

№2(9) • 2025 **АПГРЕЙД**

Аддитивное производство и цифровая трансформация в промышленности

В этом выпуске:

- **ТСТ Asia 2025: тренды, иллюзии и китайский размах**
- **Аддитивные технологии в Татарстане: от локальных решений к федеральному масштабу**
- **Технология без человека не живет**
- **Девять лет тишины: где российская 3D-печать?**



**Интервью • Промышленная политика • Металлы
• Нейросети • Наука — интрига • Робототехника •
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

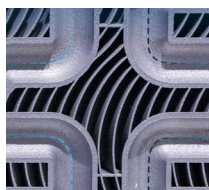
АПГрейд станет незаменимым источником знаний и вдохновения для всех, кто стремится быть на передовой технологического прогресса и использовать аддитивное производство для решения современных задач.

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 редактора.....	5
Аддитивные технологии в Татарстане: от локальных решений к федеральному масштабу	6
Тема номера: TCT Asia 2025: тренды, иллюзии и китайский размах	18
EB-PBF: у меня есть стратегия.....	36
Технология без человека не живет.....	42
Сканируя прошлое, создавая будущее.....	57
WAAM с переменной высотой слоев.....	60
Эффект боллинга в L-PBF: выявление причин и их устранение	64
Наболело!.....	69
Люди слова и дела.....	75
Мечтают ли андроиды о 3D-печати	84
Медный PBF: на пути к масштабированию.....	99
База знаний.....	104



Коллаж на титульном листе:
Globus Rapid News Co., Ltd.

Подписывайтесь на наши
группы и каналы в соцсетях:

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



Сделано в России – Российское ПО!
AMT-16 - подключил и работай!

Аддитивный комплекс для 3D-печати металлических изделий сложной формы в короткие сроки

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



am.tech





— 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.

<https://industry3d.ru>

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.





Выйти из зоны консерватизма

Трубашевский Дмитрий

Представьте себе будущее.

Именно с этих слов хочется начать разговор с пытливей аудиторией. Но стоит заговорить о завтрашнем дне — и можно навлечь на себя скепсис бывалых промышленников, которым не до футуристических прогнозов: справиться бы с текущими вызовами.

Не стоит винить их в нежелании мечтать или боязни внедрять гибкие подходы к производству. Часто разговоры о будущем кажутся им наивными, почти детскими. «Работу работать надо, а не фантазировать» — услышите вы на любом заводе.

Но откуда берётся такой консерватизм? Порой — из горького опыта, а иногда — из-за отсутствия в практике предприятий по-настоящему эффективных инструментов. Ведь многие отечественные интеграторы, как бы громко они себя ни называли, не всегда готовы глубоко погрузиться в проблемы про-

изводства и предложить комплексный инженеринговый подход. Такой, где во главу угла ставятся не просто продажи оборудования, а поиск реальных решений с опорой на инновации.

Сегодня уже очевидно: роль обратного инженеринга на фоне санкций и ограничений на поставки зарубежной техники невозможно переоценить. Предприятия массово скупают 3D-сканеры, вкладывают миллионы в создание цифровых двойников. А следующий шаг после сканирования — переход к аддитивным технологиям. 3D-принтеры всё чаще становятся темой обсуждения на производственных совещаниях.

Но здесь есть нюанс. Интеграторы-новички, не способные на системную работу, проигрывают тем, кто годами оттачивал свои компетенции. Даже без толстых папок с методичками, на практике они доказывают: их решения работают. А тем,

кому не повезло найти таких партнёров, остаётся одно — отправиться в «Мекку доступных инноваций», в Китай.

Выставка TCT Asia 2025 вновь подтвердила: мир аддитивных технологий развивается лавинообразно. Там можно было увидеть сотни кейсов — от медицины до авиации и космонавтики, — вдохновляющих и молодых инженеров, и бывалых промышленников.

Несмотря на все внешние вызовы и внутренние болезни роста, 3D-печать продолжает захватывать умы — от школьников до чиновников. Красиво, технологично, функционально... А может, всё сразу?

Мечтайте смелее. Аддитивные технологии уже сегодня доказывают: нет задач, которые они не смогут решить. И это будущее — уже наступило.

Если вам близка тема инноваций в промышленности — этот номер для вас. Читайте, вдохновляйтесь, внедряйте! 

Прочти
меня на
сайте

Аддитивные технологии в Татарстане: от локальных решений к федеральному масштабу

Успешное развитие аддитивного производства и, тем более, утверждение его в статусе одного из драйверов перехода к новому экономическому укладу сегодня невозможно без комплексной поддержки аддитивной сферы со стороны государства. Это аксиома. Но если всё же нужны доказательства, достаточно обратиться к опыту Китая: лидерство Поднебесной в сфере АП зиждется на мощнейшей финансовой, организационной и инфраструктурной государственной поддержке. По поводу усиления такой поддержки сегодня взывают к своему правительству аддитивщики США, всерьез озабоченные всё более активным вытеснением американцев китайцами с лидерских позиций в аддитивке. У нас о необходимости комплексной господдержки АП тоже говорится много и толково. Однако намного интереснее, что в этом плане реально делается. Причем, делается так, чтобы поддержка стимулировала творческую инициативу, не порождая при этом у промышленников патерналистских настроений. И чтобы государственное регулирование не превращалось в административный барьер, а объединяло усилия производителей и ресурсов территорий, обеспечивая в этой синергии повышение конкурентоспособности отечественных аддитивщиков. Такой опыт наработан в Республике Татарстан. В интервью нашей редакции им делятся председатель правления Промышленного кластера Республики Татарстан Сергей Васильевич Майоров и руководитель отраслевого комитета «Аддитивные технологии» Промышленного кластера Евгений Викторович Дьяконов.



Дмитрий Трубашевский:
– Как известно, Республика Татарстан входит в тройку субъектов РФ-лидеров по развитию на своей территории аддитивного производства (АП). Благодаря чему достигнуто это лидерство, и какими мерами стимулирования и поддержки оно сохраняется?

Сергей Майоров:

– В первую очередь мы достигли этого потому, что многие наши предприятия начали применять аддитивные технологии. В их парках оборудования появились и 3D-принтеры, и 3D-сканеры. Кстати, первый отечественный 3D-принтер для песчано-полимерных форм был разработан именно на территории Татарстана.

Этот 3D-принтер по технологии Binder Jetting (BJ) в первую очередь был установлен на ПАО «КАМАЗ». И внедрение даже единственной на тот момент машины в производственный процесс автогиганта обеспечило ощутимый экономический эффект. Новация позволила обходиться на этом участке меньшим числом работников. А главное, этот проект был импортозамещающим: «КАМАЗ» получил возможность изготавливать самостоятельно самые сложные стержни, которые раньше заказывали



Сергей Майоров

вались только за рубежом. И конечно, это дало ощутимый импульс дальнейшему развитию производства на заводе и продвижению аддитивных технологий на других ведущих предприятиях республики.

Сегодня на «КАМАЗе» уже установлено несколько таких принтеров. Активно внедряют аддитивное производство и другие компании, убеждаясь в его эффективности. Например, компания «Алнас», поставщик оборудования для нефтегазовой отрасли, с помощью технологии BJ сумела сократить себестоимость изготовления комплектующих для своих изделий в пять раз.

Подобные примеры опровергают некогда существовавшее мнение, что 3D-печать якобы всегда дороже традиционных технологий. Но сейчас мы убеждаемся на конкретных кейсах, что 3D-принтеры не только позволяют создавать самые сложные детали, недоступные

для традиционного производства, но и демонстрируют снижение себестоимости по сравнению с обычными методами.

Главным драйвером развития АП в республике я считаю деятельность отраслевого комитета по аддитивным технологиям Промкластера Татарстана под руководством Евгения Викторовича Дьяконова. Эта экосистема объединила лучшие компетенции России и дружественных стран в области аддитивных технологий.

Комитет создал информационную площадку в WhatsApp, где участники в режиме 24/7 обмениваются заказами, создают коллаборации, кооперационные цепочки и привлекают инвестиции. Ежемесячные заседания комитета с обязательным протоколированием и контролем исполнения решений создают жесткую управленческую систему, которая уже даёт

свои плоды. Мы собрали лучших представителей отрасли со всей страны и дружественных государств.

Светлана Бакарджиева:

– Думается, ваши подходы было бы целесообразно масштабировать на всю страну. Такая система координации и продвижения аддитивного производства на федеральном уровне пока отсутствует. К вам уже обращались за опытом?

Сергей Майоров:

– Безусловно, наша экосистема не осталась незамеченной. В ноябре 2024 года на форуме «Российский промышленник» мы провели круглый стол по развитию кластерной модели экономики. По инициативе коллег из Санкт-Петербурга было учреждено Деловое объединение кластеров Российской Федерации. Меня избрали председателем правления, в состав которого вошли представители аддитивного сообщества Санкт-Петербурга и Москвы.

На последнем заседании мы приняли решение о масштабировании татарстанской модели отраслевых комитетов на федеральный уровень. Всем нашим комитетам было предложено в течение месяца определить свою готовность к выходу на обще-



федеральный уровень. Тех, кто выразит готовность, мы будем рекомендовать для работы в новом статусе при Деловом объединении кластеров Российской Федерации.

Дмитрий Трубашевский:

– Сегодня успехи татарстанских аддитивщиков у всех на слуху. Однако и ваши предприятия, внедряющие АП, наверняка сталкиваются с системными сложностями – нормативными, технологическими, кадровыми и т.д. Как они преодолевают эти препятствия?

Евгений Дьяконов:

– Здесь я могу сослаться на собственный опыт работы на Уральском заводе гражданской авиации. На УЗГА я как раз занимался внедрением аддитивных технологий. Мы начинали организацию участка с нуля. Там изготавливаются малогабаритные газотурбинные двигатели с применением

деталей, напечатанных по технологии SLM. Этот опыт научил меня практическому подходу к интеграции инноваций – от проектирования цифровых двойников до оптимизации цепочек поставок.

