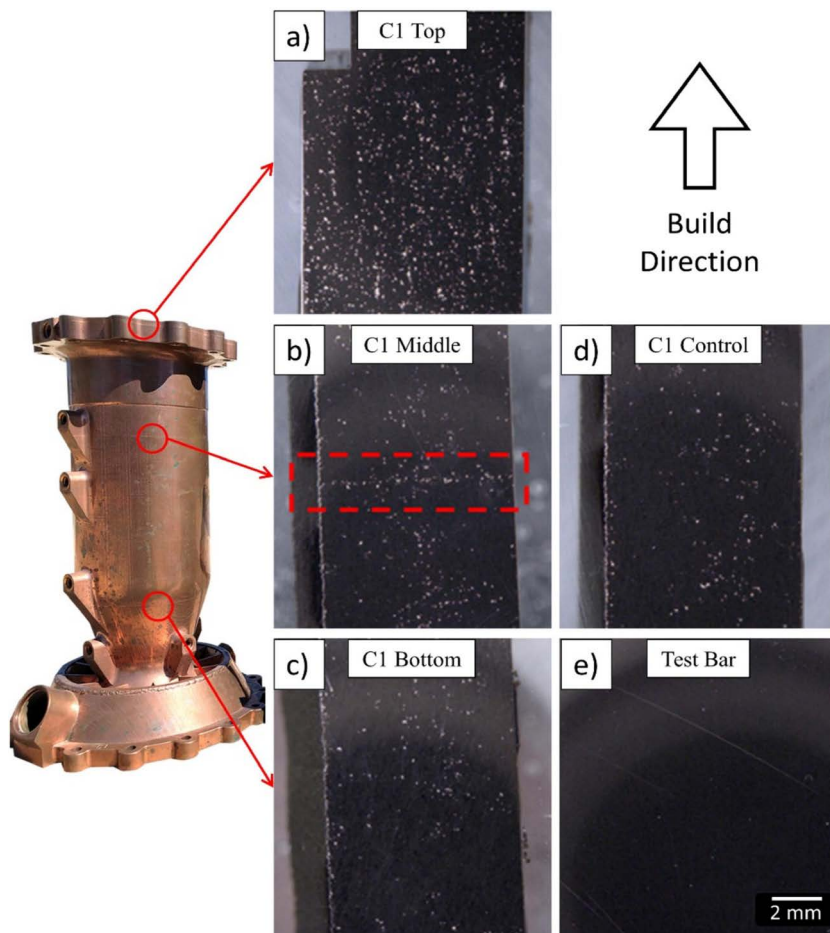


Напечатанные образцы камер из материала GRCop-42 для тестовых испытаний

ный след в структуре материала. Металлографический анализ, проведенный с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) Hitachi S-3700 N, работающего при 15 кВ с током зонда 60 мА и рабочим расстоянием 10-11 мм, выявил четкие границы между участками печати до и после пауз — так называемые «свидетельские линии». В этих переходных зонах концентрация дефектов достигала 1,9% по объему против 0,1-0,3% в «чистых» участках. Особую тревогу у исследователей вызвали три типа критических дефектов: сфе-

рические поры диаметром 50-200 мкм от захваченного аргона (образовались из-за недостаточного плавления порошка при перезапуске), трещины шириной до 100 мкм (результат нарушения теплового режима при остановках) и окисленные участки с содержанием кислорода на 20-47% выше пределов спецификации.

Для проверки влияния прерываний исследователи изготовили эталонные образцы с имитацией перезапусков. Контрольные образцы без прерываний демонстрировали плотность, близкую к 100%, и механиче-



Металлографические изображения отполированных образцов, взятых из камеры C1 и образца для растяжения, с указанием направления построения в правом верхнем углу: a), b) и c) - соответственно верхняя, средняя и нижняя контрольные линии; d) - участок без контрольной линии; e) - типичный образец для растяжения с повторным запуском в открытой камере

ские свойства, соответствующие стандартам: предел прочности на разрыв 357 МПа и удлинение 29,3%. Образцы с прерываниями, выполненные по правильной процедуре (трехкратное плавление первого слоя), также показали хорошие результаты. Это доказало, что проблема не в самих прерываниях, а в их некорректном выполнении.

После завершения печати камеру подвергли горячему изостатическому прессованию (HIP) в установке

Quintus QIH-15. Стандартный для GRCop-42 режим — $954 \pm 10^\circ\text{C}$ при $103 \pm 1,72$ МПа в течение 3 часов в атмосфере аргона — должен был устранить внутренние дефекты. Однако, как показали последующие исследования, HIP не смог полностью «залечить» зоны остановок, особенно поверхностные дефекты (этот метод эффективен только для внутренних дефектов). Это стало первым тревожным звонком, который, к сожалению, не привлек должного вни-

мания перед испытаниями.

Роковые испытания начались штатно. Соответствующая система включила подачу жидкого кислорода (температура -183°C) и метана (-161°C) в соотношении 3,5:1. Через 0,7 секунды давление в камере достигло рабочих 3,4 МПа, температура стенок в наиболее нагретых участках превысила 600°C , а тяга вышла на расчетные 31 кН. Высокоскоростная камера зафиксировала момент на 11,27 секунде испытания, когда сопло начало разрушаться, — как потом выяснилось, в нём изначально была микротрещина. Через 0,31 секунды в позиции «8 часов» на внешней стенке камеры появилась тонкая, почти незаметная трещина. Всего за 0,29 секунды она распространилась на 270° по окружности, после чего камеру буквально разорвало изнутри — давление упало с 3,4 МПа до атмосферного за 0,03 секунды, что привело к мгновенному испарению охлаждающего метана в стенках и мощному взрыву.

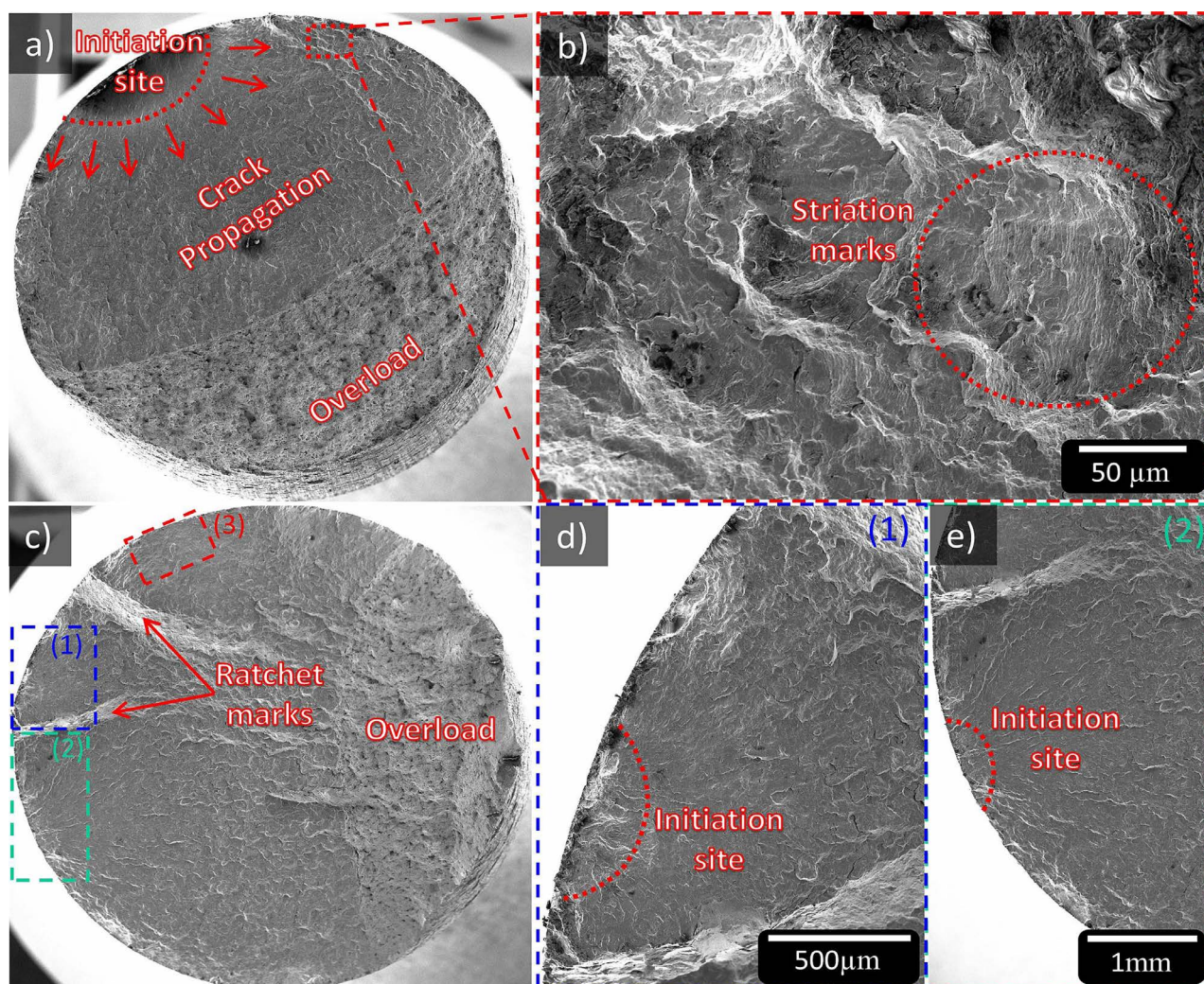
Последующий анализ проводили с беспрецедентной тщательностью. Спектрометр выявил опасный дисбаланс в составе сплава: содержание ниобия 1,91% против целевых 2,0%, хрома — 4,18% при верхнем пределе спецификации 4,2%. Соотно-

шение Cr/Nb составило 2,3 вместо оптимальных 2,0, что существенно снижало жаропрочность материала и сопротивление ползучести при высоких температурах. Анализ на анализаторе кислорода и азота показал содержание кислорода 347 ppm против максимально допустимых 300 ppm — каждый лишний ppm снижал теплопроводность на 0,5 Вт/м·К, а повышенное содержание хрома ухудшало

сопротивление ползучести при высоких температурах. Эти факторы и стали главной причиной отказа, усугубили ситуацию.

Механические испытания образцов, вырезанных из различных участков камеры с помощью электроэрозионной резки, проводили на универсальной испытательной машине с точностью измерения нагрузки $\pm 0,5\%$. Результаты шокировали даже скептиков: если

контрольные образцы из ненарушенных зон показали предел прочности 357 ± 25 МПа и относительное удлинение $29 \pm 5\%$, то образцы из зон остановок демонстрировали лишь 286 ± 38 МПа и $6 \pm 2\%$ соответственно. Испытания на малоциковую усталость (LCF) при полной деформации в 0,7% и 2,0% (режим, имитирующий реальные рабочие условия) показали, что образцы с дефектами выдерживали в



Поверхность излома образца, испытанного на малоциковую усталость (LCF) при деформации 0,7%, где: а) – образец с прерыванием построения в открытой камере;

с) – контрольный образец без прерывания построения. а) Видна поверхность излома с указанием места зарождения трещины, зоны её распространения и области перегрузки; б) Увеличенный участок поверхности излома с отметками усталостных бороздок. с) Общий вид поверхности излома с тремя точками зарождения трещин (1), (2) и (3), а также следы соединения трещин. д) и е) Увеличенные изображения мест зарождения трещин в точках (1) и (2) соответственно.

среднем 320 циклов против 610 у контрольных — почти вдвое меньше.

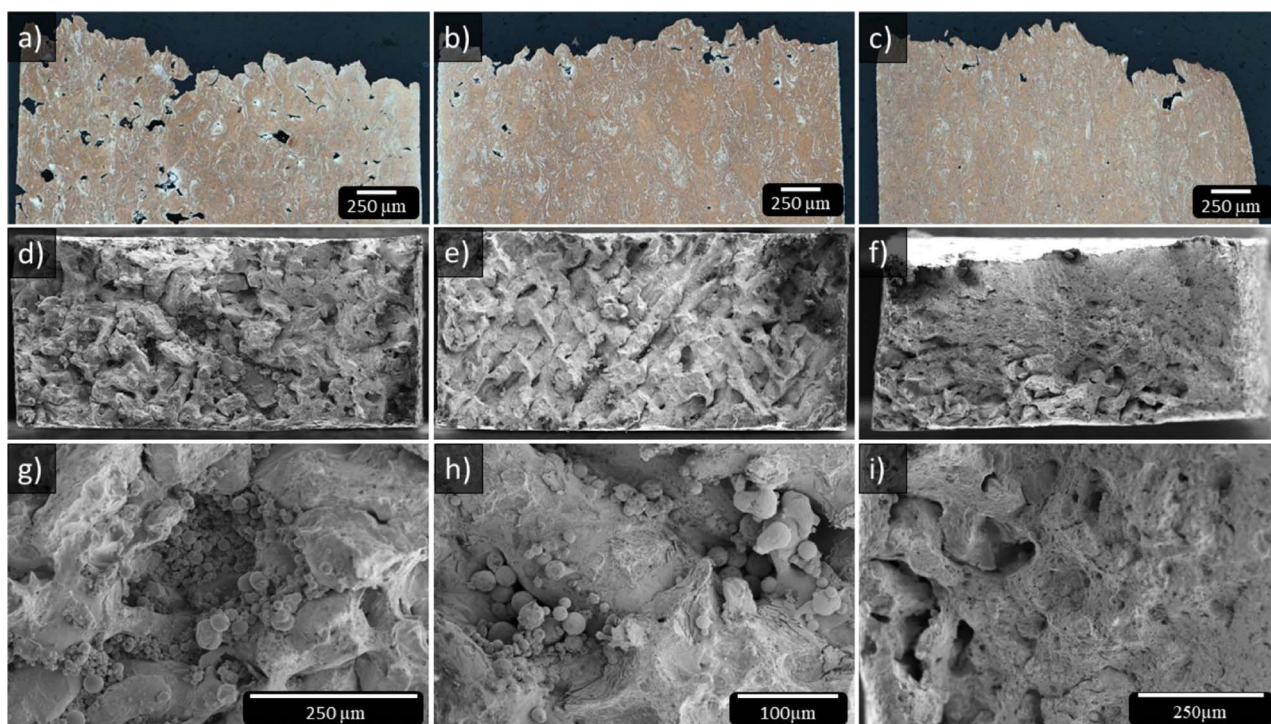
Фрактография поверхностей разрушения показала зернистую структуру с нерасплавленными частицами в зонах свидетельских линий, в отличие от пластических ямок в контрольных образцах. Это указало на хрупкое разрушение из-за пористости. Анализ также выявил, что даже небольшие изменения в параметрах процесса — например, накопление мелкого порошка на окне лазерной головки — могут снизить энергию лазера, достигающую материала, и нарушить сплавление слоев.

Тщательное шестимесячное расследование с привлечением экспертов из трёх национальных лабораторий

выявило целый комплекс взаимосвязанных причин аварии. Во-первых, постепенное загрязнение защитного кварцевого окна оптики лазера мелкодисперсным порошком (частицы менее 10 мкм) снижало эффективную мощность с 400 Вт в начале печати до примерно 350 Вт в конце — лазер просто физически не мог обеспечить достаточное плавление в верхних слоях. Во-вторых, вскрытие камеры во время остановок при относительной влажности 45% (при рекомендуемых 30%) привело к адсорбции влаги порошком. Термогравиметрический анализ на приборе TA Instruments Q50 показал, что после 30 минут на воздухе порошок GRCor-42 адсорбирует до 0,018% воды, что ката-

строфически сказывается на качестве сплавления. В-третьих, термический анализ методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS выявил локальные перепады температур до 200°C в зонах перезапуска — такие градиенты вызывали остаточные напряжения до 250 МПа.

Авария стала суровым, но необходимым уроком для всей сферы аддитивного производства. Прежде всего она наглядно продемонстрировала, насколько хрупким может быть баланс технологических параметров — даже незначительные на первый взгляд отклонения, такие как четыре незапланированные остановки печати, запустили цепь событий, приведших к катастрофическому разрушению конструкции. Это



Фрактография камеры C1, демонстрирующая микроструктуру с трещинами и изломами. СЭМ-изображения поверхностей разрушения для различных участков: линий свидетелей и контрольного сечения. a), d), g) – главная линия свидетелей. b), e), h) – средняя линия свидетелей. c), f), i) – контрольный участок без линии свидетелей

заставило по-новому взглянуть на значение технологической дисциплины, где каждая операция, каждая секунда процесса должны быть выверены до мельчайших деталей.

Не менее важным оказался вопрос контроля качества. Случай показал, что проверки не могут ограничиваться финальным осмотром готового изделия — необходим многоуровневый контроль на всех этапах производства. Это включает непрерывный мониторинг параметров печати в реальном времени, обязательный химический анализ материала на всех стадиях, механические испытания образцов из разных зон изделия и тщательную проверку после HIP-обработки. Только такой комплексный подход позволяет выявить потенциальные проблемы до того, как они приведут к катастрофе.

Ответом на этот вызов стало совершенствование материалов и технологий. Были разработаны улучшенный сплав GRCor-42V2 с добавлением алюминия, новые протоколы перезапуска печати, системы автоматической очистки оптики и передовые методы неразрушающего контроля. Эти инновации не просто устраняют конкретные недостатки — они создают новый стандарт надежности для всей отрасли.

Наконец, инцидент напомнил о важности человеческо-

го фактора и культуры производства. Стало очевидно, что такие параметры, как влажность в производственном помещении, требуют не менее строгого контроля, чем настройки лазера. Минимизация ручных операций, повышение квалификации операторов, развитие «культуры нулевого брака» — всё это превратилось из рекомендации в обязательное требование. Как показала авария, в высокотехнологичном производстве нет второстепенных факторов — каждый аспект, от квалификации персонала до микроклимата в цехе, вносит свой вклад в конечную надежность изделия.

Эта авария стала дорогостоящим, но очень своевременным уроком для всей космической отрасли. Как отметил доктор Уильям Тилсон: «Мы потеряли образец стоимостью \$1,2 миллиона, но приобрели знания, которые невозможно было получить иным способом». Сегодня новые стандарты NASA в области аддитивного производства считаются самыми строгими в мире — и это прямое следствие того февральского инцидента 2021 года.

Главный вывод этой истории прост: в ракетостроении не бывает мелочей. Каждый микрон, каждый процент примесей, каждая секунда технологического процесса — всё это складывается в уравнение надежности, где нет места невнимательности

и приблизительным расчетам. Как показала эта авария, лучше учиться на дорогах, но контролируемых неудачах, чем на катастрофах с человеческими жертвами.

Выводы NASA были четкими:

- Прерывания допустимы, но требуют строгих процедур перезапуска, включая трехкратное плавление первого слоя и восстановление продувки камеры.

- Необходимо контролировать состояние порошка (содержание кислорода <300 ppm).

- Обязательна визуализация свидетельских линий для металлографической проверки.

Этот случай стал уроком для всей индустрии: даже самые передовые материалы и технологии уязвимы к микроскопическим отклонениям в процессе. Камера сгорания разрушилась не из-за слабого сплава, а из-за нарушения сплошности металла, вызванного порами и дефектами сплавления.

Пока инженеры учатся видеть невидимое, измерять неизмеримое и контролировать неочевидное, они делают шаг к созданию технологий, способных выдержать не только огонь в двигателе, но и испытание временем. 

Дмитрий Трубащевский

Авторская адаптация:

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109710>

Двигатели для беспилотья: АП перехватывает инициативу



Прочти
меня на
сайте

Американская компания Beehive Industries делает ставку на малогабаритные двигатели, созданные с помощью аддитивного производства

При изучении актуальной информации о беспилотных технологиях становится очевидным, как современные реалии вынуждают производителей и заказчиков разных стран повышать требования к скорости разработки и функциональности продукции. Это заставляет пересматривать подходы к проектированию и производству, которые ещё недавно считались новыми

и прогрессивными. То, что вы прочитаете далее, — не теоретические домыслы, а проверенные практикой выводы о том, как можно сократить количество компонентов в изделии, упростить ремонт, гибко адаптироваться к изменениям в конструкции, избежать зависимости от логистических сложностей и длительных циклов традиционного производства.

Вездесущие БПЛА

Беспилотные технологии — будь то дроны или БПЛА — сформировались благодаря синтезу авиастроительных компетенций, информационных технологий и оборонных разработок. Они не принадлежат какой-либо одной отрасли, а скорее служат связующим звеном между ними. В авиации и космической отрасли их применяют для диагностики и тестирования,





тов в США фермеры, используя дроны для точного внесения удобрений, сумели в итоге сэкономить до 20% на затратах и увеличивать урожайность на 15%.

В логистике беспилотники могут доставлять грузы в труднодоступные места, где традиционные методы доставки неэффективны или невозможны. Известнейшая компания Amazon сейчас активно разрабатывает программу доставки товаров с помощью дронов, оценив перспективы значительно сокращения времени доставки и снижения затрат.

В энергетике дроны применяются для инспекции линий электропередач, ветряных турбин и других инфраструктурных объектов. Это позволяет быстро и безопасно выявлять повреждения и проводить ремонтные работы. Например, в Германии благодаря использованию дронов для инспекции ветряных турбин удалось на 30% сократить время и затраты на обслуживание.

В кинематографе, а также в картографии и геодезии с помощью дронов ведут съемки с воздуха, получая впечатляющие и детализированные кадры. И это обходится заметно дешевле, чем съемки с вертолетов. В фильме «Скайфолл» из серии о Джеймсе Бонде использовались дроны для съемки некоторых сцен – и получилось эпично.

Рано или поздно человечество придёт к более целостному, обобщающему взгляду на развитие технологий, где места политическим противостояниям будет всё меньше. Мы уже видим, как гражданские дроны проникают в повседневную жизнь, делая её комфортнее и доступнее.

Давайте обратимся к одному из интересных проектов, пусть и реализованному за пределами России, зато открытому по духу и свободному от грифа «для служебного пользования». Такие примеры могут стать ориентиром для российских компаний, которые пока не спешат делиться своими наработками, а также возможностью для стартапов оценить масштаб задач и соизмерить свои возможности с реальными метриками проекта и получить значительное конкурентное преимущество.

Малогабаритные – не значит малозначимые

Компания Beehive Industries (Энглвуд, Колорадо), опираясь на многолетний опыт в авиастроении и аддитивных технологиях, концентрирует усилия на ключевой задаче: разработке, испытаниях и масштабировании высокоэффективных реактивных двигателей с тягой до 22 241 ньютон.

В любой стране оборонная промышленность стал-

в военной сфере — для разведки и выполнения операций. В сельском хозяйстве дроны используются для мониторинга состояния полей, распыления удобрений и пестицидов, а также для сбора данных о почве и растениях. Это позволяет аграриям более эффективно управлять своими хозяйствами и повышать урожайность. Показательный пример: в одном из проек-

кивается с серьёзными вызовами: многие военные системы, включая беспилотники и БПЛА, зависят от малогабаритных реактивных двигателей, созданных по устаревшим технологиям. Большинство из них производятся методом литья по выплавляемым моделям и/или ковкой — процессов, требующих долгого цикла изготовления оснастки. В условиях ограниченных литейных мощностей это создаёт риски дефицита и сбоев в поставках критически важных компонентов.

Чтобы предотвратить кризис снабжения, Beehive Industries предлагает максимально гибкий подход — аддитивное производство ма-

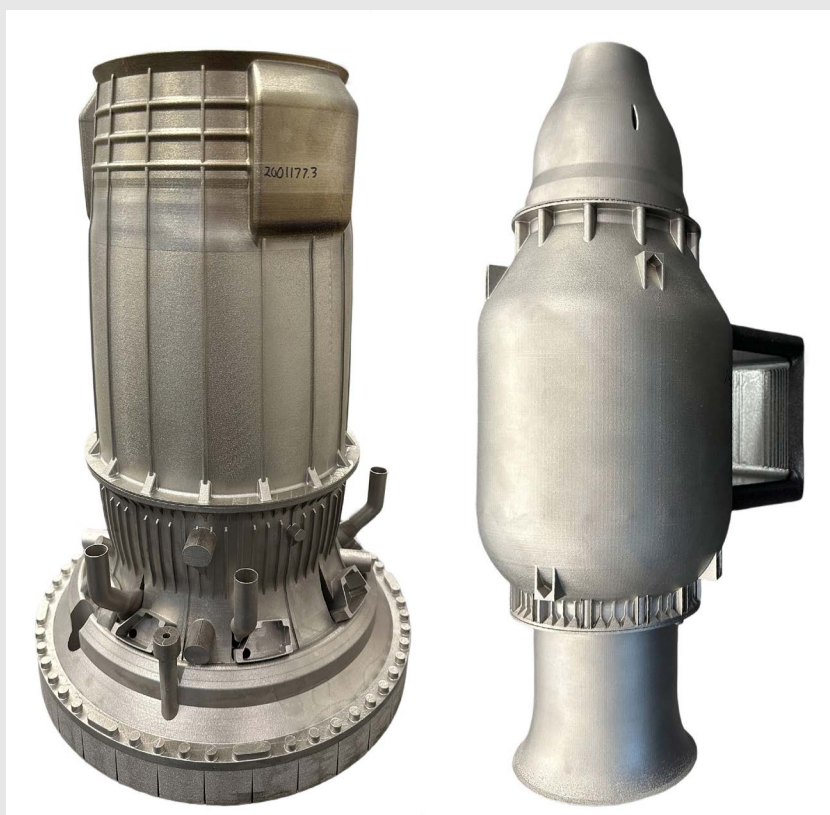
логабаритных двигателей нового поколения. Эти двигатели не только превосходят по основным характеристикам устаревшие аналоги, но и могут изготавливаться быстрее и эффективнее, обеспечивая стабильность оборонных поставок в будущем.

Компания Beehive Industries изначально была создана как контрактный производитель, специализирующийся на аддитивном производстве, и до сих пор выполняет некоторые заказы для сторонних клиентов. Возможность оперативно вносить коррективы на этапе разработки очевидно сыграла роль в успехе первого протестированного двигате-

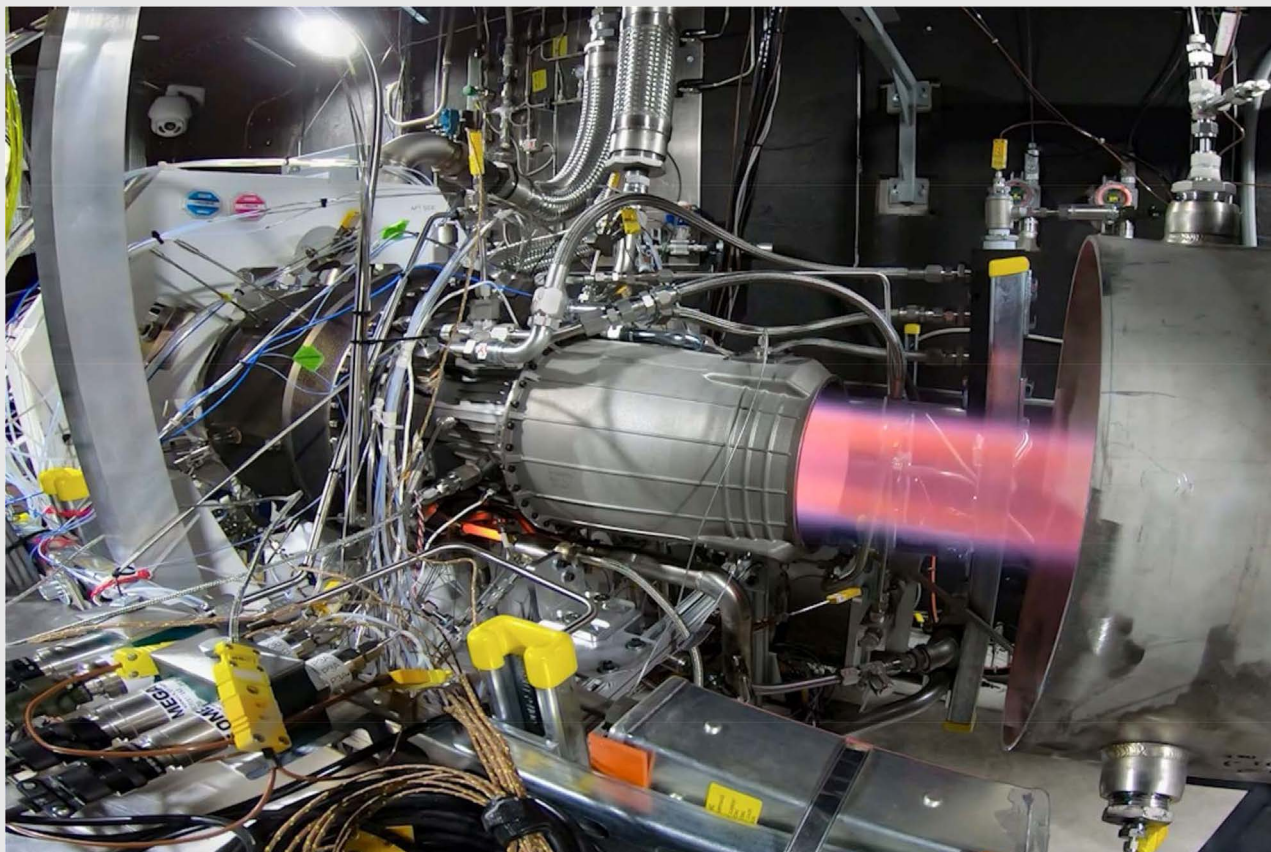
ля на всех этапах его создания: от проектирования до готовности к испытаниям на разработке, испытаниях и валидации двигателей собственной конструкции, которые в значительной степени состоят из деталей, изготовленных методом 3D-печати.

В 2024 году Beehive разрабатывала два таких двигателя. Первый — демонстрационная модель с тягой 890 ньютонов, которую можно масштабировать до 1800 ньютонов. Это аналог двигателей, используемых в некоторых крылатых ракетах и крупных беспилотниках. Однако если традиционный двигатель состоит из более чем 2000 деталей, то версия Beehive включает всего 140. Большинство из них — стандартные компоненты: уплотнения, подшипники и крепёж. Ключевыми элементами являются 14 металлических 3D-печатных деталей, которые формируют основу двигателя, заменяя множество литых, кованных и лезвийно обработанных частей.

В мае 2024 года этот двигатель прошёл эксплуатационные испытания и был разобран для посттестового анализа. Демонстрационная модель Beehive с тягой 890 ньютонов успешно запускалась более 35 раз в ходе тестов. По их итогам был предложен ряд дора-



Количество деталей, изготовленных методом 3D-печати, значительно меньше по сравнению с тысячами деталей в традиционных конструкциях; используются стандартные уплотнения, подшипники и крепёж. Фото: Beehive Industries



Тестирование БПЛА двигателя показывает лучшие характеристики, чем получаемые по старым технологиям. Фото: Beehive Industries

боток, чтобы ещё больше сократить количество деталей и повысить производительность за счёт изменений в 3D-печатных компонентах. Например, классическое уплотнение было заменено на интегрированное в напечатанный фланец, что исключило дополнительный этап сборки. Подобные конструктивные изменения, которые могут значительно упростить производство, легко реализуются благодаря аддитивным технологиям.

Возможность оперативно вносить коррективы на этапе разработки очевидно сыграла роль в успехе первого протестированного двигателя: от проектирова-

ния до готовности к испытаниям на него потребовалось всего 13 месяцев.

Второй продукт компании Beehive Industries — более компактный двигатель диа-

метром около 17,8 сантиметров, предназначенный для применения в воздушных крылатых ракетах, которые могут запускаться как с пилотируемых, так и с беспи-



Одна из модификаций малогабаритного БПЛА-двигателя состоит из пяти деталей, изготовленных методом L-PBF. Фото: Beehive Industries

лотных летательных аппаратов. Двигатель развивает тягу порядка 890 ньютонов и представляет собой аналог существующих решений, но при этом имеет важное преимущество — минимальное количество деталей. В его конструкции всего пять металлических компонентов, изготовленных методом 3D-печати.

Использование 3D-печати в создании двигателей, описанных в статье, открывает новые горизонты для индустрии. Этот подход не только ускоряет разработку и производство, но и существенно снижает стоимость продукции. При изготовлении традиционными методами, такими как литьё по выплавляемым моделям, малогабаритные двигатели (класса тяги до 890 ньютонов) обычно обходятся более чем в 70 000 долларов.

Beehive Industries решила изменить эту ситуацию, создав двигатель, который стоит вдвое меньше, при этом демонстрируя лучшую топливную эффективность.

Ключ к экономии заключается в интеграции компонентов, но механизм этого процесса более глубок, чем может показаться на первый взгляд. Сокращение количества деталей действительно уменьшает трудозатраты и время сборки, однако это лишь часть истории. Основная экономия достигается за счёт минимизации цепочки поставок. Традиционно каждый элемент двигателя требует участия множества подрядчиков и поставщиков, которые добавляют свою долю к себестоимости продукта. С 3D-печатью эта цепочка становится короче и более управляемой — вместо де-

сятков сторонних производителей достаточно одного. Это не только снижает затраты, но и устраняет риски, связанные с координацией множества звеньев, что делает процесс производства более стабильным и предсказуемым.

В результате Beehive Industries удалось создать не просто дешёвый двигатель, но и технологию, которая пересматривает принципы работы всей отрасли. Это не просто инновация — это шаг к новому уровню эффективности и доступности авиационных решений.

В дополнение к интеграции компонентов, Beehive Industries активно использует уникальные возможности 3D-печати для создания двигателей с улучшенными характеристиками. Один из ключевых примеров — рабочее колесо первой ступени двигателя мощностью 2224 ньютонов, которое имеет революционную конструкцию, недостижимую при традиционных методах производства. Благодаря сложной геометрии, оптимизированной для эффективного управления воздушным потоком, производительность этого элемента выросла на 20% по сравнению с аналогами.

Эта необычная форма, которая ранее была бы слишком дорогой или просто невозможной для реализации, стала реальностью



*Ранний прототип камеры сгорания для демонстрационного двигателя с тягой 2224 ньютонов. Компания разработала и протестировала пять итераций конструкции всего за несколько месяцев.
Фото: Beehive Industries*



Аддитивное производство осуществляется по технологии L-PBF на установках EOS различных размеров с использованием титановых, алюминиевых и никелевых сплавов. Фото: Beehive Industries

благодаря аддитивному производству. Именно 3D-печать позволила создать такую сложную конструкцию без существенного увеличения стоимости и времени изготовления.

Компания планирует масштабировать производство: в перспективе она намерена выпускать 2000 таких двигателей в год, что свидетельствует о серьёзном потенциале технологии как для военных, так и для гражданских применений. Это решение демонстрирует, как инновационные подходы могут радикально изменить привычные технические ограничения и открыть новые горизонты для авиационной индустрии.