Сегодня эти знания помогают выстраивать систему поддержки резидентов комитета. Например, мы разрабатываем алгоритм быстрого подбора решений для среды печати. Наша цель – сократить время согласования технических заданий от предприятий с 10 дней до суток. Это возможно благодаря большому количеству участников в нашем комитете, безусловно заинтересованных в продвижении возможностей своих компаний.

Дмитрий Трубашевский:

– Это происходит в основном в ручном режиме, или уже есть автоматизированная система подбора технологий?

В ноябре 2024 года на форуме «Российский промышленник» мы провели круглый стол по развитию кластерной модели экономики. По инициативе коллег из Санкт-Петербурга было учреждено Деловое объединение кластеров Российской Федерации.

Евгений Дьяконов:

– Мы пока работаем в ручном режиме и вынашиваем планы создания автоматизированной системы. Но каждую задачу мы оцифровываем в CRM-системе и постоянно держим на контроле. Эти задачи регулярно всплывают в работе, и мы их контролируем – ничего не остается без внимания.

Сергей Майоров:

– Я еще добавлю, что в каждом комитете поставлена задача создания единых центров продвижения продукции.

Евгений Дьяконов:

– Да, определена компания-оператор Единого Центра: СЛТ-Аддитивные технологии, подготовлено положение о Едином Центре Продвижения отечественного аддитивного оборудования и технологий. Цель – создать единую точку входа в Республику Татарстан по заказам, потребностям и продвижению резидентов, которым требуется помощь.

Сергей Майоров:

– Уточню: речь идет не только о РТ – мы рассма-

триваем масштаб всей России и дружественных стран. Определена компания-оператор, которая возьмет на себя функции продвижения. Эта компания наделается полномочиями подписывать дилерские соглашения на добровольной основе. На их базе будет создана единая презентация, разработана программа конгрессно-выставочных мероприятий на текущий год. Компания-оператор будет за свой счет продвигать технологии, представленные в комитете теми участниками, которые изъявили желание подписать дилерские соглашения.

Что это дает? Мы хотим перейти от продвижения отдельных компаний к продвижению всей отрасли. То есть заказчику будет делаться комплексное предложение: подбор поставщиков и оборудования, 3D-сканирование, печать, поставка расходных материалов – всё, что нужно для отрасли. Именно этим и предстоит заниматься компании-оператору в интересах участников комитета.

Светлана Бакарджиева:

– **Вероятно, будет установлен высокий порог вхо-**

да в такую систему. Потребуется тщательный отбор участников.

Сергей Майоров:

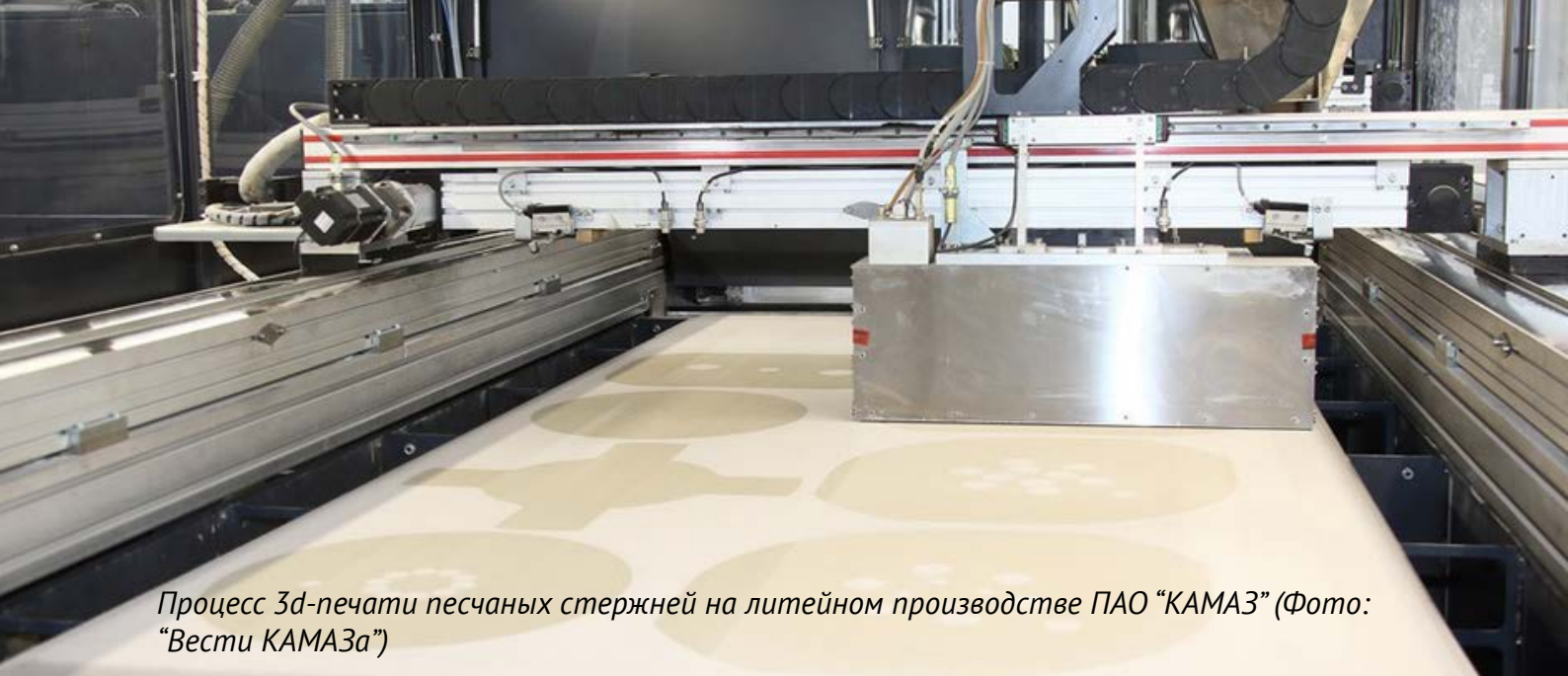
– Мы уже изучаем подобный опыт в комитете станкостроения, который очень близок к аддитивным технологиям. Порог входа определяет сама компания-оператор, поскольку при подписании дилерских соглашений она всесторонне оценивает контрагентов. Если один контрагент подведет, может пострадать вся система. Поэтому вся ответственность лежит на компании-операторе.

Дмитрий Трубащевский:

– А какие значимые проекты в сфере аддитивных технологий будут реализованы в ближайшее время? Наверняка уже есть определенная дорожная карта, о чем можно рассказать сегодня?

Сергей Майоров:

– На сегодняшний день проектный офис сопровождает 176 проектов на общую сумму 353 миллиарда рублей инвестиций. Их реализация позволит увеличить валовой региональный



Процесс 3d-печати песчаных стержней на литейном производстве ПАО «КАМАЗ» (Фото: «Вести КАМАЗа»)

продукт на 1,5 триллиона рублей с бюджетным эффектом более 200 миллиардов.

Это наш сводный отчет по Промышленному кластеру Республики Татарстан. Каждый комитет ведет собственный реестр проектов.

Евгений Дьяконов:

– У нас сейчас два приоритетных проекта. Первый – совместный проект компании «УЗГА» (Казань) и «Росатома» по созданию центра технологий общего доступа. На данный момент принтеры «Росатома» RusMelt 300 уже печатают серийные изделия для «УЗГА». В мае планируется ознакомительный семинар для предприятий, после чего будет определен механизм софинансирования со стороны республики и «Росатома».

Второй проект – аддитивный центр по производству станков, который создается совместно с московской компанией «i3D» и технопар-

ком «Идея». Речь идет об организации сборки принтеров под маркой «AM.TECH».

Дмитрий Трубашевский:
– **Это, как известно, принтеры для SLM-технологии (селективного лазерного плавления). Как вы считаете, это направление действительно приоритетное для аддитивных технологий в России? Сейчас в этом сегменте конкурируют около 10 компаний – как частных, так и государственных. Почему, по вашему мнению, выбор падает именно на эту технологию?**

Евгений Дьяконов:

– Я бы не сказал, что все стремятся именно в этот сегмент. У нас успешно развивается технология Binder Jetting – например, в Набережных Челнах ООО «СЛТ-Аддитивные технологии» выполняет полный цикл производства: разра-

батывает технологии заливки и 3D модели, подбирает оборудование под качественную 3D печать, производит песчано-полимерные формы, организовано литейное производство, а также выполняют сервисное обслуживание и адаптацию кадров для работы с оборудованием. Это позволяет компании качественно масштабироваться. В мае этого года компания открывает собственный аддитивный центр.

Что касается SLM, то этот рынок уже поделен между ключевыми производителями принтеров. Каждый из них пытается, так сказать, перетянуть одеяло на себя. Мы поддерживаем тех производителей, которые участвуют в нашем комитете и будут участвовать в едином центре продвижения.

В продолжение темы технологий: FDM-печать (полимерная) также остается

востребованной. Ко мне регулярно обращаются как члены комитета, так и сторонние организации с просьбами напечатать что-то из пластика.

Сейчас можно выделить три перспективных направления:

1. Строительная 3D-печать, которая развивается очень активно;

2. Binder Jetting (песчано-полимерные формы);

3. SLM-технология по металлам и сплавам.

На прошедшем недавно в Казани XIX Российском венчурном форуме были представлены три производителя строительных принтеров, каждый со своими особенностями. Выделять какую-то одну ключевую технологию было бы не совсем правильно – для разных отраслей приоритетны разные решения.

Дмитрий Трубашевский:

– То есть, вы открыты для всех разработчиков аддитивного оборудования без ограничений?

Евгений Дьяконов:

– Конечно.

Дмитрий Трубашевский:
– По нашим наблюдениям, именно в 2024 и 2025 годах отношение к аддитивным технологиям в отечественной индустрии стало ощутимо более заинтересованным, верно?

Сергей Майоров:

– Не совсем согласен. Мы впервые представили 3D-принтеры для песчано-полимерных форм на выставке около 5 лет назад. Тогда показывали не сами принтеры (они слишком габаритные), а отлитые с их помощью формы.