В тренде — полный цикл

Чтобы понять, на что способна Beehive Industries,

стоит взглянуть на её производственные мощности. На площадке в Энглвуде установлено оборудование по технологии L-PBF — в основном машины от EOS (Прим. ред.: Не стоит воспринимать это оборудование как эталон, справляющийся лучше других со

сложными задачами аддитивного производства. Да, EOS действительно была одной из первых на рынке и заслужила определённое доверие в профессиональной среде. Однако технологии не стоят на месте. Сегодня, на фоне санкционного давления и развития отечественных производств, доступ к ответственному металлическому 3D-производству становится проще. Российские компании, в том числе «Лазерные системы», AM.TECH, ОНСИНТ, AddSol и другие, предлагают решения, способные по многим параметрам составить конкуренцию западным аналогам. Качество этих систем уже позволяет говорить о реальной замене ушедшим брендам, а их внедрение в промышленность набирает темп.)

Здесь же работают элек-



Электроэрозионные станки EDM Performance Accessories. Фото: Beehive Industries



Обрабатывающие центры Okuma. Фото: Beehive Industries

троэрозионные станки EDM Performance Accessories с молибденовой проволокой, которые отделяют напечатанные детали от платформ, а также ленточнопильные станки Behringer Saws и обрабатывающие центры Okuma, используемые для финальной доводки изделий и восстановления платформ построения. Не хватает только глаза — но он есть: рядом расположена лаборатория контроля качества, где проверяют геометрию каждой детали.

Металлографические испытания пока проводятся в отдельной лаборатории материаловедения в Цинциннати, штат Огайо. Вне этого цикла детали покидают производство лишь эпизодически — обычно для термообработки, горячего изостатического прессова-

ния или химического фрезерования. Однако при увеличении объёмов компания рассматривает возможность перевода этих операций внутрь собственной производственной системы.

(Прим. ред.: Назвавшись ЦАТ/ЦАП (Центр аддитивных технологий/Центр аддитивного производства), компания фактически заявляет о готовности стать ключевым игроком на рынке услуг. Однако стоит помнить, что аббревиатура — это не просто маркетинговый ход — она предполагает определённую ответственность перед собой и заказчиками. Последние ожидают от ЦАТ/ЦАП единого окна обслуживания и комплексного подхода к решению задач. Это значит, что центр должен обладать всеми необходимыми технологиями для

обеспечения полного производственного цикла: от проектирования до финальной обработки деталей.

К сожалению, в России полноценных ЦАП пока немного. Их дефицит наглядно иллюстрируется высокой загрузкой существующих центров и длинными очередями у их дверей. Среди них можно выделить такие организации, как АО «ЦАТ», ЦТКАТ, 3DVision, СПИН, Metal Sprint, «Лазерные системы» и другие. Эти компании действительно предлагают широкий спектр услуг, но спрос на их услуги значительно превышает текущие возможности, что говорит о значительном потенциале рынка и необходимости дальнейшего развития инфраструктуры аддитивного производства.)

Сейчас команда сосредото-

точена на разработке так называемых производственных модулей — компактных зон, где собраны все ключевые этапы изготовления детали: 3D-печать, механическая обработка и контроль качества. Такие модули легко тиражировать, разворачивая их на новых площадках по мере роста потребности. Это не просто удобно — это принципиально новый уровень гибкости и контроля над процессом.

В условиях, когда традиционные методы производства, такие как литьё, сталкиваются с жёсткими ограничениями, — особенно в США, где количество литейных мощностей ограничено, а их расширение связано с большими рисками и временными затратами, — аддитивные технологии дают Beehive реальное преимущество. Компания может масштабироваться без глобальныхстроек и капитальных вложений, просто добавляя новые модули по мере необходимости.

Как говорит директор по продукту Горди Фоллин: «Нам не нужны запасы литых заготовок. Мы храним порошковые материалы и проектируем изделия так, чтобы они собирались из стандартных компонентов. Это упрощает логистику, снижает стартовые расходы и позволяет быстро подстраиваться под изменения».

Присмотримся к модульности

Оптимизация производственных площадей под масштабируемые модули требует не просто технической перестройки, но и принципиально нового подхода к управлению персоналом и его обучению. В Beehive Industries, где сейчас трудятся более 200 человек на четырёх площадках — в Колорадо, Теннесси и Огайо — основу коллектива составляют специалисты среднего звена с опытом работы в двигателестроении и аддитивных технологиях. Многие из них пришли из крупных аэрокосмических компаний, где уже сталкивались с высокими требованиями к точности и надёжности.

В отличие от традиционной практики, когда инженеры-конструкторы и производственные работники действуют почти автономно друг от друга, в Beehive сделана ставка на тесное взаимодействие этих групп. Здесь нет жёстких границ между проектными и цеховыми задачами — команды регулярно обмениваются знаниями, что ускоряет принятие решений и минимизирует ошибки на этапе реализации.

Кросс-обучение стало частью корпоративной культуры. Об этом говорит директор по операциям Керен Каллен: «Сотрудники не должны быть привязаны к одной операции. Они долж-

ны понимать весь процесс внутри своего модуля — от печати до финального контроля». Этот принцип станет особенно важным по мере внедрения новых модульных зон, где каждый участок будет самодостаточным и гибким.

Модульность производства возможна благодаря тому, что аддитивные технологии не зависят от сложной оснастки — таких как пресс-формы или дорогостоящие штампы. Это позволяет не только равномерно распределять мощности по разным локациям, но и создавать дублируемые цепочки поставок, которые менее уязвимы к внешним рискам.



«Вы рассредотачиваете производство, — объясняет Уильямс, — это и есть модульная цепочка поставок».

«Аддитивные технологии дают высокую плотность производительности в малом пространстве», — добавляет инженер-технолог компании Джейсон Кимбалл. — Это открывает возможность развивать производство в разных регионах без необходимости строить огромные заводы».

Сейчас в парке Beehive уже насчитывается более 30 металлических 3D-принтеров, распределённых по разным площадкам. По мере перехода от опытной стадии к серийному выпуску малогабаритных двигателей парк оборудования будет расти — не по графику плановых закупок, а по мере реальной потребности.

«Мы создаём потенциал для быстрого увеличения объемов, — говорит Уильямс. — И делаем это так, чтобы оставаться мобильными и готовыми к изменениям».

Послесловие редакции. Новая логика авиастроения через аддитивные технологии

Подход Beehive Industries к созданию двигателей для БПЛА демонстрирует, как аддитивное производство меняет правила игры в авиа- и двигателестроении. Сокращение количества деталей с сотен до десятков и единиц, минимизация цепочки поста-

вок, ускорение разработки и снижение стоимости — всё это уже не теория, а практика. Компания показала, что модульные производства, основанные на 3D-печати, позволяют масштабироваться без привязки к традиционной инфраструктуре литейных заводов. Это не просто экономия, а принципиально новый уровень гибкости, когда мощности можно распределять по регионам, снижая риски и ускоряя вывод продукции на рынок.

В России развитие аддитивных технологий в авиастроении набирает темп, несмотря на вызовы внешней среды. Проекты, реализуемые Курчатовским институтом – ВИАМ совместно с Фондом перспективных исследований (ФПИ), уже в 2016 году продемонстрировали возможность создания дронов с 3D-печатными двигателями. В 2020 году ВИАМ успешно испытал газотурбинный двигатель с турбиной, напечатанной из высокопрочных металлических порошков, — её прочность оказалась на 20% выше традиционных аналогов. Становится всё больше российских разработчиков аддитивного оборудования и локализации производства металлических порошков, способных конкурировать с западными аналогами.

Как показывает опыт Beehive, аддитивное производство не требует гигант-

ских заводов. Для России с её территориальным разбросом модульные комплексы — идеальное решение для быстрого развертывания мощностей.

Однако вызовы остаются. Полноценных ЦАП в стране пока мало, а очереди к ним растут. Чтобы не отставать, нужно не просто копировать западные модели, а создавать собственные стандарты, где 3D-печать станет не альтернативой литью, а его логическим развитием.

Будущее авиастроения — в сочетании инноваций и прагматизма. Beehive Industries доказала, что аддитивные технологии могут кардинально изменить производство двигателей. Россия, имея опыт и ресурсы, стоит на пороге аналогичного прорыва. Но для этого важно не ограничиваться импортозамещением, а строить новые цепочки создания ценности — от порошков до готовых продуктов. Технологии уже здесь, и их успех зависит не от оборудования, а от смелости мышления тех, кто их внедряет. 

Дмитрий Трубащевский

Адаптированный источник:

<https://www.additivemanufacturing.media/articles/beehive-industries-is-going-big-on-small-scale-engines-made-through-additive-manufacturing>

Прочти
меня на
сайте

Не копии, а улучшенные версии

Реинжиниринг в пищевой промышленности: как российские компании создают свои технологии и преодолевают вызовы импортозамещения

Последние годы стали переломными для многих отраслей российской промышленности, в том числе для предприятий, связанных с пищевым производством и сельским хозяйством. Резкое сокращение поставок зарубежного оборудования и комплектующих поставило перед производителями сложную задачу — в кратчайшие сроки найти достойные аналоги или разработать собственные решения. И, включившись в этот про-

цесс, который многие называют реинжинирингом или обратным проектированием, производители убедились, что он оказался гораздо сложнее, чем простое копирование зарубежных технологий. Да, реинжиниринг значительно сокращает временные и материальные затраты, которые необходимы при разработке изделия с нуля. Кроме того, современная технологическая и программная база позволяет автоматизи-

ровать большую часть процессов и повысить их производительность. Но при этом здесь требуется глубокий анализ, творческий подход и, что немаловажно, серьёзные финансовые вложения.

Те, кто не имел дела с реинжинирингом, часто представляют себе нечто вроде разбора готового изделия на части с последующим воспроизведением его копии. Однако в реальности всё намного интереснее. Изделия в данном случае адаптиру-

ются под запросы заказчиков за счёт использования совершенно иных материалов и технологических процессов, нежели в исходном образце. Это позволяет повысить надёжность и производительность новой отечественной продукции без нарушения патентных прав. Возьмём, например, историю компании «ТДНТ Инжиниринг», которая несколько лет назад столкнулась с острой нехваткой запчастей для упаковочного оборудования. Вместо

того чтобы искать обходные пути для их закупки за границей, они решили самостоятельно производить их у себя. Как рассказывает директор компании Марат Копылов, первым делом инженеры тщательно изучили вышедшие из строя детали — разобрали их, проанализировали материалы, провели спектральный анализ, чтобы определить состав сплавов и понять, какие элементы и их соотношения влияют на свойства изделия. Затем с помощью

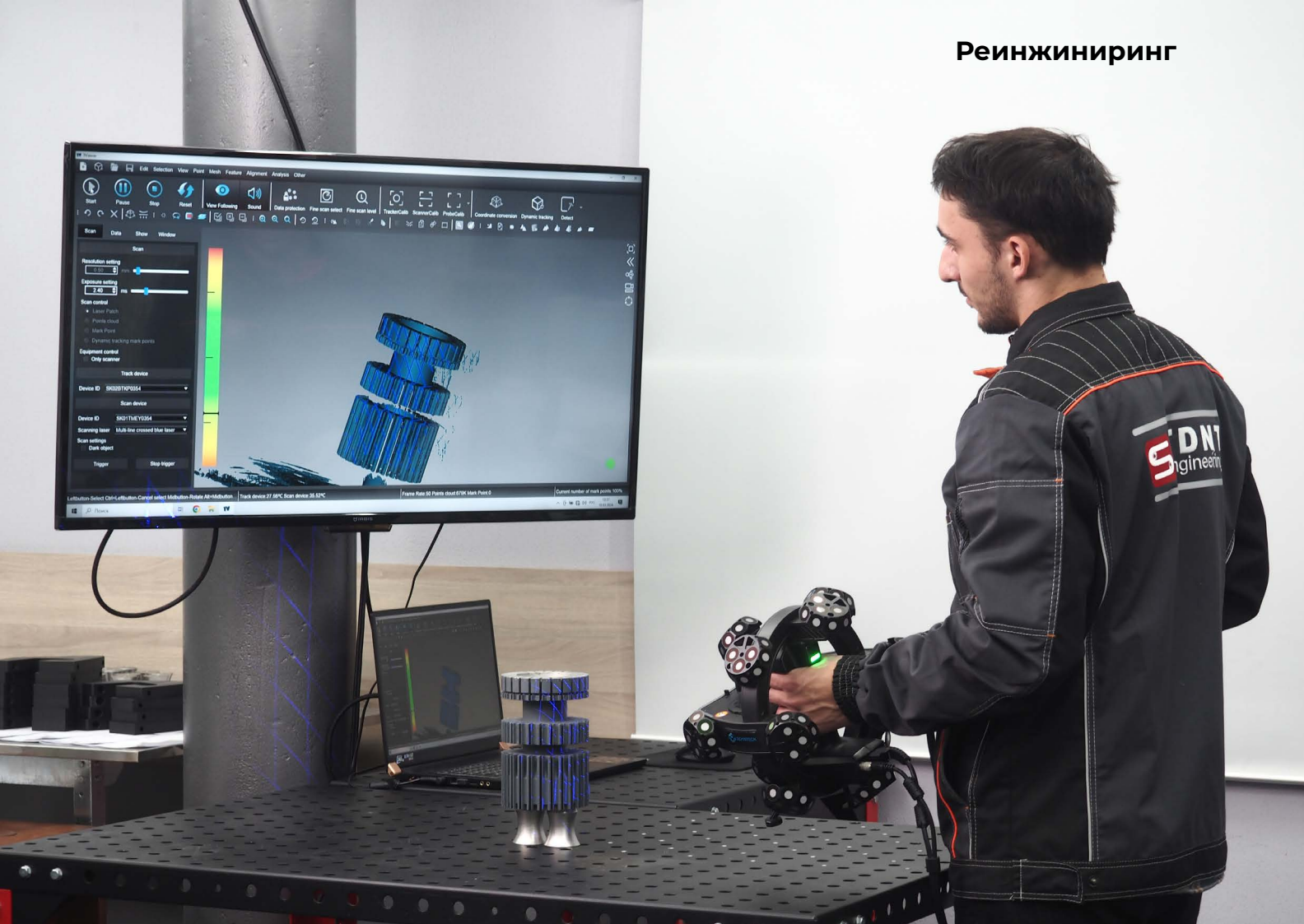
3D-сканирования создали цифровые модели, которые позволили увидеть не только геометрию, но и слабые места в конструкции.

Однако благодаря технологическому прогрессу и появлению новых типов сканеров взаимодействие пользователя с ними для оцифровки объектов сегодня стало значительно проще.

«У заказчика была очень широкая номенклатура изделий, и ранее он использовал сканер, которому для работы требовались маркерные метки. Однако такой подход оказался трудозатратным и не позволял ускорить процесс обратного проектирования. Именно поэтому мы предложили перейти на AM.TECH TrackScan 42 (сегодня доступен его более производительный аналог — TrackScan-Sharp 49) — решение, которое позволяет выполнять потоковое сканирование без необходимости клеить метки», — поделился с нами менеджер по работе с ключевыми клиентами Кирилл Большаков. «Наше уникальное решение на тот момент было одновременно более доступным по сравнению с канадскими аналогами и уже успело хорошо зарекомендовать себя на отечественном рынке по части качества и надёжности. Сегодня заказчик активно ис-



Печать запчастей по аддитивной технологии L-PBF.
Фото: ТДНТ Инжиниринг



Процесс обратного инжиниринга деталей. Фото: ТДНТ Инжиниринг

пользует наш 3D-сканер для решения задач обратного проектирования в пищевой промышленности. Это особенно актуально в условиях, когда такие крупные игроки, как Tetra Pak, уходят с рынка, что приводит к сложностям в обеспечении запасными частями».

Но самое важное — это даже не восстановление исходных параметров, а возможность улучшить их. Например, если деталь быстро изнашивалась из-за коррозии, её можно было изготовить из более стойкого материала. Если конструкция оказывалась слишком тяжё-

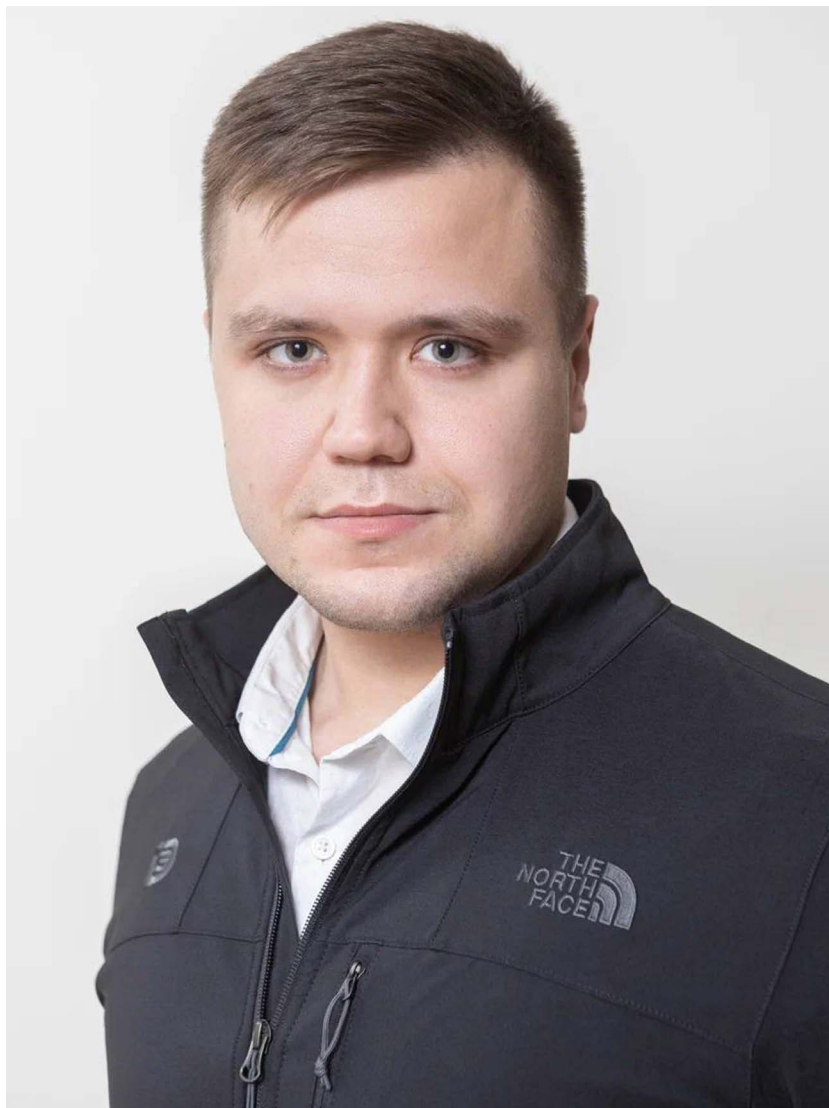
лой или энергозатратной, её оптимизировали с помощью современных методов проектирования, таких как топологическая оптимизация. В результате вместо простого повторения зарубежных аналогов получались изделия с улучшенными характеристиками — более долговечные, экономичные или удобные в эксплуатации.