Комитет по аддитивным технологиям фактически создал этот рынок в России. Благодаря в том числе регулярному участию в выставках, сегодня эта продукция достаточно широко востребована. Компания «СЛТ-Аддитивные технологии» в прошлом году установила у себя одну машину, сейчас монтирует вторую. В мае у них планируется торжественное открытие нового участка – им уже не хватает площадей (8,5 тыс. кв. м).

Дмитрий Трубашевский:

– Действительно впе-

чатляет прогресс в технологии Binder Jetting. Если раньше при необходимости изготовления сложной металлической продукции часто полагались на SLM (хотя это и достаточно дорого), то с появлением ВЖ стоимость и сложность проектов снизились на порядок. Яркий тому пример – оптимизированная рама для беспилотного квадроцикла, представленная МГТУ им. Баумана. Это действительно прорыв. А в целом у нас в стране есть ряд компаний, которые чувствуют себя достаточно уверенно в этих технологиях и могут составить серьёзную конкуренцию зарубежным компаниям и их продукции. Это очень радует.

Светлана Бакарджиева:

– Развивая эту тему, хотелось бы затронуть вопрос о синергии от использования различных технологий, включая традиционные. Кластер как форма организации производства как раз предполагает такое комплексное взаимодействие.

На сегодняшний день проектный офис сопровождает 176 проектов на общую сумму 353 млрд рублей инвестиций. Их реализация позволит увеличить валовой региональный продукт на 1,5 триллиона рублей с бюджетным эффектом более 200 млрд рублей.

В сфере стандартизации сейчас перед нами стоит важная задача по разработке стандартов и уходу от монополии единственных поставщиков технологий и материалов.

Сергей Майоров:

– Вы совершенно правы. У нас 23 отраслевых комитета с руководителями и координаторами, но это не означает изолированности каждого комитета. Главное преимущество в том, что руководители комитетов объединяют лучшие компетенции, и межотраслевое взаимодействие в первую очередь происходит между ними.

На последнем энергетическом форуме «Энергопром» в Казани мы проводили сессию по созданию единого центра продвижения продукции энергетического машиностроения. В ней приняли участие руководители не только профильных комитетов, но и комитетов по аддитивным технологиям, станкостроению, инновациям, роботизации. Они сами проявили инициативу и поделились опытом межотраслевого сотрудничества.

Комитет по аддитивным технологиям является сквозным практически для всех отраслей – станкостроения, авиастроения, робототехники и других, так как заказы поступают из самых разных сфер.

Евгений Дьяконов:

– У нас налажено посто-

янное взаимодействие с руководителями других отраслевых комитетов. К нам регулярно поступают запросы: как от тех, кто только знакомится с технологиями, так и от тех, кто уже имеет опыт 3D-печати. Мы рекомендовали себя как оперативный агрегатор решений – быстро находим среди участников исполнителей для любых задач.

Что касается конкретных кейсов, сейчас идёт активное взаимодействие с Комитетом авиастроения по созданию беспилотных летательных аппаратов. Мы совместно прорабатываем решения, которые обеспечат применение современных технологий в их производстве.

Дмитрий Трубашевский:

– Вернемся к теме системных сложностей, тормозящих широкое внедрение аддитивного производства в стране. В числе таких стоп-факторов аддитивщики обычно в первую очередь упоминают проблематику сертификации и аттестации аддитивных технологий в России. Как у вас решаются эти проблемы?

Евгений Дьяконов:

– В сфере стандартизации сейчас перед нами стоит важная задача по разработке стандартов и уходу от монополии единственных поставщиков технологий и материалов. Для решения этой задачи мы создали профильную инициативную группу, куда вошли эксперты из различных отраслей – нефтегазовой, энергетической и других.

Сейчас мы начинаем сотрудничество с авиастроительной компанией «Туполев» по изготовлению кронштейнов и качалок для их изделий. Наша цель – подготовить комплексное решение от постановки задачи до конечного результата, включая всю необходимую документацию и сертификацию. У нас уже есть отработанная методика.

Дмитрий Трубашевский:

– Еще одна хроническая проблема отечественной аддитивки – дефицит инженерных кадров в этой сфере. Проблема эта осложняется тем, что аддитивное производство развивается стремительно, и очень трудно даже уследить за всеми появляю-



Уникальный комплекс 3D-печати оснастки для конструкций аэрокосмической отрасли, созданный в КНИТУ-КАИ (Фото: Минобрнауки РФ)

щимися новациями в нем. Соответственно, и специалистов для АП нужно изначально готовить, что называется, на вырост. На Ваш взгляд, какие знания и компетенции станут ключевыми для специалистов в аддитивном производстве, скажем, через 5 лет? Вы ведь активно работаете с вузами и R&D центрами.

Евгений Дьяконов:

– В части вузов у нас есть передовой опыт КНИТУ-КАИ имени А.Н. Туполева. Там выстроена цепочка подготовки кадров – от школьных кружков до программ аспирантуры. У них есть специальная лаборатория для школьников, где они не просто получают навык печати пластиком, а реализуют полноценные проекты.

На недавнем венчурном форуме было представлено

несколько стартапов от КАИ, все в сфере аддитивных технологий, что меня очень порадовало. В ближайшее время представители этого университета войдут в наш комитет, и мы будем помогать продвигать их инновационные идеи.

Также при КАИ есть колледж, где уже лицензирована программа обучения аддитивным технологиям. Первый набор студентов после 9 класса начнётся в 2026 году. Будущее уже наступает – мы часто говорим о нехватке кадров, но уже в следующем году начнётся подготовка профильных специалистов.

А еще в рамках бакалавриата у нас есть отдельная программа «Лазерные аддитивные технологии». Ежегодно на неё поступает около 26 студентов на очную форму и 56 на платную. Об-

учение ведётся на уровнях бакалавриата и магистратуры. Это направление активно развивается в республике и поддерживается на региональном уровне.

Дмитрий Трубашевский:

– Ну а что касается государственной поддержки аддитивной сферы – грантов, субсидий и т.д. – как вы полагаете, их достаточно для развития российских предприятий?

Сергей Майоров:

– У нас используется около 2500 различных мер поддержки, и разобраться в них непосвящённому человеку крайне сложно. Если говорить о динамике по Республике Татарстан, то в 2022 году привлекли 73 млрд рублей в виде государственной финансовой поддержки, в том числе АП, в 2023

В условиях, когда ключевая ставка составляет 21%, а банки предлагают кредиты под 44%, альтернатив субсидированному финансированию практически нет.

Мы должны активно заниматься просветительской работой среди предприятий, демонстрируя преимущества наших технологий.

– 79,4 млрд рублей, в 2024 – уже 110 млрд рублей.

Таким образом, рост этих показателей за три года составил почти 40%. Мы уделяем особое внимание привлечению этой поддержки, так как она облегчает реализацию проектов. Она может иметь разные формы: субсидий на технологическое развитие, компенсации части стоимости оборудования. В условиях, когда ключевая ставка составляет 21%, а банки предлагают кредиты под 44%, альтернатив субсидированному финансированию практически нет. У нас этим занимается 12 специалистов — это рекорд среди регионов.

Но мер поддержки всё равно недостаточно. Хотя мы понимаем, что государство не может раздавать «бесплатные билеты» – поддержка фокусируется на программах импортозамещения и обеспечения технологического суверенитета, где без господомощи не обойтись.

Если говорить о программе поддержки промышленных кластеров (постановление Правительства РФ №41 от 28 января 2016 г.), то раньше субсидии до 50% получали производители компонентов, а теперь – только конечные производители

(финишеры), которые могут получить до 50% субсидий при закупке стартовых партий. Мы считаем, что нужно сохранить поддержку как для финишеров, так и вернуть ее для производителей комплектующих.

В рамках российской кластерной платформы сегодня можно получить около 9% поддержки. Мы работаем над тем, чтобы снизить минимальный порог проекта с 2 млрд до 100 млн рублей. Нас справедливо спрашивают: «Где взять столько денег?» А мы отвечаем: «А где взять столько проектов от 2 млрд?» Таким образом мы постоянно работаем с регуляторами по совершенствованию мер поддержки.

За последние 2,5 года мы направили около 200 обращений в федеральные органы власти. Получили порядка 50 ответов, из которых 3 были положительными. Процент небольшой, но важна правильная подготовка обращений. Недостаточно просто обозначить проблему – нужно предложить конкретные изменения, подкрепить экономическим обоснованием, рассчитать потенциальные налоговые поступления. Тогда шансы на положительное решение значи-

тельно возрастают.

Дмитрий Трубашевский:

– Вы упомянули о субсидиях для разработчиков компонентов к 3D-принтерам. Но, по моим наблюдениям, многие компании неохотно переходят на российские комплектующие, считая их ненадёжными, годными только для опытного производства. Они предпочитают работать с китайской или европейской компонентной базой, несмотря на сложности с поставками и более высокую стоимость. Какие меры, на ваш взгляд, помогут изменить эту ситуацию?

Евгений Дьяконов:

– Мы должны активно заниматься просветительской работой среди предприятий, демонстрируя преимущества наших технологий. Приведу пример: один завод, занимающийся ремонтом газотурбинных установок для компрессорных станций, использовал пластиковый защитный кожух. Этот кожух регулярно ломался, и они заказывали его из Германии за 3000 евро. Мы предложили напечатать аналог на 3D-принтере. Изначально они отнеслись к



Заседание экспертного совета (Фото: отраслевой комитет "Аддитивные технологии" Промышленного кластера РТ)

этому скептически, ссылаясь на бюрократические процедуры. Тогда мы просто взяли сломанный образец, отсканировали его (допуски в данном случае не были критичны), напечатали за ночь и принесли им готовое изделие. После успешных испытаний завод стал активно использовать наши технологии, включая FDM-печать оснастки для тестирования форсунок и других деталей.

Такими примерами мы повышаем осведомленность предприятий. Также важно работать с целевой аудиторией – техническими директорами, главными инженерами, показывая им современные возможности. Многие до сих пор считают, что 3D-печать — это хрупкие изделия из силумина, которые рассыпаются от прикосновения. Нужна системная образовательная работа.

Дмитрий Трубашевский:

– А есть ли в России площадки, где можно собрать эту целевую аудиторию – инвесторов, руководителей, инженеров? Обучение школьников – это, конечно, важно, но нам нужно в первую очередь охватить десятки тысяч предприятий, чтобы они узнали о возможностях аддитивных технологий.

Сергей Майоров:

– В Татарстане мы создали для этого специальную экосистему. Промышленный кластер и отраслевые комитеты проводят 163 мероприятия в год. Комитет по аддитивным технологиям может участвовать в работе всех площадок. Представители комитета выступают не только в России, но и за рубежом. Мы получаем множество приглашений и предоставляем нашим специалистам возможность выбирать наиболее релевантные площадки.

Евгений Дьяконов:

– Да, этот механизм действительно эффективен для продвижения на выставках и мероприятиях. Когда выступаешь в качестве спикера, к тебе подходят представители 3–5 предприятий с готовыми кейсами и предложениями о сотрудничестве. Как говорится, «с меня идеи, с вас – руки!». Например, на предстоящей выставке «Росмолд» я буду рассказывать о преимуществах и перспективах развития наших технологий. А на V Лидер-Форуме в 2023 году в Казани я выступал дважды. Первый раз на тематической сессии «Аддитивные технологии как драйвер развития», второй – на пленарном заседании с участием первых лиц организаций. Среди слушателей были технический директор «Росатома», представители «Роскосмоса». На пленарке рядом сидели заместитель министра промышленности Татарстана и представители «Росатома» высокого ранга.

Если мы будем, бездействуя, только смотреть на Китай, Европу или Америку и говорить, что у нас ничего не получится, то этот «зоопарк» оборудования действительно обоснуется на наших предприятиях. Поэтому через механизм единого центра продвижения технологий мы планируем расширять круг предприятий, где можно применять отечественные решения.

Дмитрий Трубашевский:

– Как вы думаете, какие потенциальные опасности для отечественного рынка АП может нести стремительное развитие Китая в этой сфере? Судя по экспозициям последних ключевых отраслевых выставок очевидно, что они семимильными шагами вырываются вперед. Многие западные компании сдают позиции, некоторые даже выкупаются китайцами. Как наша ситуация с аддитивными технологиями может защитить нас от такого проникновения? Особенно если учесть, что российские дистрибьюторы – это коммерческие компании, которые в первую очередь заинтересованы в продажах, а не в продвижении именно российских технологий. Как только появляется возможность импорта из Китая или Запада, они переключаются на эти продукты, создавая на местном рынке настоящий «зоопарк» оборудования. Как от этого защититься?

Сергей Майоров:

– Вы дали точное определение этому явлению – «зоопарк». И это действительно большая проблема для предприятий, которым приходится обслуживать разнотипное оборудование. Когда специалисты по разным причинам уходят, предприятия рискуют потерять не только кадры, но и сами устройства.

Евгений Дьяконов:

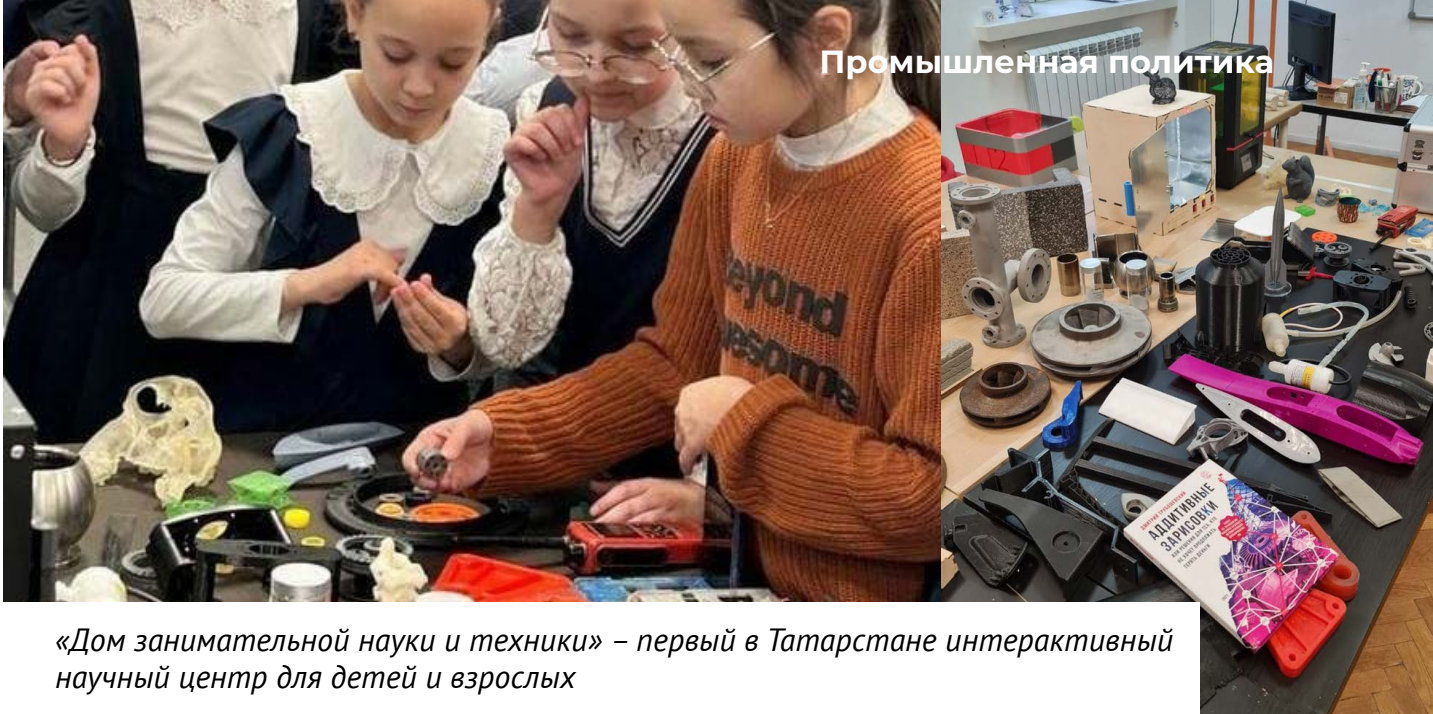
– В нашем комитете практически нет поставщиков китайского оборудования. Мы работаем в основном с производителями российской техники и продвигаем отечественные технологии и материалы. Наша цель – развивать внутренний рынок, чтобы быть конкурентоспособными на мировом уровне. Если мы будем, бездействуя, только смотреть на Китай, Европу или Америку и говорить, что у нас ничего не получится, то этот «зоопарк» оборудования действительно обоснуется на наших предприятиях. Поэтому через механизм единого центра продвижения технологий мы планируем расширять круг предприятий,

где можно применять отечественные решения. Наша цель – работать с российским оборудованием, технологиями и материалами, двигаясь единым фронтом к уровню развития, сопоставимому с китайским. Хороший старт позволит затем развиваться по накатанной.

Сергей Майоров:

– Мы административно поддерживаем создание единых центров продвижения в каждом отраслевом комитете. За 11 лет работы у меня накопилась база из 17,5 тысяч контактов — это достижение Татарстана, которое теперь будет работать на всю страну. Мы можем открывать любые двери в России и дружественных странах для продвижения отечественной продукции.

Как Вы правильно заметили, мы создаем, например, Единый центр продвижения отечественных станков и инструментов. Наша задача – объединение усилий производителей и ресурсов республики. Эта синергия даст хороший эффект в конкуренции с иностранными производителями.



«Дом занимательной науки и техники» – первый в Татарстане интерактивный научный центр для детей и взрослых

Светлана Бакарджиева:

– Сегодня ни один разговор о перспективах развития высокотехнологичных сегментов индустрии не обходится без обсуждения возможностей интеграции в производственные процессы новых технологий: искусственного интеллекта, применения бионического или генеративного дизайна и т.д. Как эти инструменты используются или будут использоваться в работе кластера?

Евгений Дьяконов:

– Мы разрабатываем системы для так называемого онлайн-мониторинга, которые на этапе производства обнаруживают дефекты в деталях. Эти дефекты способны вывести конечное изделие из строя. Это позволяет сократить издержки на 10–12%. Также ИИ используется для предиктивной аналитики – мониторинга состояния оборудования и предупреждения его поломки. Без искусственного интеллекта нам уже не обойтись.

дения его поломки. Без искусственного интеллекта нам уже не обойтись.

Дмитрий Трубашевский:

– Однако ИИ – инструмент обоюдоострый и при чрезмерном увлечении им или неумелом обращении может дать опасные «побочки». Сейчас эксперты предупреждают о возможной проблеме, извините за грубость, «размягчения мозгов» у будущих специалистов. Сегодняшние школьники и студенты часто идут по пути наименьшего сопротивления, используя ChatGPT и его аналоги для получения готовых ответов. Не потеряем ли мы в итоге способность мыслить творчески и рационально? Как этого избежать?

Светлана Бакарджиева:

– Да, мы уже слишком много делегируем искусственному интеллекту, а его возможности всё же

ограничены.

Евгений Дьяконов:

– В нашем комитете есть замечательная организация «Дом занимательной науки и техники». Там школьников с первого класса знакомят с передовыми технологиями – показывают спускаемые модули ракет, вертолёты в разрезе, бытовую технику. Большое внимание уделяется 3D-печати.

КНИТУ-КАИ разработал образовательную платформу, где студенты с бакалавриата до аспирантуры разрабатывают практические ноу-хау. Здесь можно всё пощупать руками – чего не может дать ИИ. Искусственный интеллект будет развиваться параллельно, но не заменит полностью человеческое мышление. 

Беседовали:

**Светлана Бакарджиева
Дмитрий Трубашевский**



Прочти
меня на
сайте

WELCOME
欢迎参观



亚洲3D打印、增材制造展览会
TCT ASIA 2025



ТСТ Asia 2025: тренды, иллюзии и китайский размах

Введение

ТСТ Asia 2025, прошедшая с 17 по 19 марта в Шанхае, подтвердила свой статус одной из ведущих мировых выставок в сфере аддитивного производства и 3D-печати, став ключевым событием в сфере аддитивных технологий Азиатско-Тихоокеанского региона. В юбилейный, десятый год своего существования, ТСТ Asia 2025 не только продемонстрировала впечатляющие достижения отрасли за последнее десятилетие, но и наметила векторы ее дальнейшего развития.