Конечно, такой подход требует не только знаний, но и серьёзной технической базы. Современное оборудование для 3D-сканирования, спектрального анализа, ПО, испытательные стенды — всё это стоит немалых де-

нег. И потому именно финансовыми соображениями нередко гасятся креативные амбиции многих компаний, особенно небольших. Здесь на помощь приходят государственные программы поддержки. Например, Минпромторг РФ предлагает субсидии, покрывающие до 70% затрат на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в этой области. Это значит, что предприятие может компенсировать расходы на зарплаты специалистов, закупку материалов, проведение испытаний и даже сертификацию продукции.

Однако поддержка — это не просто «бесплатные деньги». Компании, получающие субсидии, берут на себя обязательства по объёмам продаж. Например, если государство выделило 10 миллионов рублей на разработку, предприятие должно продать продукции на 50 миллионов. Для некоторых это становится дополнительным стимулом, для других — серьёзным вызовом. Как отмечает Марат Копылов, «ТДНТ Инжиниринг» пока работает на собственные средства, но уже ведёт переговоры с министерством о сотрудничестве. По его словам, важно, чтобы государство не просто выделяло финансирование, но и понимало специфику отрасли, реальные потребности производителей.

Ещё один интересный механизм — гранты на обратный инжиниринг критически важных комплектующих, необходимых различным отраслям промышленности. Их распределяет Агентство по технологическому развитию (АТР), и сумма поддержки может достигать 100 миллионов рублей. По условиям программы государство финансирует до 80% затрат на разработку, в том числе, изготовление опытных образцов. Главное условие — разработка должна быть востребована на рынке. Например, если речь идёт о



Кирилл Большаков. Фото: AM.TECH

деталей для молочного или мясоперерабатывающего оборудования, компания-заявитель должна доказать, что эти компоненты действительно необходимы и их отсутствие тормозит работу целых отраслей. За три года действия программы грантов на обратный инжиниринг АТР поддержало 70 проектов для отраслей сельскохозяйственного и пищевого машиностроения с объёмом финансирования 1,3 млрд рублей

Но даже при наличии финансирования остаются чисто технические сложности.

Одна из самых распространённых — невозможность получить оригинальное изделие для изучения. Некоторые комплектующие используются в производстве в единичных экземплярах, и изъять их для анализа означает остановить рабочую линию. В таких случаях инженерам приходится работать буквально «вслепую», опираясь на косвенные данные, сохранившиеся фрагменты документации или даже воспоминания специалистов, которые раньше обслуживали это оборудование.



Конечно, до полного импортозамещения ещё далеко. Многие технологии от мировых лидеров, особенно в области высокоточного машиностроения, пока остаются недоступными. Но важно то, что процесс уже запущен, и он идёт не только «сверху», по инициативе государства, но и «снизу» — благодаря компаниям, готовым вкладываться в развитие собственных компетенций.

Тем не менее, несмотря на все трудности, реинжиниринг уже даёт ощутимые результаты. Тот же «ТДНТ Инжиниринг» за два года изготовил более 5 тысяч уникальных деталей, которые теперь работают на предприятиях по всей стране. А в 2024 году компания представила собственную линейку ультрапастеризаторов TDNT ULTRA — оборудования для высокотемпературной обработки молока, соков и других жидких продуктов. Как объясняет Никита Шмаль, руководитель Центра по производству технологического оборудования, раньше такие машины закупались исключительно у европейских производителей, но теперь у России есть собственные решения, причём, не уступающие по качеству.

Кстати, о качестве. Один из ключевых моментов в реинжиниринге — это переход от простого копирования к созданию действительно конкурентоспособных продуктов. Например, при разработке теплообменни-

ков для ультрапастеризаторов специалисты «ТДНТ Инжиниринг» создали уникальный сварочный робот, аналогов которому нет на отечественном рынке. Это позволило добиться высочайшей точности соединений и, как следствие, повысить надёжность всего оборудования.

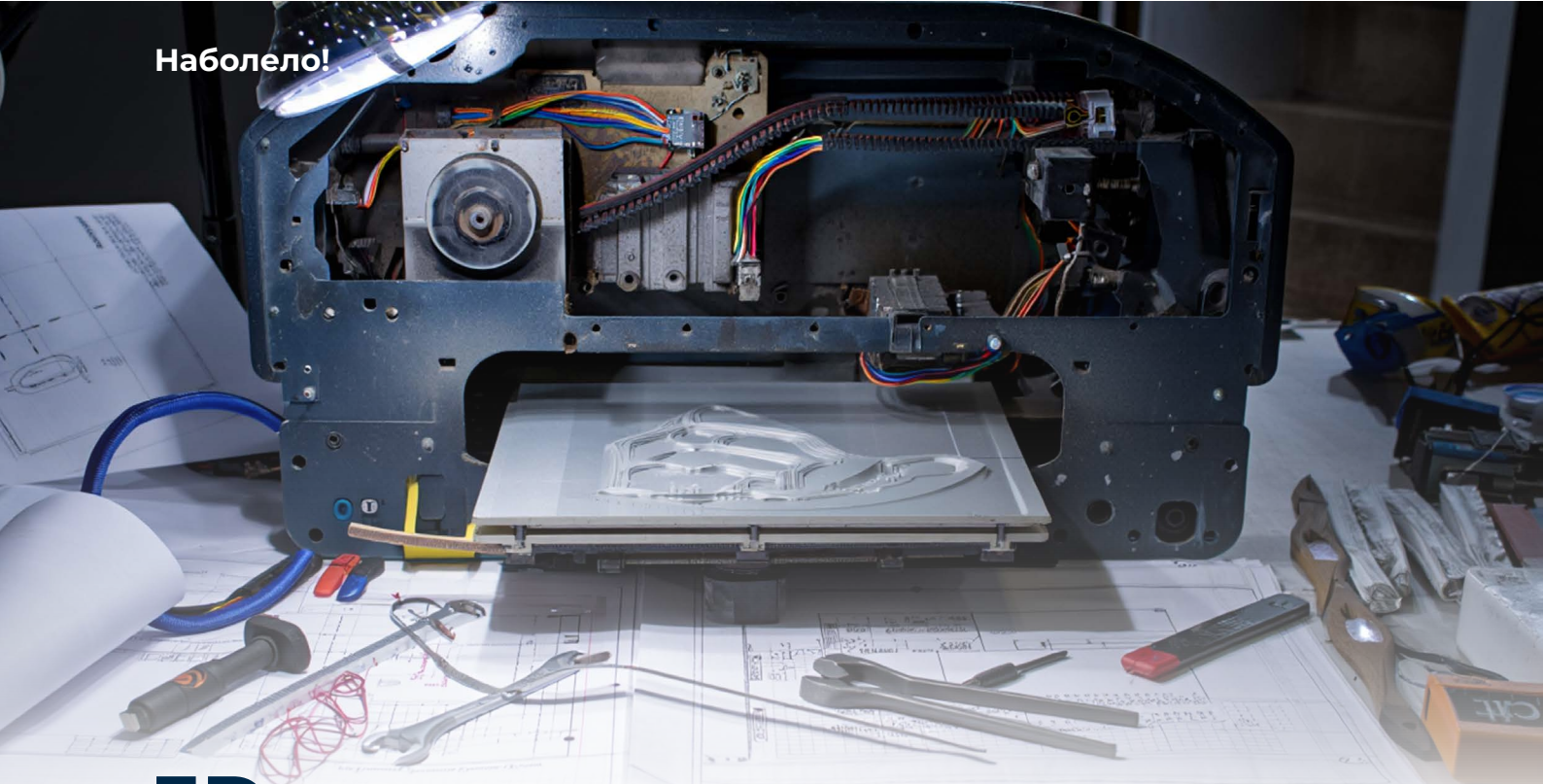
Конечно, до полного импортозамещения ещё далеко. Многие технологии от мировых лидеров, особенно в области высокоточного машиностроения, пока остаются недоступными. Но важно то, что процесс уже запущен, и он идёт не только «сверху», по инициативе государства, но и «снизу» — благодаря компаниям, готовым вкладываться в развитие собственных компетенций.

Что же ждёт эту сферу в ближайшие годы? Скорее всего, мы увидим дальнейшее развитие кооперации между предприятиями, научными институтами и государственными структурами. Уже сейчас есть примеры успешного взаимодействия,

когда университеты помогают с исследованиями материалов, а инжиниринговые центры — с испытаниями прототипов. Кроме того, постепенно налаживается система обмена опытом — компании начинают делиться наработками, понимая, что в условиях санкций только совместные усилия могут дать по-настоящему значимый результат.

И если сначала реинжиниринг воспринимался как вынужденная мера, то теперь он становится полноценным инструментом развития. Это уже не просто «ремонт» чужих технологий, а создание собственных, подчас более совершенных решений. И кто знает, возможно, через несколько лет именно российские разработки будут задавать тренды в пищевом машиностроении. Как говорится, нет худа без добра — иногда самые сложные вызовы открывают новые возможности. 

**Дмитрий Трубашевский,
Светлана Бакарджиева**



3D-печать – не для глянца

Если бы те, кто регулярно выступает с докладами и презентациями про аддитивку и пишет про нее статьи, получали деньги за каждое слово вроде «прорыв», «лидер рынка» или «беспрецедентный» в сфере 3D-печати, они давно бы забросили свой наполненный рисками и проблемами бизнес, связанный с АП, и сосредоточились исключительно на столь хлебных панегириках этой индустрии. Да уже и так их стараниями каждый новый продукт, связанный с аддитивкой, преподносится как революция — будто до этого всё было плохо, а теперь наконец-то промышленный мир осчастливлен решением всех проблем.

Но вот куда они на самом деле мостят дорогу своими безудержными славословиями? Ведь, если отбросить эту маркетинговую шелуху, реальность оказывается куда прозаичнее. Давайте честно: настоящей революции в аддитивном сегменте пока не случилось. Или, если революционные процессы и набирают обороты, то явно не там, где их захлёб рекламируют.

Сегодня сложно найти

компанию, которая не называла бы свой софт, материал или принтер «меняющим правила игры». В презентациях — красивые графики, научнообразные термины, эффектные ролики. Но стоит попробовать напечатать что-то простое, как сразу возникают очень неудобные вопросы: почему слои расходятся? Почему геометрия «плывёт»? Почему томография показывает больше пустот, чем в твердом швей-

царском сыре?

И тогда становится ясно: между этими громкими заявлениями и реальностью — пропасть. Не то, чтобы технологии плохи или машины неудачные. Просто они не столь безупречны, как о них говорят.

Маркетологи, конечно, делают свою работу так, как они её понимают, — создают шумиху, привлекают внимание. Но в какой-то момент это перестаёт ра-

ботать. Потому что рынок взрослеет. Инженеры, технологи, дизайнеры, и тем паче инвесторы больше не ведутся на громкие слова. Им нужны обоснования: факты, конкретные цифры, результаты тестирования, подтверждающие заявленные характеристики. Они хотят знать не только о преимуществах, но и о недостатках и ограничениях, и об их балансе. Им важно понимать, что изменится в их работе после внедрения нового материала или принтера. И как скоро эта новация окупится. А нередко им также требуется инжиниринговая помощь поставщика-новатора в освоении технологии, в обучении персонала работе на оборудовании.

Когда каждый продукт навязчиво и бездоказательно представляют как «уникальный и не имеющий аналогов» или «лучшее решение для промышленности», производственники рано или поздно перестают воспринимать это всерьёз. И это не просто усталость от маркетинговых штампов — это потеря доверия к самой технологии.

А между тем 3D-печать действительно способна на многое. Она уже повсюду применяется в авиации, машиностроении, медицине, автопроме. Вспомните пациентов с напечатанными имплантами и протезами

или производства, где аддитивные технологии сократили сроки изготовления оснастки, улучшили характеристики и уменьшили себестоимость готовых изделий. Это реальные успехи — но информация о них тонет в потоке приевшихся рекламных формулировок.

Представьте, если бы вместо восхваления очередного «прорыва» компании начали честно рассказывать, как их материал ведёт себя в реальных условиях. Как он переносит нагрузки. Сколько циклов печати выдерживает. Где его можно использовать, а где — не стоит. Если бы презентации и статьи про аддитивку стали не ритуальными рекламными танцами с бубном, а реальной логикой в мире АП.

Почему это важно? Потому что аддитивные технологии сейчас на переломном этапе. То, что десять лет назад было экспериментом, сегодня становится привычной составляющей промышленности. И чтобы этот переход завершился, нужны не громкие лозунги, а проверенные данные, кейсы и открытый диалог.

Проблема в том, что, когда всё вокруг объявляют «революционным», мы перестаем замечать реальный прогресс. Ждём прорыва, а он чаще всего приходит незаметно — через небольшие, но стабильные

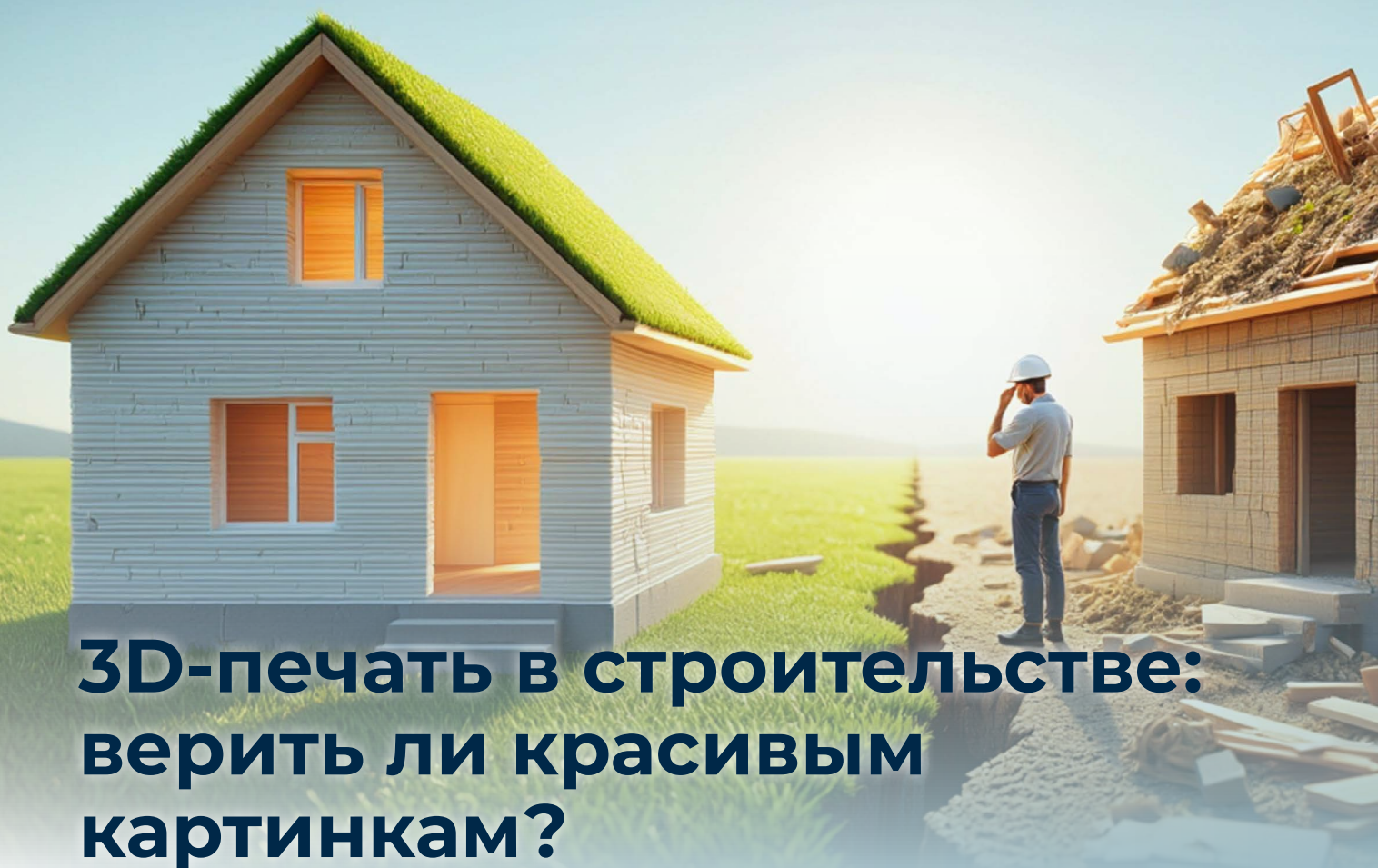
улучшения. Когда принтер печатает без сбоев. Когда материал держит допуски. Когда система работает так, как обещано.