В этом году экспозиция объединила более 300 компаний, представивших инновационные решения в области металлической и керамической печати, фо-

тополимерных технологий, а также автоматизированных систем для массового производства. Выставка привлекла свыше 20 000 специалистов, став важной площадкой для обмена опытом, поиска партнеров и анализа глобальных трендов.

В перечне ключевых тем ТСТ Asia 2025 — рост масштабов аддитивного производства, появление новых материалов и расширение применения 3D-технологий в таких стратегических отраслях, как авиакосмическая, медицинская и автомобильная промышленность. В этой статье мы рассмотрим самые значимые экспонаты и тренды выставки, чтобы понять, какие технологии будут формировать будущее

индустрии в ближайшие годы.

АЕЕ: интеграция сварки трением с перемешиванием и АТ

Компания Aerospace Engineering Equipment (Suzhou) Co., Ltd. (АЕЕ) — один из мировых лидеров в области сварки трением с перемешиванием (FSW) — активно исследует возможности комбинирования этой технологии с аддитивным производством. Хотя основным направлением АЕЕ остается разработка оборудования и процессов FSW, компания делает значительные шаги в интеграции этих методов для создания высокопрочных и сложных металлических конструкций.



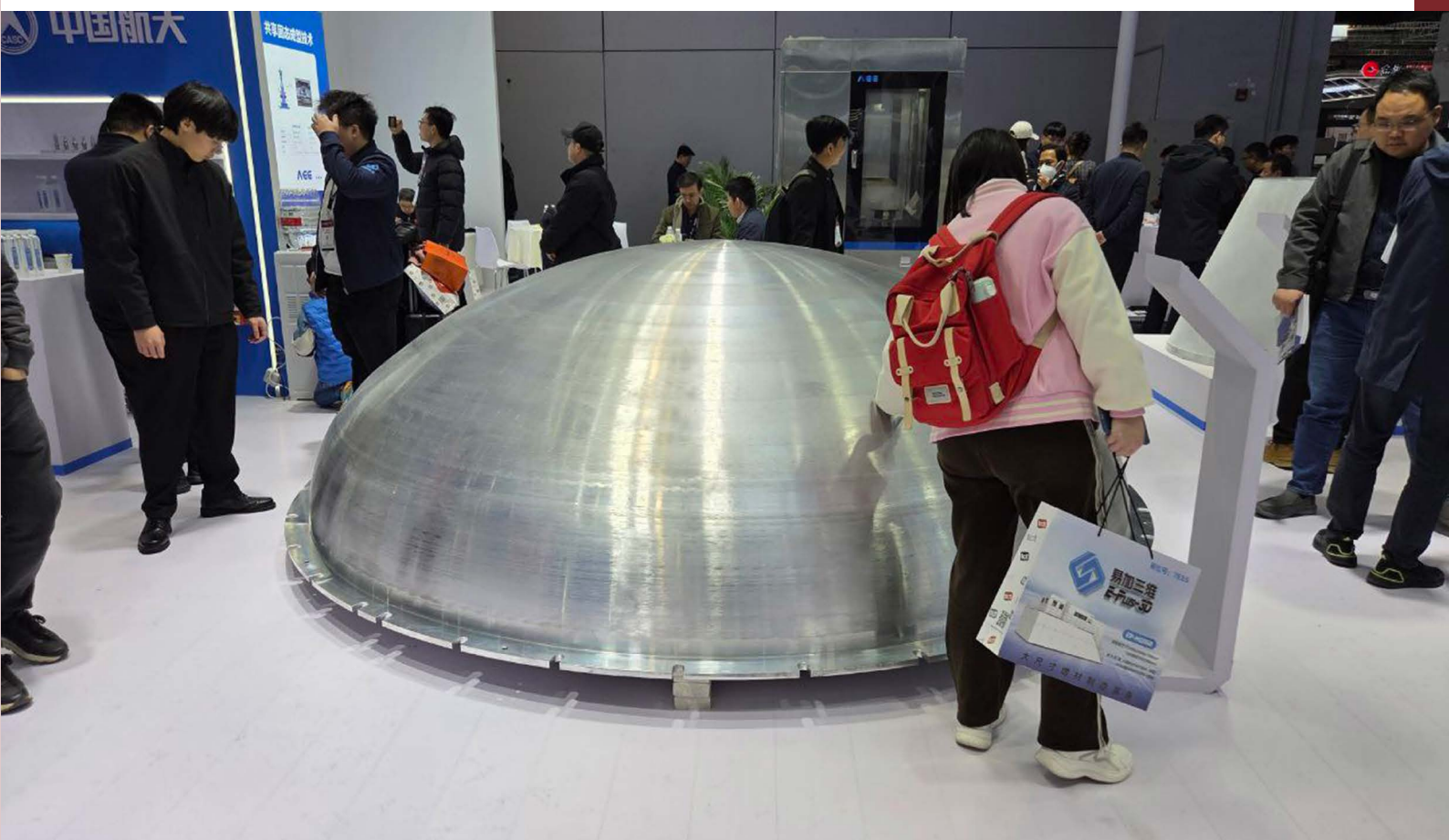
Одно из ключевых направлений АЕЕ — применение FSW для соединения крупногабаритных деталей, изготовленных методами аддитивного производства. Современные 3D-принтеры зачастую имеют ограничения по размерам рабочей камеры, что делает невозможным печать крупных конструкций за один цикл. Технология FSW позволяет надежно сваривать отдельные модули, сохраняя механические свойства материала. Это особенно востребовано в аэрокосмической отрасли, где критически важны прочность и долговечность соединений.

Еще одна перспективная область — использование FSW для восстановления и доработки изделий, созданных с помощью 3D-печати. Метод позволяет локально ремонтировать поврежденные участки, продлевая срок службы деталей без их полной замены. В условиях растущего спроса на ремонтпригодные решения в промышленности такой подход открывает новые возможности для экономии ресурсов.

АЕЕ обладает почти 10-летним опытом работы в автомобильной, железнодорожной, аэрокосмической, судостроительной и электронной

отраслях. Компания продолжает расширять свое присутствие на международном рынке, укрепляя партнерские отношения и предлагая инновационные решения. На выставке TCT Asia AEE продемонстрировала свои компетенции и возможности, прощупывая интерес среди аддитивного сообщества. Стоит отметить, что это им удалось!

Образец монолитного днища ракеты размером диам. 3350 × 1020 мм изготовлен методом сварки трением с перемешиванием (FSW) из алюминиевого сплава 6061. Процесс производства занял 500 часов.



Монолитное днище топливного бака ракеты-носителя модели 3350 — один из ключевых экспонатов выставки, впечатляющий своими габаритами и передовыми технологиями аэрокосмического производства. Фото: Кирилл Казмирчук



Технология FSW использует металлы и сплавы в практически любом состоянии (стружка, бруски, порошок), но удобнее всего работать со стержнями. Фото: Наиль Сабирьянов

Деятельность АЕЕ демонстрирует растущую роль гибридных подходов в современном производстве. Сочетание аддитивных технологий и сварки трением с перемешиванием позволяет создавать сложные конструкции с высокой прочностью, что особенно важно для авиакосмоса, энергетики и машиностроения. Развитие таких решений открывает новые перспективы для промышленности, делая производство более гибким и экономически эффективным.

ENIGMA: мультилазерная мультиматериальная печать

С момента основания в 2011 году компания Nanjing ENIGMA AUTOMATION CO., LTD. (далее «ENIGMA») раз-

вивается как технологический интегратор, специализирующийся на внедрении аддитивных технологий в промышленные процессы. Основной фокус внимания компании направлен на создание комплексных решений, где 3D-печать металлами по технологиям проволоочной наплавки WAAM/Arc-DED (W) и LWC/LWAM/L-DED (W) становится ключевым элементом автоматизированных производственных цепочек.

Компания ENIGMA объединяет собственные разработки в области металлической 3D-печати (CML HYBRID) с передовыми австрийскими технологиями (CMT), создавая индивидуальные решения для промышленности. Специалисты

интегрируют аддитивное производство с роботизированной сваркой, формируя современные производственные системы.

Однако ключевым отличием компании является технология CML HYBRID. В основе системы – многолучевая наплавка, использующая шесть лазеров с формированием кольцеобразного пятна для оптимального распределения энергии и равномерного плавления проволоки. Лазерные модели могут комбинировать различные длины волн, включая сочетание красного и синего лазеров. Такое решение значительно повышает поглощение энергии при работе с отражающими материалами, такими как медь и алюминий.



Инновационная система CML HYBRID представляет собой технологический прорыв в области аддитивного производства, сочетающий возможности проволоочной и порошковой наплавки с использованием шести независимых лазерных источников для многоматериальной печати. Фото: Lupeng Zhao

Дополнительную гибкость системе придает проволоочно-порошковая подача с шестью независимыми каналами подачи порошка и проволоочным питателем, позволяющая точно регулировать состав материала и создавать градиентные материалы и наноккомпозиты.

Важный элемент технологии – двухконтурная система защитного газа с независимыми внутренним и внешним газовыми контурами, которая позволяет использовать различные газовые смеси для оптимизации микроструктуры и механических свойств получаемого материала.

Благодаря экспертизе в металлической 3D-печати

ENIGMA помогает предприятиям переходить к цифровому производству, где аддитивные технологии становятся основой для создания сложных и габаритных компонентов.

Компания успешно реализовала проект по изготовлению полномасштабного

шасси для электромобиля PIX Moving методом WAAM. Образец размером 2400 × 800 × 200 мм и весом 80 кг был напечатан из алюминиевого сплава 5356, демонстрируя возможности технологии для создания массивных металлических конструкций.