Вместо того, чтобы искать новые способы сказать «мы лучшие», можно просто показать, что получилось. Выложить результаты тестов, сравнение с аналогами, реальные примеры использования. Такой подход не вызовет взрывных эмоций, зато создаст основу для устойчивого развития.

Может быть, хватит уже искать «создателей трендов» и «революционеров»? Давайте просто делать хорошие продукты. Надёжные, проверенные, понятные. Те, которые не обещают изменить мир, но исправно делают свою работу — день за днём, без сюрпризов.

Революция, возможно, ещё случится. Но не потому, что кто-то громко её провозгласит. А потому что тысячи специалистов по всему миру начнут доверять технологии. Потому что увидят её реальные возможности. Потому что смогут точно рассчитать эффект, а не гадать на основе красивых презентаций.

А пока давайте хотя бы немного меньше говорить о революциях. И немного больше — о том, как всё работает на самом деле. 



3D-печать в строительстве: верить ли красивым картинкам?

Когда технология 3D-печати зданий только появилась, её воспринимали как настоящий прорыв. Производители оборудования для печати на улице обещали фантастические результаты: минимальные затраты, возможность работать в любых условиях и невероятную скорость строительства — возведение домов за считанные дни. И до сих пор в соцсетях, на выставках и в рекламных материалах регулярно появляются громкие заявления о том, что «дом напечатали за несколько дней», «стоимость стен составляет всего X тысяч рублей» и «технология совершит революцию в отрасли». Но при ближайшем рассмотрении становится очевидной огромная пропасть между маркетинговыми обещаниями и реальными результатами.

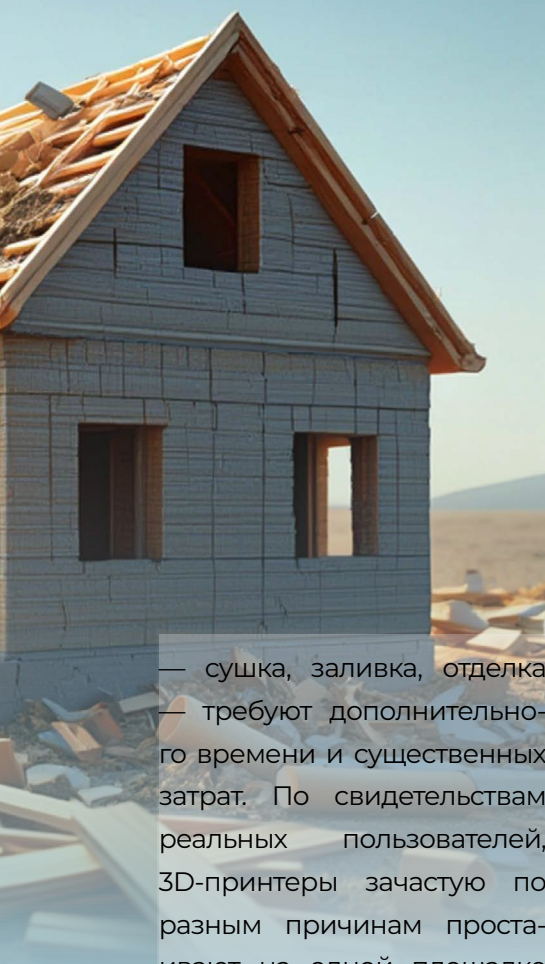
Возьмём для начала аргумент, считающийся главным козырем: «дом напечатан за несколько дней». Этот слоган стал визитной карточкой 3D-строительства. Однако важно понимать: что именно печатается? На самом деле

3D-принтеры создают не готовое здание, а лишь несъёмную опалубку — своеобразный каркас, который затем заполняется бетоном или другим конструкционным материалом. Таким образом, технология действительно

но ускоряет отдельный этап строительства, но не заменяет весь процесс целиком.

Даже при идеальных условиях печать опалубки для одного объекта занимает минимум четыре дня. И это только начало! Последующие этапы





— сушка, заливка, отделка
— требуют дополнительного времени и существенных затрат. По свидетельствам реальных пользователей, 3D-принтеры зачастую по разным причинам простаивают на одной площадке по три месяца и более. Если же напечатанный объект действительно «готов» через обещанные «несколько дней», то речь идёт лишь о начальной стадии строительства, а не о полноценном жилом доме или промышленном сооружении.

Качество печати также оставляет желать лучшего. Многие пользователи отмечают заметные отклонения в горизонтальных слоях — дефекты, которые невозможно полностью устранить даже при финишной отделке. Один из застройщиков рассказал, что черновая штукатурка стен дома площадью 100 м² обошлась ему в 1,5 млн.

рублей — в сумму, превышающую стоимость самого принтера!

Любопытно, что большинство покупателей оборудования руководствовались именно теми самыми заманчивыми обещаниями: «быстро», «дёшево», «минимум рабочей силы». Однако, столкнувшись с реальными условиями эксплуатации, они быстро разочаровывались, — реальность оказалась далёкой от рекламных заверений.

Пользователи, делящиеся своим опытом в профессиональных сообществах, единодушно отмечают: ожидания и реальность кардинально различаются. Многие признаются, что, зная они заранее все подводные камни, они либо отказались бы от покупки, либо подошли бы к этому вопросу гораздо более осторожно.

Безусловно, технологии способны изменить мир, но только при условии их честного внедрения, без необоснованных утверждений и стыдливых умолчаний. Когда вокруг 3D-печати на стройке создаётся информационный пузырь из преувеличений, красивых роликов и невыполнимых обещаний, рано или поздно рынок начинает всё это отторгать. Инвесторы, застройщики и конечные потребители хотят чётко понимать, что они получают. И когда первые же реализованные проекты сталкиваются

с проблемами качества, срывами сроков и превышением бюджета, доверие к технологии быстро исчезает.

Возможно, когда-нибудь 3D-печать действительно станет новым стандартом в строительстве. Но для этого необходимо:

- быть предельно честными с клиентами;
- предоставлять точные расчёты;
- тщательно изучать реальные возможности и ограничения технологии.

Важно не просто создавать красивую картинку для рекламы, а открыто делиться опытом, обсуждать трудности и совместно искать решения.

Пока же создается впечатление, что самые громкие заявления в этой сфере исходят от тех, кто хуже всего понимает реальное положение дел, либо намеренно вводит потенциальных потребителей в заблуждение.

Чем больше правды — тем выше доверие. Чем больше пустых обещаний — тем глубже разочарование. Истинные инновации рождаются не из громких лозунгов, а из кропотливой работы над совершенствованием технологии.

Попробуйте ответить себе на вопрос: может ли подобное существовать и с другими аддитивными технологиями вне строительной отрасли? 



Прорыв «до востребования»

Аддитивные технологии: правда, о которой все молчат

Давайте отбросим сладкие иллюзии и корпоративные презентации. Мир уповает на аддитивные технологии (АТ), но есть ли реальный прорыв в промышленности? Движение к нему уперлось в стену нашего собственного консерватизма. Не в стоимость машин или материалов – нет. Главный тормоз – наша инерция, наше упрямое желание втиснуть революцию в прокрустово ложе старых процессов. Мы все еще смотрим на 3D-печать как на дорогую игрушку для прототипов или экзотических деталей, отчаянно пытаюсь измерить ее эффективность мерками литья, фрезеровки или штамповки. И в этом – фатальная ошибка.

Сила АТ не в том, чтобы делать то же самое, но чуть иначе. Их истинный потенциал – взрывать парадигмы. Не эволюционное

улучшение, а радикальное переизобретение самого подхода к созданию вещей: от замысла в CAD до готового изделия на складе. И

пока мы не осознаем этого, будем топтаться на месте.

Скорость. Качество. Два культовых символа для промышленника. И именно

здесь АТ сегодня не просто отстают – они подводят. Часы, а то и дни на одну деталь? Это анекдот для массового рынка, где счет идет на секунды. Проблемы повторяемости, скрытые поры, необходимость долгой и дорогой постобработки? Для индустрии, где надежность – религия, это неприемлемо. И да, я скажу то, что многие боятся озвучить: пока АТ не решат эти проблемы, они останутся дорогой нишевой экзотикой, а не драйвером новой индустриализации.

Мы вновь и вновь пытаемся сразить скептиков восторженными рассказами об историях успеха АТ в авиакосмосе или медицине, забывая простую истину: эти сектора – исключение, а не правило. Их бюджеты и допуски на риски не имеют ничего общего с жесткой экономикой автопрома, энергетики или массового машиностроения. Там нужны не уникальные штучные изделия, а тысячи, десятки тысяч идентичных деталей – быстро, дешево и безупречно. И АТ сегодня с этим не справляются. Признать это – не поражение, а первый шаг к реальному прорыву.

Что нужно? Не мелкие улучшения, а прыжок в неизведанное.

- Скорость: рост не на проценты, а в разы. Требуется не просто мультила-

зерные системы, а принципиально иные физические принципы нанесения материала. Вы, наверное, уже слышаны, что есть смелые попытки синтеза форм не точечно, а сразу плоскостями или в объеме. Гибридные установки, где печать и финишная обработка происходят в одном цикле, без переустановки. Скорость должна сделать печать серии дешевле традиционных методов – особенно для сложных или кастомизированных изделий. Иначе – тупик.

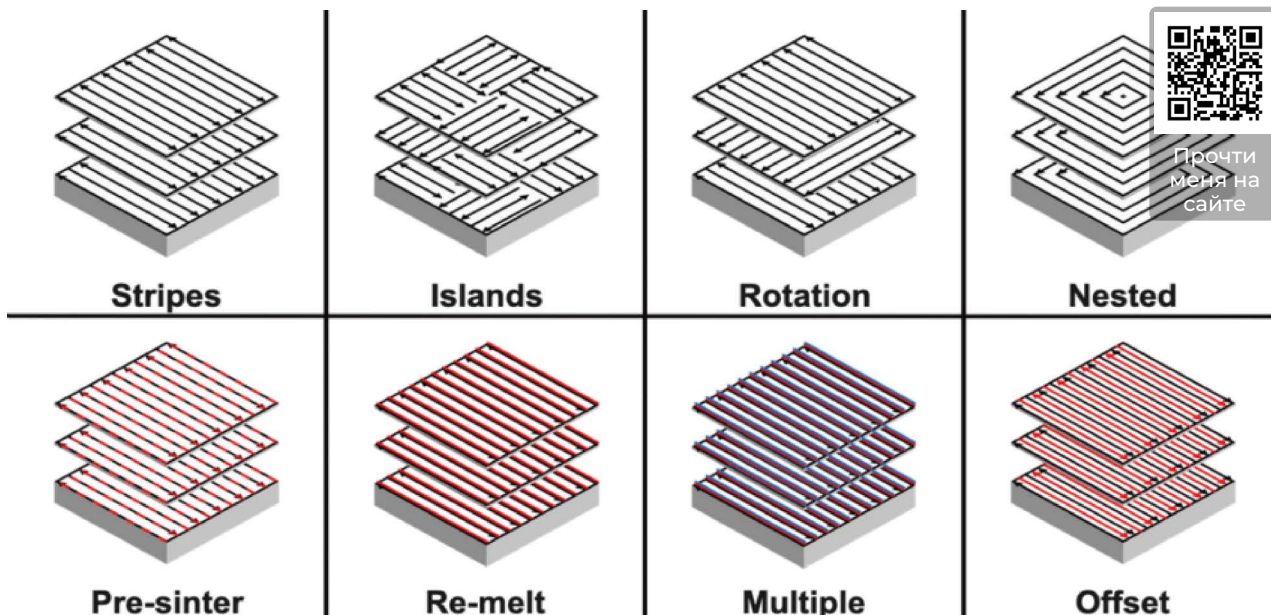
- Качество: гарантированное, предсказуемое, с первого раза. Деталь не «почти как кованая», а лучше. Это требует материалов, рожденных для аддитива (DfAM), а не адаптированных под него. Нужен интеллектуальный процесс в реальном времени – армия сенсоров и ИИ, мгновенно корректирующих каждый микрон при наплавке, исключая брак до его возникновения. Цифровая нить должна быть абсолютной: от модели до готового изделия с полной прослеживаемостью и прогнозом свойств. Постобработка? Она допустима как редкое исключение, но никак не правило. Таковы слагаемые качества АТ.

- Почему это так критично? Потому что только тогда произойдет сдвиг. Когда скорость и качество АТ ста-

нут конкурентными в серийном потоке, индустрия повернется к ним лицом. Не из любви к инновациям, а из прагматичного расчета. Откроются двери в настоящий мейнстрим. Кастомизация перестанет быть роскошью – станет экономически оправданной нормой (представьте персонализированные импланты или запчасти по цене серийных!). Устойчивость – не пиар-ход, а естественное следствие минимизации отходов и легких конструкций.

Создание таких технологий – не инженерная задача. Это миссия. Миссия по переходу от кустарного «аддитивного производства» к зрелой «аддитивной индустрии» (ее еще нет!). К фундаменту новой революции, где геометрическая сложность ничего не стоит, кастомизация доступна каждому, а экология вшита в ДНК продукта.

Промышленникам пора проснуться. Хватит робко присматриваться – требуйте этих прорывов! Инвестируйте не в сегодняшние ограничения, а в завтрашние возможности. Разработчикам – хватит латать дыры в старых технологиях. Мыслите за пределами порошкового слоя и экструдеров! Создавайте то, что сметет нынешние барьеры. 



Магия тонких настроек

Представьте ситуацию: вы, что называется, всю душу вложили и потратили уйму времени и сил на проектирование сложной металлической детали — с тщательно продуманной геометрией, множеством внутренних каналов и тонкостенными элементами. Печать по технологии L-PBF завершилась, и вот перед вами результат... Всё наперекосяк. Свисающие элементы деформированы, отверстия «поплыли», а стенки утратили точную форму. Это не просто незачетная попытка — это потерянные деньги, упущенное время и, в случае авиации или медицины, срыв сертификации. Казалось бы, можно было поставить больше поддержек. Но, как показывает практика, это лишь полумера. Ключевые проблемы спрятаны глубже.

Всё дело в том, как материал ведёт себя под действием тепла. Лазер — инструмент мощный, но в то же время капризный: он быстро нагревает порошок, а затем происходит столь же стремительное охлаждение. Эти перепады температур создают внутри детали остаточные напряжения. Материал сначала расширяется, затем сжимается — причем, неравномерно. Как результат — коробление,

изгиб, «подтягивание» краёв. Особенно страдают свисающие элементы геометрии и внутренние полости. Там, где нет твердой основы или доступа для эффективного отвода тепла, начинаются проблемы.

Одна из самых опасных ситуаций — это так называемое завивание свесов: тонкий участок начинает загибаться вверх. Если он поднимается слишком высоко, происходит

удар по ракелю, и тогда можно потерять не только деталь, но и весь рабочий день. Даже если такой катастрофы не произошло, каждый дополнительный микрон искажения — это шаг от проектной точности, требующей постобработки, подгонки или полной переделки. Всё это тормозит производство и снижает рентабельность технологии.

Теперь главное: можно ли обойтись без массивных

поддержек? Да. И ключ к этому — не только в геометрии, но и в термодинамике. А именно — в управлении тем, как и когда лазер подводит тепло к каждой части детали. На первый взгляд это может показаться тонкой настройкой, вроде незначительного изменения направления сканирования. Но на практике такие настройки радикально меняют поведение металла в момент плавления и затвердевания.

Когда лазер сканирует поверхность, — слой за слоем, штрих за штрихом, — он фактически рисует термическую карту детали. Меняя этот рисунок, инженеры управляют тем, где и как возникают напряжения. Например, поворот направления сканирования с каждым слоем позволяет распределить их более равномерно. Внутри детали не образуются «горячие» зоны, которые потом тянут металл в одну сторону. Разделение больших плоскостей на маленькие «острова» с паузами между их обработкой даёт возможность металлу немного остыть, прежде чем продолжится работа, и это резко снижает риск коробления.

Для тонких элементов или отверстий применяют иную стратегию: сначала обрабатывается контур — как будто создаётся защитная оболочка, удерживающая расплав внутри. Внутренние зоны начинают плавить только после этого, чтобы избежать

вытягивания краёв. На практике это даёт более чёткие границы, особенно важные в соединительных узлах и прецизионных элементах.

Но и этого мало. Настоящая магия начинается, когда параметры подстраиваются под конкретную геометрию. Тонкая стенка? Тогда снижаем мощность, увеличиваем скорость, чтобы избежать перегрева. Внутреннее отверстие? Увеличим шаг между линиями сканирования, чтобы не перегружать зону теплом. Иногда помогает повторное сканирование уже затвердевшего слоя — аккуратное, точно дозированное, чтобы снять напряжения, но не испортить микроструктуру. Это не догма, а аккуратный баланс: чуть больше — и возникнут поры или крупнозернистая структура.

Для самых сложных случаев — гибридные подходы. Один и тот же слой может обрабатываться разными методами в зависимости от того, в какой части находится лазер. Там, где плотная масса, — одна стратегия. Приближаясь к свесу или отверстию — переходим на другую. Это как шитье: грубая ткань — толстая игла, шёлк — тонкая. Такой подход позволяет сохранять геометрию даже у участков с углами менее 45°, где традиционно всегда требовались поддерживающие структуры.

Очень важно, чтобы инженер ещё на этапе подготовки учёл расположение дета-

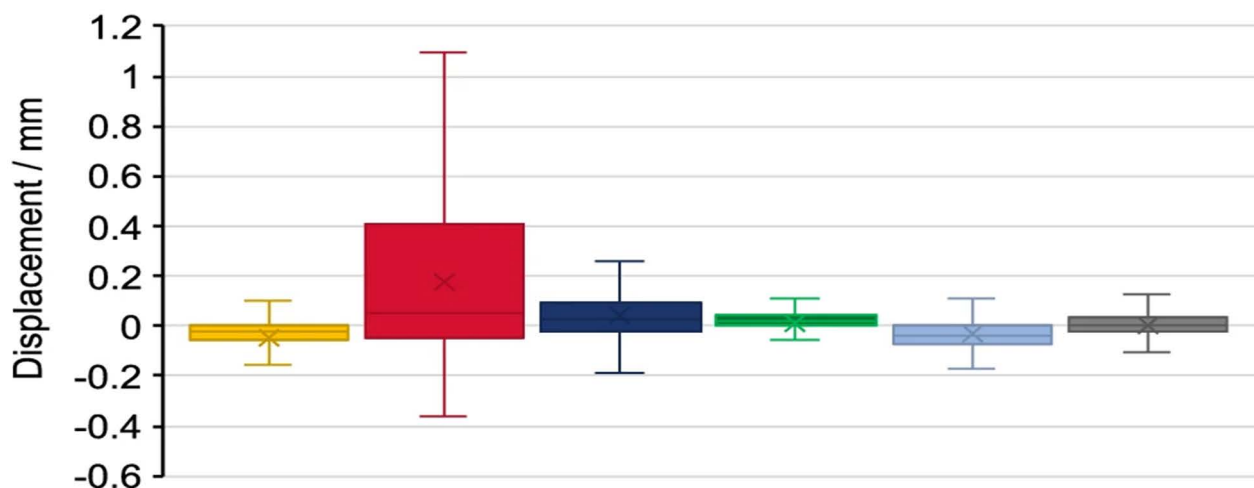
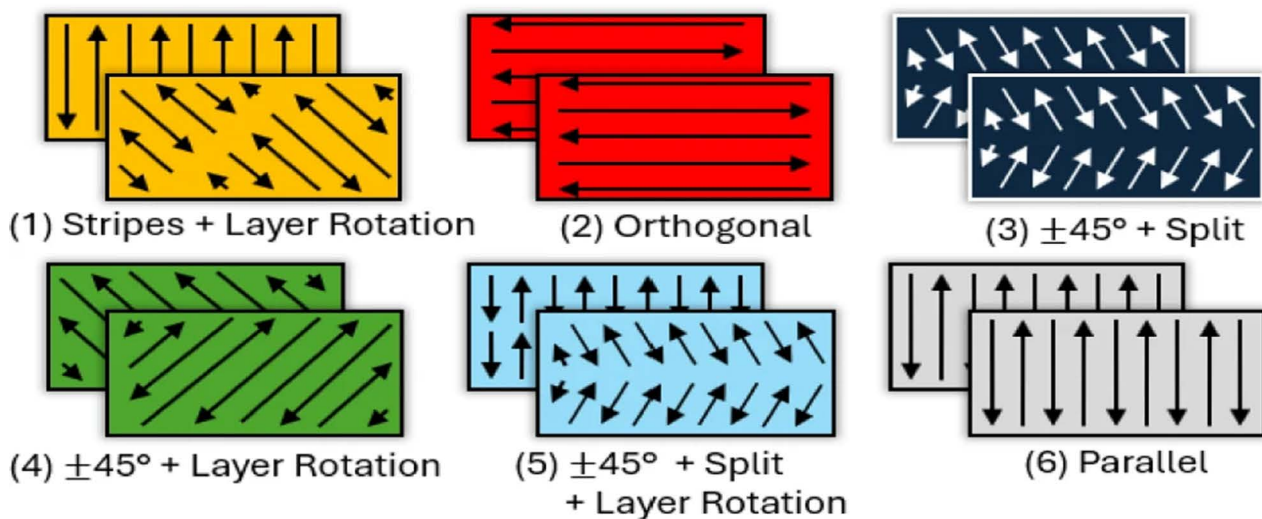
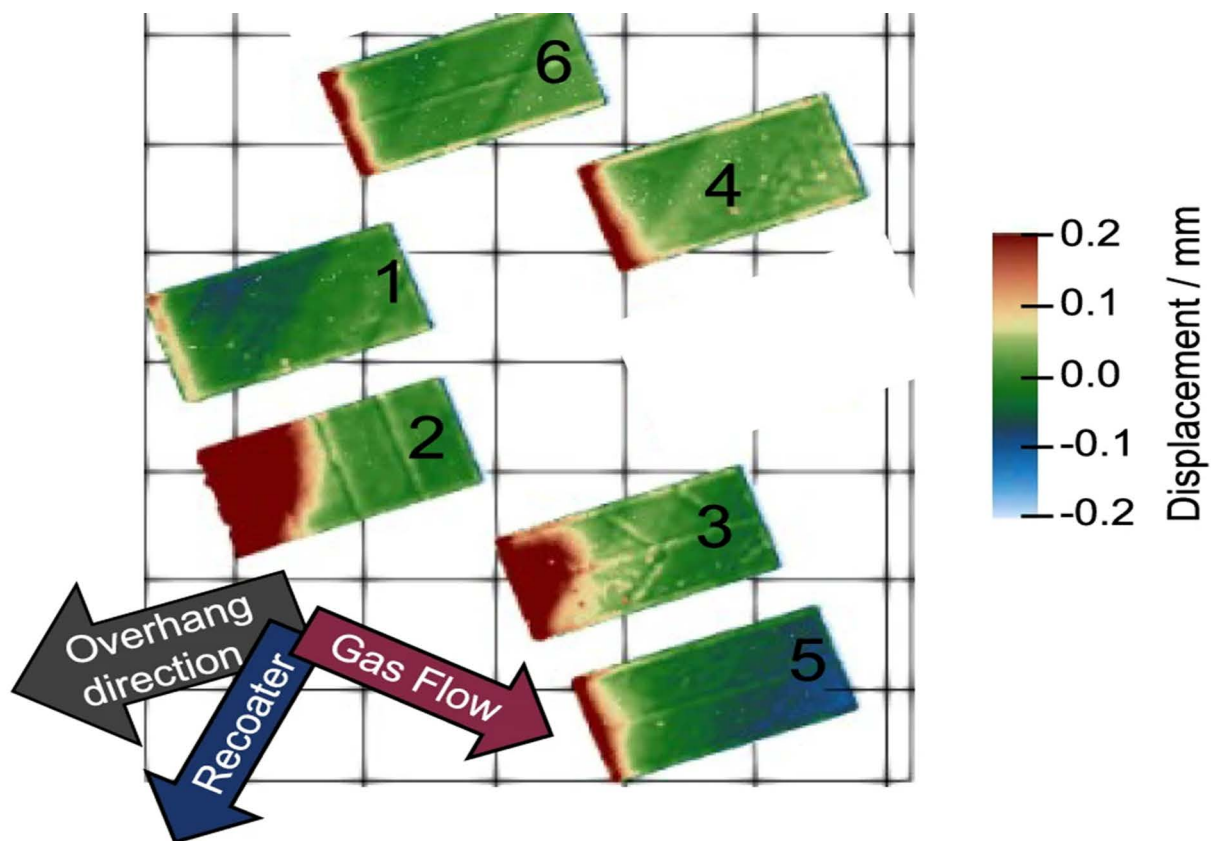
ли в пространстве. Иногда достаточно повернуть её на 15–20 градусов — и критические свесы станут плоскими участками. Сложность задачи — не в самой геометрии, а в том, как она будет вести себя во время плавления.

Поддержка деталей в LPBF — это не только про поддержки. Это про понимание всего теплового процесса: от первого импульса лазера до последнего остывшего слоя. Именно здесь кроется путь к настоящему контролю. Предварительный подогрев платформы, стабильный поток инертного газа, правильная стратегия размещения — всё это снижает градиенты и, значит, напряжения.

Но и на этом история не заканчивается. После печати детали нуждаются в термообработке — чтобы «успокоить» металл, выровнять внутренние напряжения. Это как дать материалу выдохнуть после напряжённой работы. Только так можно быть уверенным, что он не поведёт себя неожиданно уже в готовом изделии.

Появляется ещё один ключевой элемент — мониторинг в реальном времени. Современные системы способны следить за каждым слоем, фиксируя возможные дефекты до того, как они станут критичными. Это не только профилактика брака, но и ценный источник данных для настройки процессов.

Что в итоге? Более точные, чистые детали. Меньше пере-



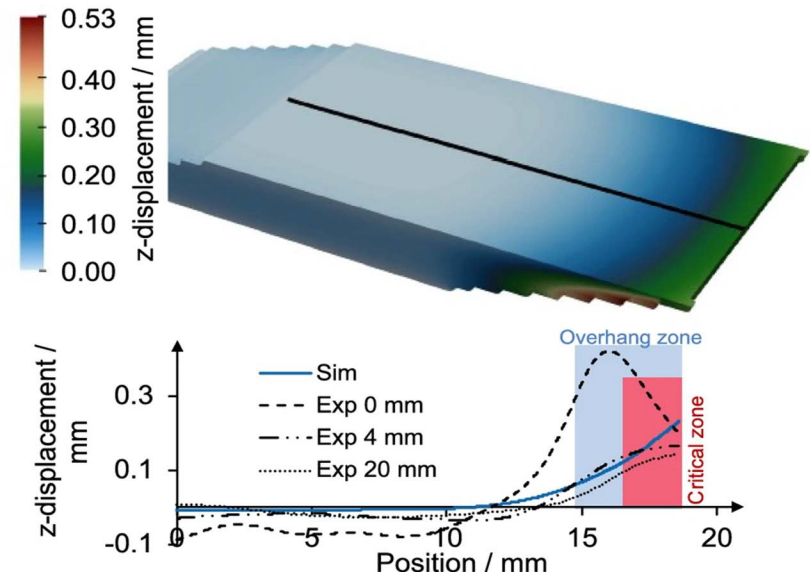
Смещение (вверху), иллюстрация штриховки (в середине) и диаграммы смещения (внизу) для образцов с нависанием 30° , построенных с использованием различных стратегий штриховки

работки. Меньше риска для оборудования. И — самое главное — стабильность. Когда вы точно знаете, как поведёт себя материал, как «откликнется» на параметры сканирования, вы выходите на другой уровень производства. А значит, быстрее сертифицируете изделие, быстрее запустите его в серию, быстрее выведете продукт на рынок.

Лазерное наплавление — технология тонкая. И чем глубже в неё погружаешься, тем яснее становится: контроль начинается не с поддержки, а с понимания. Управление теплом — это язык, на котором металл говорит с инженером. И если вы научитесь слышать этот язык, детали начнут получаться такими, как вы и задумывали. Без искажений. Без неприятных сюрпризов в ходе эксплуатации.

В России работают высококвалифицированные команды, способные решать даже самые сложные задачи лазерного сканирования для аддитивного производства по технологии селективного лазерного плавления. Их богатый опыт позволяет минимизировать искажения, оптимизировать технологические процессы и добиваться безупречного качества деталей, сводя к минимуму использование поддерживающих структур.

Яркий пример — специалисты компании AM.TECH,



Моделированное смещение образца с нависанием 25° с использованием метода внутренней деформации (вверху). Сравнение смоделированного и экспериментального смещения в верхнем слое вдоль черной оценочной линии (внизу)

разработавшие уникальные подходы к управлению тепловыми процессами при L-PBF печати. Они применяют динамическую адаптацию параметров лазерного сканирования, подбирая оптимальную мощность и скорость для каждого участка детали. Для сложных геометрий используются гибридные стратегии печати, сочетающие разные методы обработки в рамках одного изделия. Особое внимание уделяется системе термомониторинга, позволяющей контролировать процесс в реальном времени и предотвращать деформации на ранних стадиях.

Эти передовые решения уже нашли применение в аэрокосмической отрасли и медицине, где требования к точности и надежности особенно строги. Команда AM.TECH не только успешно решает сложные технические задачи, но

и значительно сокращает сроки вывода продукции на рынок, что сегодня является ключевым преимуществом при внедрении инновационных технологий.

Их методы — это проверенные на практике решения, а не просто теоретические разработки. Сотрудничество с такими специалистами гарантирует высочайшее качество, сокращение сроков производства и оптимизацию затрат, избавляя от необходимости идти методом проб и ошибок. Российские инженеры доказали, что их экспертиза в области аддитивных технологий соответствует самым высоким мировым стандартам. 

Дмитрий Трубашевский

Авторская адаптация:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s40964-025-01156-8>



Лазерные системы

Не история успеха, а хроника упорства

Компания «Лазерные системы» — один из бесспорных лидеров отечественной аддитивки в сегменте 3D-принтеров для печати металлом по технологии L-PBF. При этом в самой компании к лестным оценкам их достижений относятся с изрядной долей здорового критицизма. Признавая наличие сформированного задела, наработанных компетенций и культуры разработки, ее команда осознает необходимость движения вперед к более совершенным новым продуктам и объективно оценивает сложности на пути достижения мирового уровня технологии. В этом цикле статей директор департамента АТ АО «Лазерные системы» Алексей Ким расскажет о сложностях, важности коллектива, вере в успех и удаче — факторах, которые привели компанию к текущему положению. Это не история успеха, а обобщение опыта кропотливой работы с верой в себя и свое дело и вопреки обстоятельствам.

Риск-менеджмент против, а команда — за!

Компания «Лазерные системы», а ранее – ООО «Научно-производственное предприятие «Лазерные системы», образовалась в 1998 году на базе Балтийского го-

сударственного технического университета «Военмех» им. Д. Ф. Устинова. Несмотря на «вузовское» происхождение, компания тяготела к диверсификации и освоению выпуска серийной продукции, используя накопленный научный за-

дел и сильную инженерную школу. История нашего аддитивного направления началась в 2010-х, когда компания, опираясь на наработанные компетенции в лазерной технике и гидрогазодинамике, при поддержке Минпромтор-

га РФ взялась за работы, сформировавшие существенный научно-технический задел, послуживший фундаментом будущего флагманского направления компании. Реализованный проект не попал «в стол», а полученный задел и компетенции были доведены инициативным порядком до опытного образца.

В 2016 году мы продемонстрировали первый работающий российский SLM 3D-принтер. Эта установка уже тогда имела дизайнерские решения, отсылающие к промышленному оборудованию лучших европейских производителей. Она стала серьезной заявкой на запуск в серию. Однако внешние условия этому явно не способствовали: российский рынок был крошечным, а доверие к новому отечественному игроку на фоне европейских гигантов – минимальным.

И всё же, несмотря на общий скепсис, отсутствие рынка и полную неопределенность, наше руководство, следуя негласному правилу компании доводить дела до логического завершения, приняло решение: довести разработку до серийного продукта в инициативном порядке. По всем правилам менеджмента рисков, этот проект, возможно, следовало бы закрыть еще в 2017 году. Аргументы за — вера в технологию, энтузиазм команды, оглядка на западный рынок, наконец, предвидение.

До 2021 года направление не приносило значимых результатов, существовало «на иждивении» компании. Работы по совершенствованию шли с переменной интенсивностью. Однако было достигнуто главное — удалось сохранить костяк команды разработчиков. Это стало возможным благодаря энтузиазму самих сотрудников, готовых с полной самоотдачей работать над сложной задачей, и воле руководства находить ресурсы. Вопрос о закрытии поднимался многократно вплоть до конца 2022 года. Российский рынок промышленного оборудования традиционно предпочитал доступный тогда европейский и американский импорт, и наш 3D-принтер мало кого интересовал. Выживать в таких условиях — без инвестиций, заказов, сбыта — было можно, но развиваться — крайне сложно.

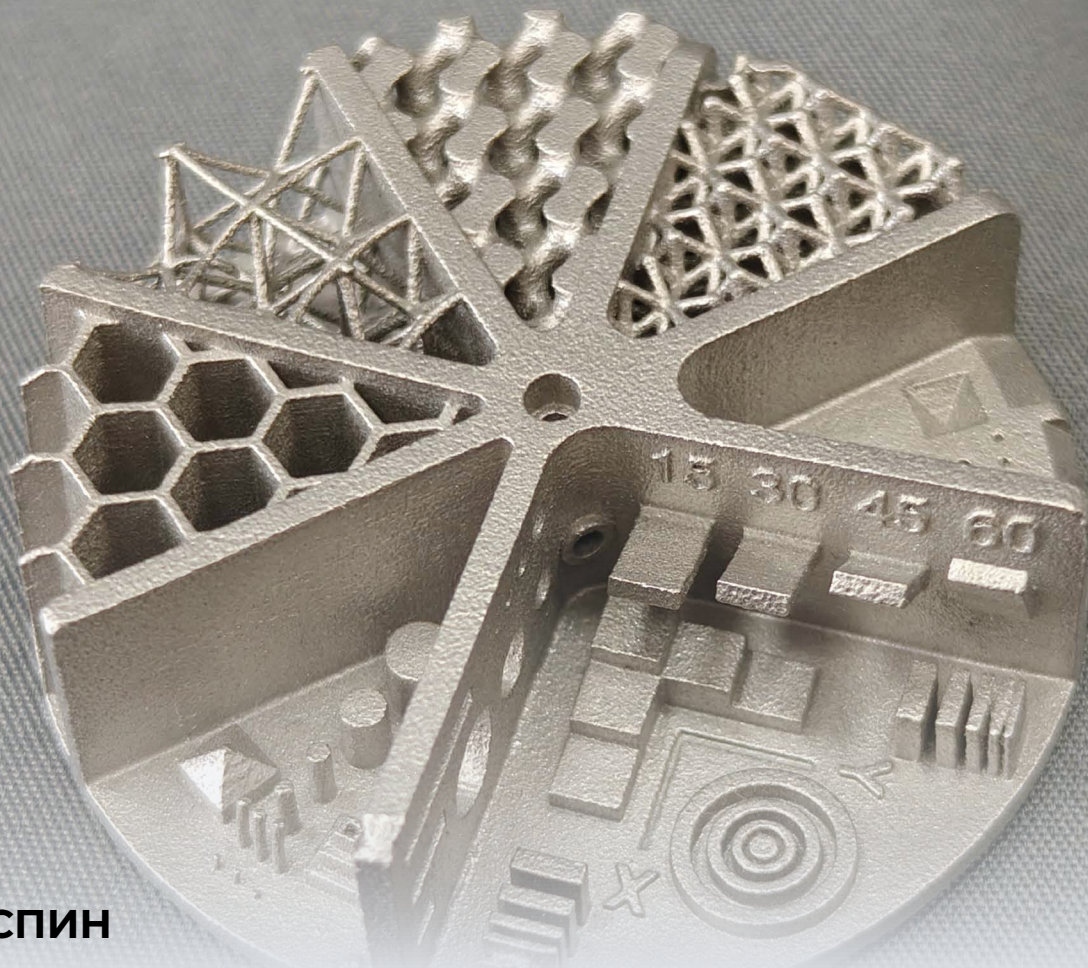
2022 год стал переломным. Окно возможностей для отечественных технологий рас-

пахнулось. Рынок SLM, хотя и небольшой, обрел вполне понятные очертания. Накопленный «Лазерными системами» за годы упорной работы потенциал наконец получил шанс на реализацию. Сегодня мы конкурируем уже с азиатскими производителями, и это новые вызовы.