Шасси беспилотного электромобиля стартапа PIX Moving, напечатанное по технологии WAAM. Фото: Кирилл Казмирчук

Процесс печати занял 90 часов непрерывной работы (скорее всего по частям), что свидетельствует о высокой стабильности технологического процесса. От момента заказа до отгрузки готового изделия прошло всего 35 дней.

Этот проект наглядно иллюстрирует потенциал проволочной электродуговой наплавки для изготовления крупногабаритных деталей из алюминиевых сплавов, сочетая в себе высокую скорость производства с возможностью создания сложных геометрических форм. Применение сплава 5356 обеспечило изделию оптимальное сочетание прочностных характеристик и коррозионной стойкости, что особенно важно для ответственных промышленных применений.

LiM Laser – инновации в промышленной 3D-печати металлов

Tianjin LiM Laser Technology Co., Ltd. зарекомендовала себя как один из лидеров в сфере промышленных аддитивных технологий, специализируясь на разработке и производстве оборудования для лазерной 3D-печати металлов. В центре внимания компании — передовые решения на основе технологии лазерного порошкового спекания (L-PBF), позволяющие

создавать высокоточные детали сложной геометрии для ответственных отраслей промышленности.

Оборудование Tianjin LiM Laser Technology поддерживает работу с широким спектром металлических порошков, включая нержавеющие и инструментальные стали, титановые и алюминиевые сплавы, а также кобальт-хромовые материалы. Все принтеры оснащены специализированным программным обеспечением, которое позволяет точно контролировать параметры печати и гарантировать стабильно высокое качество изделий.

Ключевые направления применения разработок компании охватывают наиболее технологически требовательные отрасли. В авиакосмической промышленности оборудование используют для производства сложных деталей двигателей и турбин. В медицин-

ской сфере — для создания индивидуальных имплантатов и хирургических инструментов. Автомобилестроители ценят возможность изготовления облегченных и прочных компонентов, а в энергетике технологии находят применение при производстве деталей для газовых турбин.

В числе конкурентных преимуществ решений компании – высокая производительность (до 22 см³/час при мощности лазера 500 Вт), исключительная точность построения благодаря прецизионной оптической системе, а также универсальность, позволяющая использовать оборудование как для прототипирования, так и для серийного выпуска деталей.

Центральным экспонатом стенда стала авиационная каркасная конструкция из жаропрочного титанового сплава TA15 размерами 6295 × 2198 × 614 мм, изго-

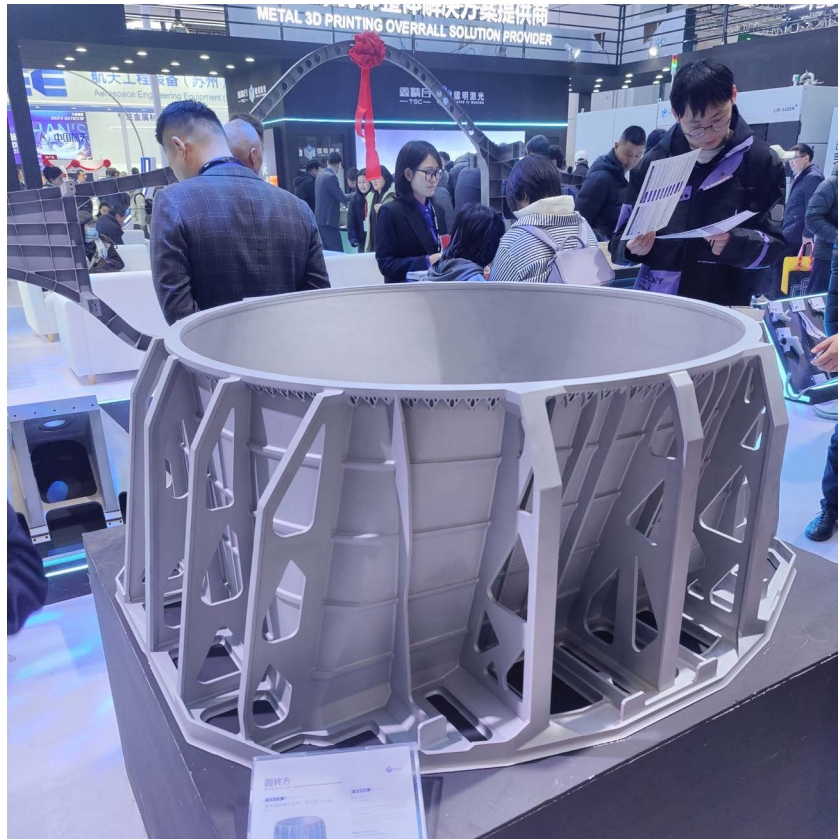


Каркасная структура фюзеляжа самолета, изготовленная из высокотемпературного титанового сплава TA15 по L-DED (P). Фото: Кирилл Казмирчук

товленная по технологии лазерной газопорошковой наплавки (L-DED). Утверждается, что это изделие было обработано на установке со стандартными размерами камеры построения, но для реализации такого проекта пришлось сконструировать специальный подвижный стол и печатать по частям, передвигая изделие.

Толщина слоя структуры составила всего 60 мкм, что обеспечило высокую точность и минимальную шероховатость поверхности. При этом срок изготовления занял 62 дня — значительно меньше, чем потребовалось бы при использовании традиционных методов литья. Деталь предназначена для применения в аэрокосмической промышленности, где предъявляются особые требования к прочности, массе и надежности конструкций. Титановые сплавы активно используются при производстве элементов фюзеляжей, силовых конструкций и узлов летательных аппаратов, что подтверждает востребованность данной технологии в отрасли.

На выставке продемонстрировали крупногабаритный корпус авиадвигателя. Монолитная конструкция размером 1290 × 1180 × 506 мм с оптимизированной топологией,



Компонент авиационного двигателя с многочисленными ребрами жесткости. Фото: Кирилл Казмирчук

включающая сложную систему внутренних каналов и ребер жесткости, была изготовлена из алюминиевого сплава AlSi10Mg на промышленном 3D-принтере LiM-X1500H всего за 288 часов непрерывной печати.

Этот кейс наглядно показал, как аддитивные технологии сокращают сложные многоэтапные производственные процессы традиционного машиностроения до единой цифровой цепочки. В отличие от классических методов, требующих десятков технологических операций (литье, механическая обработка, сварка, сборка), 3D-печать позволила создать готовое изделие высокой степени сложности за один производствен-

ный цикл с минимальной постобработкой. Особое внимание специалистов привлекла реализованная в конструкции система полых структур, которая при традиционном производстве потребовала бы дорогостоящей и трудоёмкой сборки из множества отдельных компонентов.

Этот экспонат стал наглядной демонстрацией перехода от концепции к серийному производству и открывает новые перспективы для создания сложносоставных деталей в аэрокосмической отрасли, где на первый план выходят требования к весовой эффективности, прочности и точности изготовления.

Применение АТ дало значительные преимущества: сократилось количество деталей, упростился процесс сборки, уменьшились отходы материала, а главное – появилась возможность реализовать инновационные конструкторские решения, недоступные при традиционных методах производства.

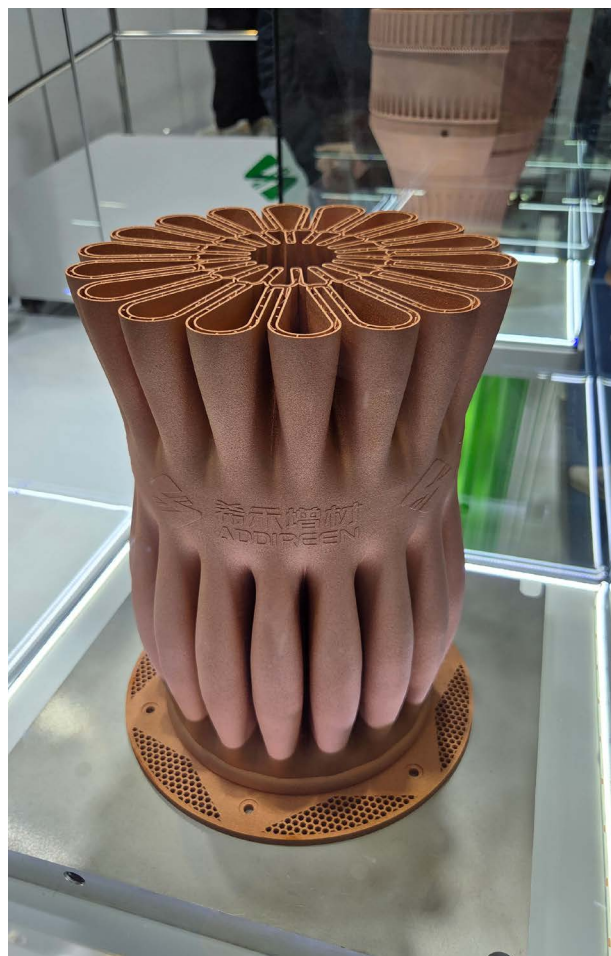
**Addireen Technologies:
зеленоглазое «такси»**

Основанная в 2023 году в Шэньчжэне компания Addireen Technologies стала пионером в области металлической 3D-печати с использованием зеленого лазера. Специализируясь на решениях для высокоточного производства, компа-

ния разработала уникальную технологию на основе зеленого лазера с длиной волны 532 нм, который благодаря короткой волне и высокой мощности (до 2000 Вт) особенно эффективен для работы с тугоплавкими металлами с высокой отражательной способностью, такими как медь, золото и

алюминий.

Флагманский продукт компании — многолазерный 3D-принтер ХН-М660G с областью построения 660 × 660 × 1300 мм, оснащенный четырьмя зелеными лазерами мощностью 500-2000 Вт. Это оборудование поддерживает печать из широкого спектра материа-



Демонстраторы возможностей печати с помощью зеленых лазеров: слева – камера жидкостного ракетного двигателя из CuCrZr размером 330 × 330 × 990 мм, справа – двухфазный теплообменник (газ – жидкость) из чистой меди и размером 255 × 255 × 430 мм. Фото: Кирилл Казмирчук

лов, включая чистую медь, вольфрам, медные, алюминиевые и титановые сплавы. Для управления процессами печати Addireen разработала собственное программное обеспечение, обеспечивающее точный контроль параметров и высокое качество изделий, например, для печати ультратонких стенок (0,06 мм).