Считать путь нашего аддитивного направления историей успеха — значит, совершить «ошибку выжившего». Гораздо показательнее судьба других перспективных проектов, которым не удалось найти своего потребителя. Наш нынешний результат — это прежде всего следствие упорства, готовности идти на риск, веры команды в свою работу и решения руководства сохранять направление даже в самые трудные времена. Это история о том, как вопреки обстоятельствам и логике рынка того времени удалось не просто выжить, но и создать продукт, востребованный сегодня. 



На сборочном участке компании. Фото: АО «Лазерные системы»



СПИН

MBJ – как мы разгадывали головоломку новой технологии

От цилиндров к ювелирной точности

В первой части мы рассказали, как осваивали Metal Binder Jetting (MBJ) — технологию, которая превратила наш цех в алхимическую лабораторию. Теперь, спустя месяцы экспериментов, мы перешли от хаотичных попыток к системному подходу. В этой части мы поделимся, как научились печатать простые цилиндры и бруски, тестировать усадку, работать с тонкими стенками и создавать ювелирные изделия вроде значков нашей компании. Это история о том, как MBJ заставляет думать не только как инженер, но и как художник.

Тестирование основ:

цилиндры, бруски и усадка

Когда мы наконец разобрались с базовыми настройками принтера, настало время для систематических тестов. Начали с простого — печати цилиндров и брусков. По пять комплектов деталей, размещенных по осям X, Y, под 45 градусов и вертикально. Это был наш способ понять, как ведет себя технология в реальных условиях. После печати четыре комплекта отправлялись на спекание, а один оставался для сравнения.

Усадка сюрпризов не преподнесла. Мы рассчитывали на равномерную — около 20% по каждой оси, и это подтвердилось опытным путем.

Когда усадка стала предсказуемой, мы перешли к тестовому сравнению. Эти сложные геометрические фигуры помогли нам проверить точность принтера и выявить пределы технологии.

Именно здесь мы открыли для себя особенность MBJ: возможность печатать тонкие стенки — толщиной до 0,1 мм. Но была

и обратная сторона медали: высокие тонкие структуры часто не выдерживали очистки перед спеканием. Нужно было соблюдать баланс высота-толщина.

Очистка деталей: ювелирная работа

Очистка неспеченных деталей в MBJ — это отдельное искусство. Зеленые заготовки, только что из принтера, хрупкие, как сухое печенье. Пришлось вооружиться мягкими кисточками и терпением. Каждую деталь мы обметали вручную, словно археологи, извлекающие артефакт из песка. Один неловкий штрих — и тонкая стенка могла треснуть.

Этот процесс превратил наш цех в подобие ювелирной мастерской. Мы даже шутили, что пора нанимать часовщиков. Но именно эта кропотливая работа позволила нам сохранить сложные геометрии до спекания. Вакуумная печь завершала магию: детали, пережившие очистку, превращались в прочные металлические изделия с плотностью до 99,8%.

*Распаковка проекта.
Фото: СПИН*





Готовые значки после удаления связующего, спекания и полировки. Фото: СПИН

Печать значков: тест на мастерство

Чтобы проверить возможности МВЖ на реальном кейсе, мы решили напечатать значки с логотипом нашей компании. Логотип — сложная структура с тонкими гранями и мелкими деталями, идеальный вызов для технологии. Печать значков стала настоящим экзаменом: тонкие стенки (0,19–0,48 мм) требовали идеальной калибровки принтера, а мелкие элементы — филигранной очистки.

Результат превзошел ожидания. Значки получились четкими, с гладкими гранями и точной геометрией. После спекания они приобрели металлический блеск, который подчеркивал каждую линию логотипа.

Фото готовых значков и видео их создания стали хитом на наших внутренних презентациях.

Мы также выполняли заказы для других

компаний, но, увы, соглашения о конфиденциальности, как всевидящее око, не позволяют раскрыть детали. Скажем лишь, что значки стали началом: клиенты оценили способность МВЖ создавать сложные формы с высокой детализацией.

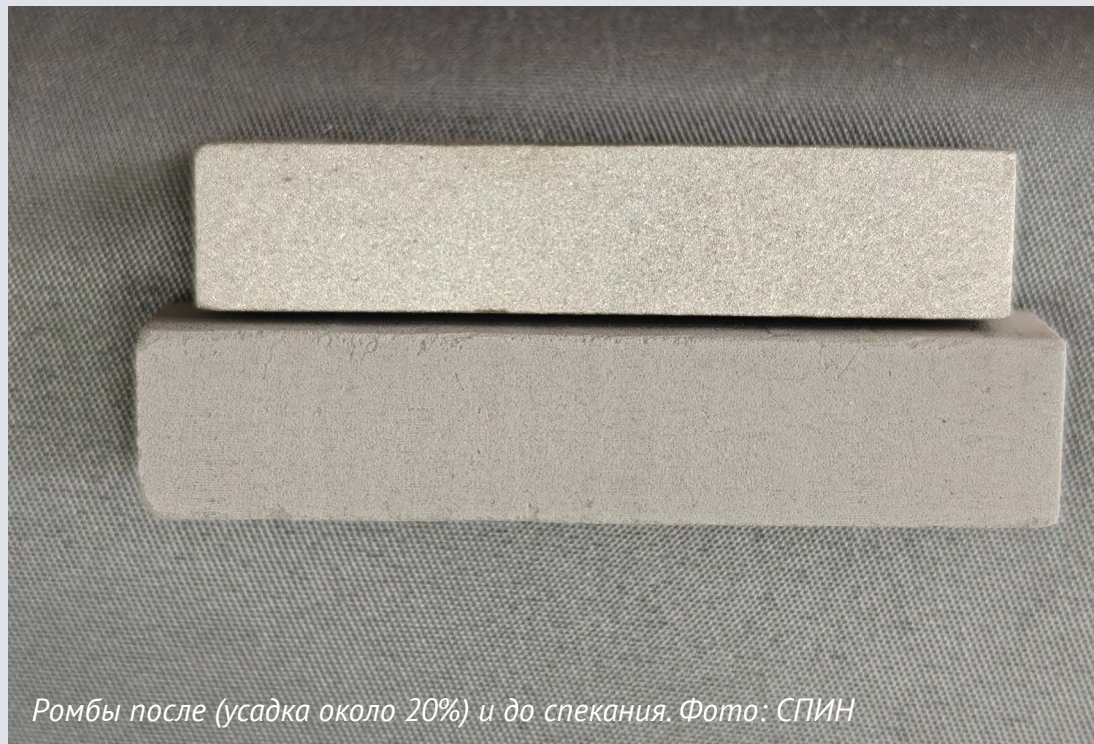
Парадоксы МВЖ:

простое сложнее сложного

Самое неожиданное ограничение МВЖ мы обнаружили, когда попытались напечатать простые детали. Казалось бы, цилиндр или куб — что может быть проще? Но оказалось, что простые формы иногда сложнее, чем замысловатые. Большие плоские поверхности склонны к деформации при спекании. В то же время сложные решетчатые структуры или тонкостенные изделия печатались с удивительной легкостью.

Этот парадокс стал для нас уроком: МВЖ любит сложность. Технология раскрывает потенциал именно там, где традиционные методы пасуют — в создании деталей с тонкими стенками, решетчатыми структурами или бионическими формами. Но для простых форм нужно быть готовым к дополнительным итерациям. 

Инициативная группа компании



Ромбы после (усадка около 20%) и до спекания. Фото: СПИН

Урал3Д

Металл в стоматологии: быть или не быть?

Много споров и мнений по этому поводу! Доктора, зубные техники, владельцы клиник и лабораторий имеют диаметрально противоположные взгляды.

Когда в 2019-2020 годах мы взялись развивать АТ в стоматологии, для начала ограничивались только настольной фотополимерной печатью. Освоили доступные китайские принтеры, затем нашей компании удалось получить статус дилера всемирно известной компании Formlabs из США. Мы стали самым восточным ее дилером в России. Разнообразие материалов и удобство работы с этим оборудованием очень впечатлило. Да и сама технология 3D-печати открылась по-новому – мы стали в ней более уверенными, изучили реальные примеры ее применения в различных отраслях. Дальше — больше: мы начали задумываться уже

об L-PBF. И тут же столкнулись со скепсисом потенциальных клиентов из стоматологии. «Металлу в нашей сфере жить не долго! Максимум лет пять!» — слышали мы от владельцев лабораторий. Надо поторапливаться, — подумали мы.

И вот в 2022 году у нас пошли первые продажи новых для России китайских L-PBF комплексов, профилированных под стоматологическую отрасль. Однако продавать оборудование, навыками работы на котором мы сами не владеем, — это не наш подход в бизнесе. Ведь как можно, самим не зная машины, обучать персонал клиентов и оказывать им техническую и поль-

зовательскую поддержку? И вот мы установили у себя наш первый принтер того же бренда для печати CoCr. На тот момент я не был уверен, что мы сможем обеспечить его загрузку, и что это оборудование в итоге станет приносить относительно неплохой доход. Однако уже за первые полгода наши ежемесячные показатели по выручке достигли 1 млн. рублей. И с тех пор не снижались, а только росли.

За счет чего нам так быстро удалось закрепиться на своем региональном рынке, и даже выйти в его лидеры? Во-первых, мы смогли предложить конкурентоспособную цену на изделие. Стоимость коронки/карка-

са, напечатанного по технологии L-PBF, составляла на тот момент 450-500 рублей за единицу. Это было слишком накладно для заказчика, для которого выпилить циркониевый каркас на своем фрезерном станке обходилось гораздо дешевле. Сейчас на внутреннем рынке цены напечатанных коронок варьируются от 250-300 рублей за единицу. Это приемлемая цена для каркасов CoCr. Во-вторых, главными критериями оценки качества напечатанных изделий является посадка на модели и отсутствие газов в каркасе. Наши напечатанные изделия абсолютно удовлетворили скептически настроенного заказчика. Делая работу полностью по протоколу производителя оборудования, мы получили стабильный и качественный результат. Ну и в-третьих, наши козыри — сервис и сроки производства. Мы гарантируем заказчикам, что уложимся в 24 часа от получения файла до отправки готового изделия.

В итоге мы оказались в плюсе, с какой стороны не посмотри. Мы поставляем оборудование, на котором умеем работать и знаем, как его обслуживать. Причем, продаем не просто машины, а технологию L-PBF печати для стоматологической сферы (в первую очередь) и не только. Благодаря собственному принтеру мы имеем

дополнительный источник дохода. Ну и самое главное, видим дальнейшие пути для развития нашего центра.

Сегодня мы печатаем для стоматологической сферы по технологии L-PBF широкий ассортимент изделий. Это основа металлокерамических коронок — металлические колпачки/каркасы для облицовки металлокерамикой, каркасы для ортодонтических аппаратов (это становится всё более востребованным, да и сама специальность ортодонтия обретает более высокую значимость в стоматологическом лечении). Также изготавливаем навигационные хирургические шаблоны, балки для полных

съемных и условно-съемных протезов и каркасы бюгельных протезов.

По мере погружения в этот проект мы открываем для себя всё новые нюансы. Например, мы поняли, что для бюгельных протезов и каркасов ортодонтических аппаратов нужно применять CoCrWMo сплав с содержанием молибдена, таким образом получая необходимый показатель упругости конструктивных элементов этих изделий. В итоге под эту задачу мы установили у себя второй L-PBF принтер.

А теперь вернемся к вопросу из заголовка статьи. Итак, быть или не быть металлу в стоматологии?



Напечатанные каркасы протезных конструкций и коронок из кобальт-хромового сплава. Фото: Урал3Д



Установка платформы
построения. Фото: Урал3Д

Сегодня бурно развиваются композиты и всё активнее применяется диоксид циркония в производстве стоматологических коронок и мостов. Становятся доступными фрезерные станки. Доля стоматологических конструкций, полученных методом цифрового производства, также растет. А ведь это не только диоксид циркония и композиты, металл с появлением доступных комплексов L-PBF (сейчас мы продаем настольные версии за скромный бюджет всего 3 млн. рублей за комплекс!!!) гармонично вписался в традиционное производство на станках с ЧПУ и не намерен уступать свои позиции. Развитие технологий производства для проверенных временем материалов, таких как CoCr, диоксид циркония и других, позволяет делать выбор исключительно по медицин-

ским показаниям и на благо пациентов! Металлу БыТЬ!

Послесловие редакции

Вспоминая тот далекий 2018 год и первую встречу с Formnext, отчетливо видишь, как зарождалась нынешняя реальность аддитивных технологий. Тогда среди окрепших промышленных гигантов выборочного лазерного плавления (L-PBF), чьи цены в России стартовали от полумиллиона долларов при скромной, но манящей производительности, робко маячили первые проекты доступных машин за 100 тысяч из США и Европы. Они действительно казались тогда белыми воронами, не привлекающими особого внимания на фоне корпоративных титанов. Но время неумолимо. Рынок увлекся гибкостью аддитивного производства, цифровизация и упроще-

Люди слова и дела

ние циклов заставили мир всерьез, а часто и навсегда, принять 3D-печать как инструмент.

Именно стоматология, как верно подмечено, стала тем самым ключиком к массовости. Китай это понял мгновенно, обрушив цены и сделав ставку на серийное потребление принтеров, — и добился в этом господства. Россия тоже понимает эту необходимость, но пока не может приблизиться к китайским ценникам, — извечная наша дилемма на фоне традиционного лидерства Поднебесной.

Так что же ждет нас впереди? Сбудется ли прогноз о «каннибализме» рынка, — когда доступные малоразмерные L-PBF системы, что по карману любому стартапу, ИП или малой компании, (а их большинство!), начнут вытеснять дорогие решения? А большие, сложные комплексы будут изготавливать штучно под заказ крупных корпораций? Время, конечно, покажет. Но у нас, наблюдающих эту эволюцию с самого начала, уже зреет ответ. Тенденция к такому разделению — не апокалипсис, а закономерный этап взросления рынка, открывающий новые, пусть и более специализированные, возможности для всех его участников. 

Сабирьянов Наиль



Межотраслевая программа сертификации АТ от ASTM

Говорят, что проверенный способ испортить настроение даже самому жизнерадостному отечественному аддитивщику с клиентурой из высокотехнологичных сегментов, — это затронуть тему межотраслевой сертификации АТ (АП). Отсутствие релевантной нормативной базы, учитывающей специфику аддитивного производства, требуемый нередко избыточный объем испытаний, подтверждающих повторяемость изделий, — одни из основных барьеров на пути массового внедрения аддитивных технологий практически во всех отраслях, и в первую очередь — в ответственных сегментах машиностроения. Всё это приводит к увеличению стоимости и сроков разработки и таким образом ощутимо бьет и по рукам, и по карману производителей из сферы аддитивки. Да, в последнее время работа по устранению этих барьеров активизировалась, разрабатываются актуальные нормативные требования – и для оборудования, и для материалов, и для готовой продукции. Но хотелось бы — быстрее, детальнее, релевантнее.

Проблема не только у нас?

А что с этим у наших зарубежных коллег? Им тоже знакома эта проблема. Спрос на сертификацию в области

АП, выходящую за рамки существующих стандартов, таких как ISO 9001, AS9100, IATF 16949 и ISO 13485, постоянно растет. Ведь хотя эти сертификации касаются общего

обеспечения качества, они не учитывают поведение материалов, тонкости отладки машин или риски процесса, характерные для аддитивного производства. Это стиму-

лировало поиск новых подходов к сертификации АП.

Эти подходы были внедрены организацией по стандартизации ASTM International, которая разработала программу сертификации АП. Эта инициатива направлена на создание единого и прозрачного процесса квалификации производителей в аэрокосмической, медицинской и других отраслях.

Разработанная ASTM Additive Manufacturing Center of Excellence (AM CoE), программа устраняет ограничения традиционных систем управления качеством, фокусируясь на уникальных характеристиках и проблемах АП. Проект реализован в сотрудничестве с Additive Manufacturing Certification Committee (AMCC), многоотраслевым органом, созданным в прошлом году и состоящим из более чем

25 мировых производителей оригинального оборудования (OEM). Комитет объединяет OEM-производителей, охватывающих аэрокосмическую, оборонную промышленность, производство медицинского оборудования, автомобилестроение, энергетику и тяжелую промышленность. В числе участников — такие промышленные гиганты, как Boeing, GE Aerospace, Medtronic, Ford, Siemens Energy и ST Engineering Aerospace. Все эти компании внедрили у себя аддитивное производство в регулируемых и критически важных для производства секторах.

«Разработка критериев сертификации — это подробный и ресурсоемкий процесс, но итоговая ценность для нашей организации и отрасли в целом будет существенной», — сказал Эдди

Каванаг, главный инженер Johnson & Johnson. Его коллеги по комитету также считают, что новая программа принесет их бизнесу значительные выгоды.

В чём новизна?

Создавая механизм единой сертификации, признанной в различных отраслях, программа обеспечит снижение необходимости в повторных аудитах, одновременно гарантируя, что производители смогут продемонстрировать соответствие признанным требованиям, характерным именно для АП. Аудиты в рамках этой программы основаны на критериях, разработанных на основе международных стандартов, — ISO / ASTM 52901, 52904 и 52920. Хотя в их рамках используются стандартизированные процедуры аудита, единые



Члены Additive Manufacturing Certification Committee (AMCC). Изображение: ASTM International

для всех отраслей, они также допускают адаптацию к потребностям, связанным с конкретными сферами или секторами. Согласно ASTM, цель состоит в том, чтобы обеспечить баланс между согласованностью и гибкостью, что позволит широко применять сертификацию, не теряя при этом актуальности в регулируемых или узкоспециализированных средах.

Проводящие оценку аудиторы будут независимыми профессионалами с опытом в аддитивном производстве. Процедуры сертификации, включая частоту аудита, квалификацию оценщиков и критерии приемки, определены и выложены в свободном доступе. Организации, успешно прошедшие аудит, получают официальную сертификацию и будут включены в общедоступный каталог, поддерживаемый ASTM. Таким образом потенциальные клиенты и партнеры смогут легко находить квалифицированных поставщиков из сферы АП.

Структура сертификации — это практически коллективный продукт, созданный по результатам обратной связи с самими аддитивщиками. Изучались предложения компаний, широко внедривших у себя АП, многие из них работают над его интеграцией в критически важные производственные среды. Объединив свой опыт

и согласовав общие ожидания, эти организации помогли сформировать модель сертификации, отражающей реальные условия производства и требования клиентов.

Для сертифицированных производителей программа предлагает путь для демонстрации зрелости, прослеживаемости и последовательности в их операциях по аддитивному производству. Для клиентов она представляет собой оптимизированный метод определения надежных поставщиков, которые были проверены на соответствие стандартам, разработанным лидерами в своих областях.

Поскольку АП продолжает осваивать всё новые ниши в регулируемых отраслях, инициатива ASTM по сертификации направлена на большую стандартизацию и общую ответственность при сертификации деталей и процессов.

Проверено на практике

Способность доверять процессам АП среди поставщиков зависит от общих моделей сертификации, и эта потребность все чаще ощущается в секторах, где действуют высокие нормативные требования.

Недавно голландский производитель систем фотолитографии полупроводников ASML завершил то, что он называет первой в мире квалифицированной цепочкой поставок АП для полупрово-

дниковой промышленности, проведя аудит поставщиков по ISO/ASTM 52920 и своему внутреннему руководству GSA-02-0001. По замыслу, результатом этой работы, проводившейся поэтапно в течение десяти месяцев, должно стать снижение изменчивости процесса, улучшение воспроизводимости и обеспечение надежности критических компонентов класса 3.

Аудиты, проведенные Qualified AM GmbH, были сосредоточены на сплавлении порошкового слоя с использованием лазерного луча, оценивая процессы с участием Ti6Al4V и нержавеющей стали 316L. Инициатива преследовала цель устранить несоответствия, возникающие из-за различий в системах АП, параметрах и вводимых оператором данных. Результаты сопоставили с несколькими стандартами ISO/ASTM, в итоге установив эталон для стандартизированных практик АП в высокорисковых полупроводниковых сферах применения.

В 2023 году ASTRO America совместно с GE, Honeywell и Pratt & Whitney запустила инициативу по упрощению процедуры квалификации мелких поставщиков 3D-печати для аэрокосмических цепочек поставок. Проект реализуется через America Makes при поддержке Министерства обороны США и направлен на разработку



Стандарты в сфере
аддитивных технологий
Российской Федерации

единого шаблона квалификации для металлической аддитивной печати. Это позволит решить проблему избыточности и разрозненности стандартов, применяемых разными OEM-производителями.

Проект, стандартизируя требования к квалификации установки и эксплуатации (IQ и OQ), также способствует снижению стоимости и сложности входа для малого и среднего бизнеса. В случае успеха он может ускорить внедрение АП в аэрокосмических проектах, одновременно улучшая согласованность и доступность во всей экосистеме оборонного производства.

Развитие стандартизации аддитивных технологий

в России: достижения и перспективы

А теперь вернемся к отечественным реалиям. Россия активно формирует нормативную базу для АП, хотя процесс сопровождается системными вызовами. К началу 2025 года принято свыше 40 ГОСТов, разработанных при ведущей роли ключевых организаций: Росатом (через ООО «РусАТ» и АО «Наука и инновации»), НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, а также АО «Композит» (специализирующегося на ракетно-космическом секторе). Эти стандарты охватывают три ключевых направления:

1. Терминологию и базовые принципы, включая ГОСТ Р 57558-2025 — прямой аналог международного ISO/ASTM 52900, обеспечивающий гар-

монизацию с глобальными нормами;

2. Отраслевые спецификации, такие как ГОСТ Р 71759-2024 для титановых изделий в космической технике и ГОСТ Р 59131-2020 для алюминиевых сплавов в судостроении;

3. Контроль качества с акцентом на методы испытаний материалов (ГОСТ Р 57556-2017), неразрушающий контроль (ГОСТ Р 58598-2019) и квалификацию оборудования (ГОСТ Р 59184-2020).

Проблемы развития

Однако развитие сдерживается рядом проблем. Часть стандартов представляет собой слабые переводы зарубежных аналогов (например, ГОСТ Р 57589-2017) или избыточно адаптирована

Сертификация

под узкие нужды заказчиков, таких как Роскосмос. Кроме того, сохраняется дефицит комплексных решений для сквозной сертификации процессов АП, аналогичных системе ASTM AMCC, что затрудняет межотраслевую интеграцию.

Вместе с тем нельзя не признать, что есть значимые подвижки. Активное внедрение международных норм подтверждается полным соответствием ГОСТ Р 57558-2025 стандарту ISO/ASTM 52900:2021. Программа национальной стандартизации на 2025 год, включающая разработку более 5000 документов, предусматривает утверждение новых ГОСТов для биопечати и композитных материалов до конца года. Усилия координируются через Совет по стандартизации при Росстандарте, который фокусируется на

технологическом лидерстве и цифровой трансформации в рамках национальных целей развития.

К 2030 году планируется расширить работу Технического комитета ТК 016, отвечающего за электротехнику и смежные области, где заложено более 100 проектов по актуализации стандартов, включая интеллектуальные производственные технологии. Важным шагом стало введение ГОСТ Р 1.20-2025, унифицирующего разработку общероссийских классификаторов и повышающего совместимость государственных информационных систем.

Сравнение с инициативами ASTM: движемся к конвергенции

В отличие от межотраслевой гармонизации ASTM, сокращающей издержки про-

изводителей через единую сертификацию, Россия пока фокусируется на отраслевых ГОСТах. Однако движение к конвергенции с ISO/ASTM нарастает, особенно в терминологии и методах контроля. Критическая задача для РФ — преодолеть фрагментарность стандартов и создать сквозную систему оценки качества АП. Успех будет зависеть от скоординированных действий промышленности, регуляторов и научных институтов, а также ускорения интеграции этических принципов управления, таких как прозрачность и профилактика нарушений вместо «гиперконтроля».



Светлана Бакарджиева



AM.TECH
Additive Manufacturing Technologies

Сделано в России:
Аддитивные установки для печати металлических изделий по технологии EBM
(электронным лучом в вакууме)

+7 (495) 108 60 68
office@am.tech

am.tech



Прочти
меня на
сайте

КАТ

клуб
аддитивных
технологий

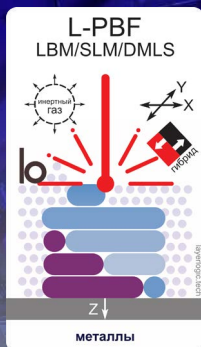
© 2024. Клуб аддитивных технологий.

Перечень наименований аддитивных технологий

Международные		Российские	
Наименования технологий	Альтерн. наименования	ГОСТ Р 57558-2017	Наименования технологий
BJ (Binder Jetting)	PCM	Струйное нанесение связующего	Струйное нанесение связующего по ПММА
PEM (Paste Extrusion Modeling)	RLP, PDM, EOD, EFF, ABEF, FBW, FEF, DIW, биопечать, RPRD, MF, MJS, 3DFD, RC, LSR, RDM, 3DCP, COP	Экструзия материала	Моделирование осаждением пасты
SLA (Stereolithography)	LMM, PureForm	Фотополимеризация в ванне	Лазерная стереолитография
DLP (Digital Light Processing)	Carbon DLS, LMM, ML, PureForm	Фотополимеризация в ванне	Цифровая светодиодная проекция
LCD (Liquid Crystal Display)	MSLA	Фотополимеризация в ванне	Масочная стереолитография
MJ (Material Jetting)	MJM, MJP, PolyJet, DOD, NPJ	Струйное нанесение материала	Струйное нанесение материала
BJ (Binder Jetting)	PCM	Струйное нанесение связующего	Струйное нанесение связующего по песку

Международные		Российские	
Наименования технологий	Альтерн. наименования	ГОСТ Р 57558-2017	Наименования технологий
FD (Friction Deposition)	FSLD, MELD	Экструзия материала	Ротационная сварка трением
Metal SL (Sheet Lamination)	LOM, UAM	Листовая ламинация	Листовая ламинация
E-DED (W) (Electron Beam Wire Direct Energy Deposition)	DED, DED-W, EBF3, EBAM, EB-DED	Прямой подвод энергии и материала	Электронно-лучевая наплавка проволокой
L-DED (W) (Laser Wire Direct Energy Deposition)	DED, DED-W, WLAM, LWC, LMD-W, LWD	Прямой подвод энергии и материала	Лазерная наплавка проволокой
Arc-DED (W) (Arc (Plasma) Wire Direct Energy Deposition)	DED, DED-W, RPD, PMD, PAW	Прямой подвод энергии и материала	Плазменная наплавка проволокой
Arc-DED (W) (Arc Wire Direct Energy Deposition)	DED, DED-W, WAAM	Плазменная наплавка проволокой	Электродуговая наплавка проволокой, прямое дуговое выращивание/ПДВ
L-PBF (Laser Beam Powder Bed Fusion)	PBF, SLM, DMLS, LaserCUSING, MLS	Прямой подвод энергии и материала	Селективное лазерное плавление/СЛП
E-PBF (Electron Beam Powder Bed Fusion)	PBF, EBM, EBSM	Синтез на подложке	Электронно-лучевое плавление/ЭЛП
L-DED (P) (Laser Beam Powder Direct Energy Deposition)	DED-P, DMD, LMD, LENS	Прямой подвод энергии и материала	Лазерная (газопорошковая) наплавка, прямая лазерная наплавка (ПЛВ)
Cold Spray	DED, DED-P, SP3D, TKF	Прямой подвод энергии и материала	Холодное газодинамическое напыление/ХГН
MBJ (Metal Binder Jetting)	SPJ, MJF, BJT, MJ3DP	Струйное нанесение связующего	Струйное нанесение связующего по металлам и сплавам
Metal Pellet MEX (Metal Pellet Material Extrusion)	FGF	Экструзия материала	Шнековая экструзия
Metal MEX (Metal Filament Material Extrusion)	Filament MEX, , Metal FFF, FFF, FDM, ADAM, BMD	Экструзия материала	Экструзия материала
CF3D (Continuous Fiber 3D Printing)	Filament MEX, μ AFP, CFD, AFT, CFC, CFF	Экструзия материала	Экструзия непрерывного композиционного волокна
Pellet MEX	FGF, LFAM, BAAM, SEAM, APF, BAAM	Экструзия материала	Шнековая экструзия
MEX (Filament Material Extrusion)	FDM, FFF	Экструзия материала	Экструзия материала
SLS (Selective Laser Sintering)	PBF, PLS, PPBF	Синтез на подложке	Селективное лазерное спекание
SHS (Selective Heat Sintering)	MJF, HSS	Синтез на подложке	Селективное тепловое спекание
SL (Sheet Lamination)	LOM, CBAM	Листовая ламинация	Листовая ламинация





Больше подробностей смотрите
на сайте маркетингового
исследования КАТ



Прочти
меня на
сайте

Оснащение L-PBF/SLM производства

КАТ клуб
аддитивных
технологий

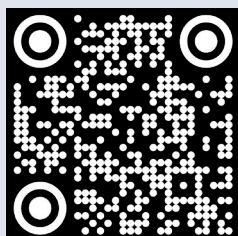
Комплектация	Минимальная	Оптимум	Максимальная
Потребители	Студии и мелкие производства	ЦАП базового уровня	ЦАП для ответственных задач и НИОКР
Участок АП:			
Установка селективного лазерного плавления (3D-принтер)	+	+	+
Запас фильтров на 4-8 месяцев	+	+	+
Термостабилизатор (чиллер)	+	+	+
Пылесос взрывозащищенный	+	+	+
Транспортировочная тележка или штабелёр для перемещения платформ и бачков с порошком	+	+	+
Источник бесперебойного питания		+	+
Отдел проектирования и управления производством:			
САПР для подготовки компьютерных моделей изделий (CAD)	+	+	+
Численное моделирование/топологическая оптимизация/генеративное проектирование (CAE)	+	+	+
Слайсер/расслоевщик для подготовки УП и лечения файлов (CAM)		+	+
Эмуляция технологического процесса			+
Мониторинг и управление производством (MES/ AMES)			+
Платформа размещения производственных заказов (MaaS)			+
Участок подготовки и контроля порошка:			
Станция просеивания металлического порошка	+	+	+

Комплектация	Минимальная	Оптимум	Максимальная
Потребители	Студии и мелкие производства	ЦАП базового уровня	ЦАП для ответственных задач и НИОКР
Сито для минусовой (минимальной) и плюсовой (максимальной) фракции	+	+	+
Сушильный шкаф для порошка (с возможностью подачи аргона для порошков из сплавов алюминия, титана)	+	+	+
Измеритель влажности порошка		+	+
Измеритель текучести порошка		+	+
Лазерный анализатор размера частиц МПК			+
Автоматизированный анализатор физических и технологических свойств МПК			+
Участок подготовки и контроля деталей:			
Цифровой штангенциркуль с шагом измерения 0,01 мм	+	+	+
Калибры и измерительные пластины для типовых изделий / под конкретное изделие		+	+
Твердомер		+	+
3D-сканер для контроля размеров и реверс-инжиниринга		+	+
КИМ		+	+
ПО для реверс-инжиниринга		+	+
Профилометр		+	+
Рентгенофлуоресцентный спектрометр для определения химического состава порошков и выращенных изделий			+
Компьютерный рентгеновский томограф / микротомограф			+
Участок постобработки:			
Ручной слесарный инструмент	+	+	+
УШМ, реноватор, бормашина подвесная	+	+	+
Тиски	+	+	+
Электроэрозионный станок / лентопильный станок		+	+
Пескоструйный аппарат / мойка гидроабразивной чистки (аквабласт)		+	+
Струйная обработка сухим льдом		+	+
Шлифовально-полировальный станок (гриндер)		+	+
Резьбонарезной манипулятор		+	+
Фрезерный обрабатывающий центр с ЧПУ (3-х или 5-и осевой)			+
Токарный обрабатывающий центр с ЧПУ (при необходимости)			+
Система сухого электрополирования			+
Лазерная гравировка			+



Комплектация	Минимальная	Оптимум	Максимальная
Потребители	Студии и мелкие производства	ЦАП базового уровня	ЦАП для ответственных задач и НИОКР
Участок термической обработки:			
Муфельная печь с возможностью подачи инертных газов (стали, никелевые, кобальтовые, медные, алюминиевые сплавы)	+	+	+
Промышленная вакуумная печь с возможностью подачи инертных газов (титановые сплавы)		+	+
Горячий изостатический пресс			+
Участок производства и хранения газов:			
Рампа с баллонами	+	+	+
Аргонопровод / моноблок с баллонами или криогенная установка для аргона		+	+
Азотный генератор		+	+
Воздушный компрессор		+	+
Участок исследовательский:			
Разрывная машина			+
Отрезной станок для получения образцов нужного размера			+
Пресс для горячей запрессовки образцов			+
Шлифовально-полировальный станок для получения микрошлифов			+
УЗ ванна			+
Оптический стереомикроскоп			+
Электронный микроскоп			+
Газоанализатор O, N, H (кислород, азот, водород)			+
Анализатор C, S (углерод, сера)			+
Рентгеновский дифрактометр			+
Профилометр			+
Твердомер			+
Плотномер			+
Участок сборки:			
Инструмент (отвертки, пассатижи)	+	+	+
Паяльные станции		+	+
Склад и хранение:			
Мебель (столы, шкафы, тумбочки)	+	+	+
Стеллажи для заготовок	+	+	+
Стеллажи для готовой продукции	+	+	+
Стеллажи для хранения МПК	+	+	+
Стеллажи для инструмента и оснастки	+	+	+
Стеллажи для СОЖ, масла		+	+

ИНГРЕИД



industry3d.ru



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