Технологии Addireen нашли применение в ключевых отраслях промышленности. В аэрокосмической сфере они используются для производства деталей двигателей и турбин, в медицине — для создания биосовместимых имплантатов, в электронике — для печати медных компонентов, в автомобилестроении — для изготовления легких и прочных деталей, а в энергетике и авиации — для теплообменников.

Команда основателей с 18-летним опытом в лазерных технологиях позволяет компании не только разрабатывать инновационные решения, но и адаптировать их под конкретные задачи заказчиков. В планах Addireen — расширение линейки оборудования, исследования новых материалов (медных сплавов и композитов) и выход на международные рынки, включая Европу и Северную Америку.

Благодаря уникальной

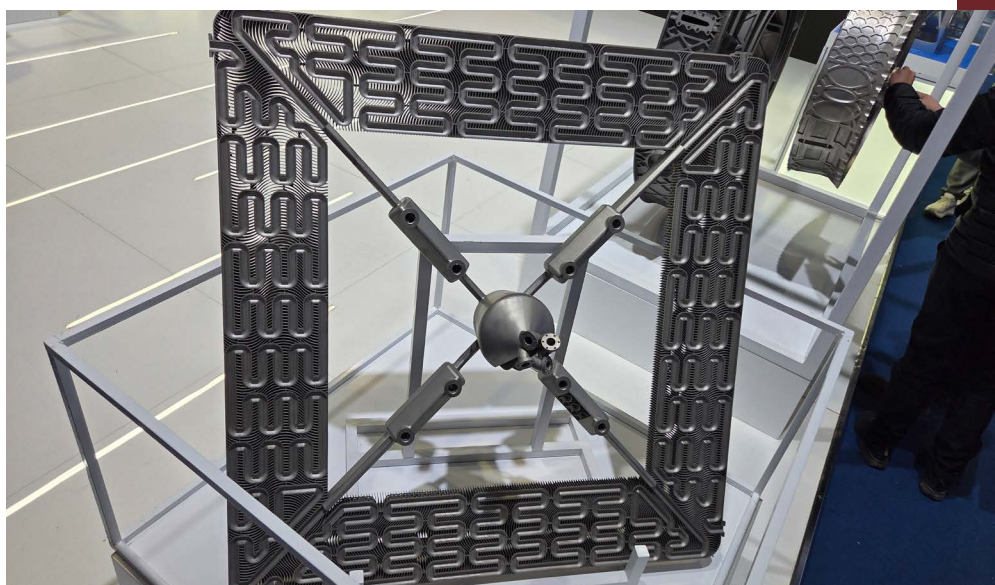
технологии зеленого лазера и комплексному подходу к разработке решений Addireen Technologies занимает особую нишу на рынке аддитивного производства, предлагая эффективные решения для работы с металлами, которые традиционно сложны для 3D-печати.

BLT: невозможный гибридный радиатор

Компания BLT напечатала инновационный гибридный радиатор, используя технологию L-PBF/SLM. Разработанный инженерами компании Polylite радиатор представляет собой многофункциональную систему, способную одновременно смешивать до четырех различных материалов, проводить химические реакции, охлаждать продукты реакции и выводить отходы. Гибкая конструкция интерфейсов

позволяет адаптировать устройство к различным технологическим процессам. Интеграция функций в единый компактный корпус значительно повышает энергоэффективность всего производственного процесса.

Инженеры создали плотную систему теплоотводящих каналов и ребер, которая значительно повышает эффективность теплообмена. Особое внимание было уделено интеграции смесителя и реактора в единый корпус радиатора. Внутренняя структура устройства выполнена с использованием минимально изогнутых поверхностей — эта инженерная находка обеспечивает высокую пористость и связность, позволяя материалам равномерно смешиваться и полноценно вступать в реакцию при одновременном эффектив-



Гибридный радиатор из нержавеющей стали на стенде BLT. Фото: Кирилл Казмирчук

ном охлаждении.

Применение аддитивных технологий дало значительные преимущества: сократилось количество деталей, упростился процесс сборки, уменьшились отходы материала, а главное – появилась возможность реализовать инновационные конструкторские решения, недоступные при традиционных методах производства.

Материалом для радиатора выбрана специальная нержавеющая сталь, сочетающая хорошую теплопроводность с исключительной коррозионной стойкостью. Это особенно важно для химической промышленности, где оборудование работает с агрессивными средами при высоких температурах. Материал демонстрирует отличную термическую стабильность,

сохраняя прочность и жесткость даже при резких перепадах температур и сильных вибрациях, что гарантирует долговечность и надежность работы устройства.

UnionTech: шинный король

Автопром требует гибких решений для быстрого внедрения инноваций. Традиционные методы изготовления шинных форм сталкиваются с проблемами: необходимость ручной подгонки стальных пластин для сложного протектора, трудности воспроизведения радиусов и углов, неэффективность малых серий.

Технология SLA-печати предлагает цифровую альтернативу. Компании вроде UnionTech на выставке и в жизни демонстрируют образцы шинных секторов

с точностью $\pm 0,05$ мм, производя микроканавки и сложные профили, недоступные при механической обработке.

Этот процесс обеспечивает высокую точность и качество пресс-форм для производства шин, что является ключевым фактором в создании надежных и эффективных автомобильных покрышек.

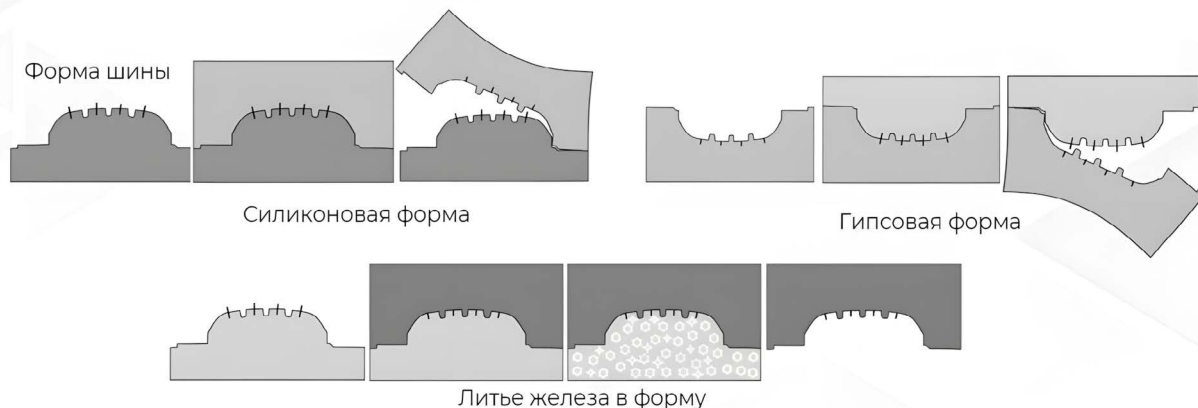
Ключевые преимущества такой оснастки из фотополимерных смол: полная автоматизация вместо ручного труда, сокращение цикла с недель до дней, возможность создания инновационных конструкций, экологичность за счет снижения отходов.

Особенно перспективна технология для премиум-сегмента и спецпродукции. С развитием материалов и оборудова-

Процесс производства пресс-форм для шин



Литье железа в форму: температура плавления 1560 °C, температура печи 1500 °C, температура литья 1450 °C.



Инновационный процесс производства пресс-форм для шин. Источник: UnionTech



Образцы сложных шинных секторов пресс-форм UnionTech. Фото: Кирилл Казмирчук

ния аддитивные технологии могут стать новым отраслевым стандартом, открывая эру цифрового шинного производства.

HPRT: замах с размахом на королей MJF

Китайская компания HPRT (Xiamen Hanin Co., Ltd.) с 20-летним опытом входит в число ведущих производителей печатного оборудования, специализируясь на термопринтерах, штрих-кодовых решениях и цифровой текстильной печати. Ежегодно компания выпускает свыше 1 млн маркировочных принтеров для внутреннего рынка и 2,5 млн компактных A4-принтеров, включая беспроводные модели для логистики, ритейла и медицины.

Собственная производственная база HPRT включает R&D-центр с 400 ин-

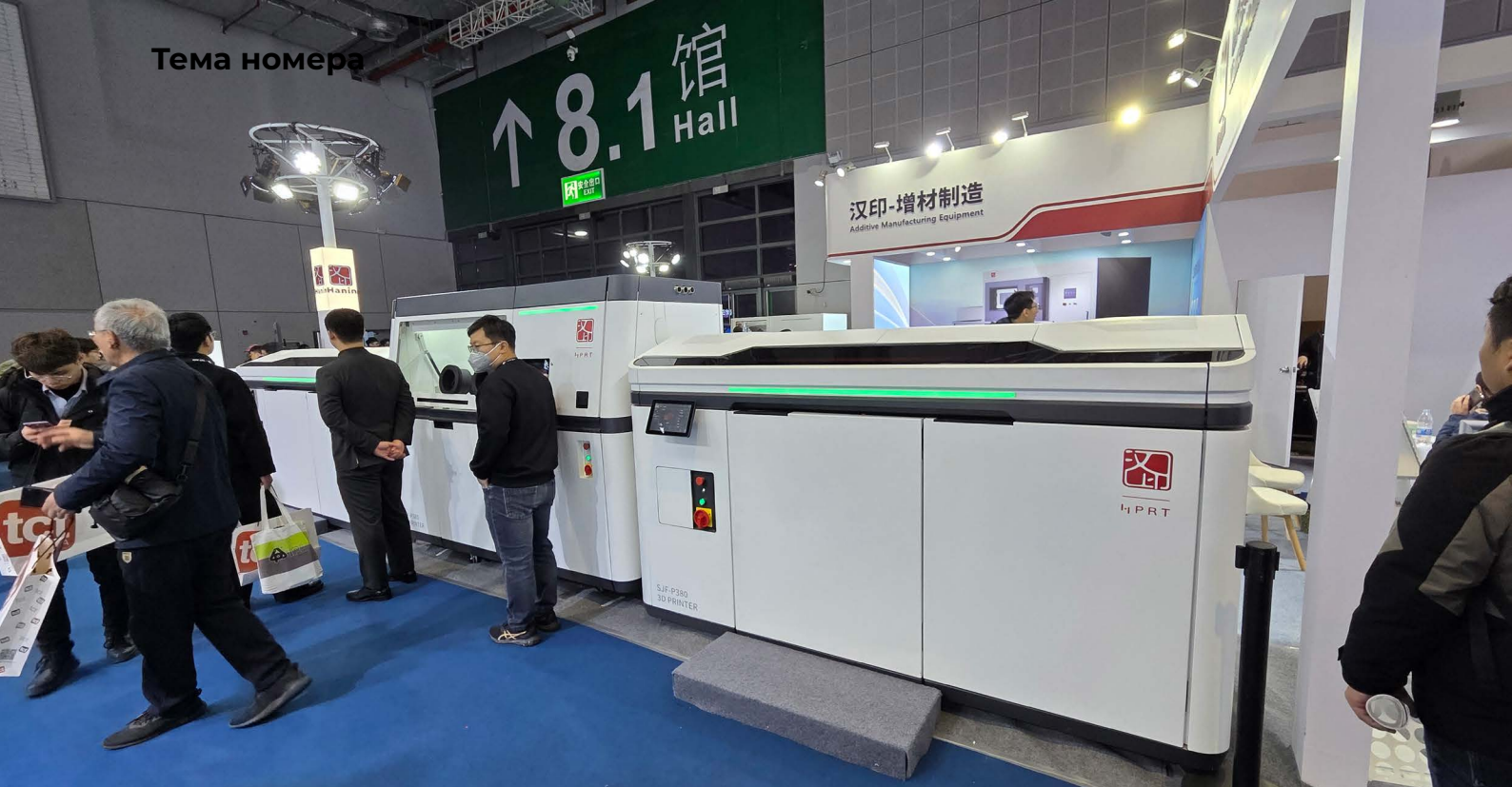
женерами, обладающий 733 патентами. Сегодня компания активно развивает направление 3D-печати, и одной из ключевых инноваций стало промышленное оборудование SJF-P380.

Этот 3D-принтер использует технологию одноагентного формования (Single Agent Molding), обеспечивающую высокоточное спекание порошковых термопластов и эластомеров. По принципу работы и характеристикам решение напоминает технологию Multi Jet Fusion (MJF) от HP, но при этом HPRT предлагает собственную адаптацию процесса.

Оборудование SJF-P380 оснащено замкнутой системой температурного контроля на базе AI-Image-Diagnostic-System, что минимизирует деформацию деталей. Встроенная систе-

ма Online-Repair с детекцией капель в реальном времени обеспечивает автоматическое исправление ошибок печати и стабильность процесса. Принтер поддерживает интеграцию с IoT для удаленного мониторинга производства, ускоряя переход от прототипирования к серийному выпуску. Важным преимуществом являются промышленные керамические дюзы – износостойкие пьезоэлектрические печатные головки, не требующие обслуживания и рассчитанные на длительную эксплуатацию.

В отличие от прямого копирования решений HP, HPRT делает ставку на оптимизацию производственных процессов и снижение затрат, предлагая конкурентную альтернативу в сегменте промышленной 3D-печати.



*Принтер HPRT SJF-P380, как потенциальный более доступный конкурент платформе HP MJF.
Фото: Кирилл Казмирчук*

Weshining: а вот и финал!

Компания Weshining представила на выставке машину плазменной полировки, которая позволяет достичь зеркального блеска поверхности с минимальными усилиями. Технология основана на использовании плазмы, находящейся в высокой энергетической фазе, что обеспечивает удаление микроскопических дефектов с металлических поверхностей. Это делает процесс полировки не только эффективным, но и точным, что особенно важно для деталей со сложной геометрией.

Такая полировка может

применяться в различных отраслях, включая медицину, ювелирное производство, автомобилестроение и электронику, ставя финальную точку во всем процессе аддитивного производства. В стоматологии технология используется для улучшения качества металлических протезов и зубных имплантатов, где идеально гладкая поверхность предотвращает скопление бактерий. В промышленности оборудование помогает достичь высоких стандартов обработки деталей, используемых в сложных механизмах или подвергающихся воздействию агрессивных сред.

Ключевое преимущество технологии — её универсальность. Плазменная полировка подходит для широкого спектра металлов, включая нержавеющую сталь, титан, алюминий, а также труднообрабатываемые материалы, такие как медь и кобальт-хромовые сплавы.

Процесс полировки полностью автоматизирован, что значительно экономит время и снижает зависимость от ручного труда. Оборудование способно обрабатывать изделия партиями, обеспечивая стабильный результат и высокую производительность.

HPRT делает ставку на оптимизацию производственных процессов и снижение затрат, предлагая конкурентную альтернативу в сегменте промышленной 3D-печати.



Результат работы технологии плазменной полировки от Weshining. Фото: Кирилл Казмирчук

Высочайший уровень кастомизации, необходимый как в роботостроении, так и в медицине, открывает перед 3D-печатью новые горизонты массового применения.

Это особенно важно для крупных производственных линий, требующих быстрой и качественной обработки большого количества деталей.

HBD и BLT: смешались люди, роботы...

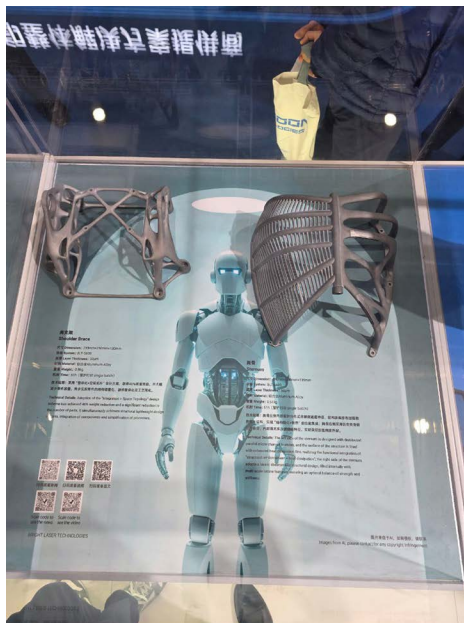
Так хотелось бы начать этот текст, слегка перефразировав классика, ведь сегодня аддитивные технологии все глубже проникают в два глобальных тренда: создание компонентов для андроидной робототехники и бионического протезирования для кибернетически усовершенствованных лю-

дей. Высочайший уровень кастомизации, необходимый как в роботостроении, так и в медицине, открывает перед 3D-печатью новые горизонты массового применения.

Уже множество аддитивных технологий прошли проверку в этих сферах, и большинство из них не просто прижились, а стали неотъемлемой частью процесса. Роботы требуют сложных, легких и функциональных деталей, которые традиционные методы производства часто не могут обеспечить с нужной точностью и экономической эффективностью.

Аддитивные технологии справляются с этой задачей, предлагая свободу геометрии, снижение веса и возможность быстрого прототипирования.

В мире бионических протезов ситуация еще более впечатляющая. Каждый человек уникален, а значит, стандартные решения часто оказываются неэффективными. 3D-печать позволяет создавать протезы, идеально повторяющие анатомические особенности пациента, обеспечивая не только комфорт, но и естественную подвижность. Более того, аддитивные технологии дают воз-



Элементы андроидных роботов и бионических протезов. Фото: Павел Биленко и Кирилл Казмирчук

возможность интегрировать в протезы датчики и механизмы, приближая их функциональность к возможностям настоящих конечностей.

Эти два направления — робототехника и бионическое протезирование — лишь часть огромного по-

тенциала аддитивного производства. Но именно они наглядно демонстрируют, как технологии, еще недавно казавшиеся футуристичными, становятся частью повседневной реальности, стирая границы между человеком и машиной.

Bolitec: первый в мире напечатанный матрас

Компания POLLY POLYMER напечатала первый в мире полноразмерный матрас Bolitec длиной 2 метра. Этот революционный продукт изготовлен с использованием запатентованной техно-



Первый в мире напечатанный матрас из фотополимерной смолы. Фото: POLLY POLYMER

логии высокоскоростной полимерной 3D-печати и биоматериала ELASTO 1000 BIO.

Особенностью новинки стала уникальная полая решетчатая структура, состоящая из более чем десятка отдельных 3D-печатных блоков. Такая конструкция обеспечивает беспрецедентную воздухопроницаемость, создавая естественную систему вентиляции. По заверениям разработчиков, это полностью решает проблему перегрева и потливости во время сна.

Но главное преимущество – интеллектуальная система поддержки. Благодаря свойствам эластомера и тщательно рассчитанной структуре матрас автоматически подстраивается под контуры тела, обеспечивая оптимальную поддержку позвоночника. При этом он сохраняет устойчивость к деформации даже после миллионов циклов нагрузки.

Отдельного внимания заслуживает экологичность продукта. Использование биоматериалов и точное цифровое производство минимизируют отходы, что делает технологию перспективной с точки зрения устойчивого развития.

Эксперты уже называют эту разработку знаковым событием для индустрии. По прогнозам аналитиков, в ближайшие 5-10 лет

подобные технологии могут кардинально изменить подход к производству мебели и товаров для дома, открывая новые возможности для персонализации и устойчивого производства.

Размышления по делу

Выставки, безусловно, в первую очередь ориентированы на установление деловых контактов. Однако не всегда есть возможность продемонстрировать продукцию в её окончательном виде — иногда из-за продолжающейся разработки или тестирования рыночного спроса (демонстрационные образцы), а в других случаях из-за ограничений, накладываемых соглашениями о неразглашении (NDA), особенно при работе с оборонными заказчиками.

Кирилл Казмирчук, начальник отдела перспективных технологий и развития ФГУП «НАМИ», прокомментировал эту си-

туацию на примере алюминиевого двигателя истребителя с управляемыми соплами:

«На выставке большинство экспонатов выполнено по такому принципу: на первый взгляд выглядит как готовое изделие, но при детальном рассмотрении оказывается макетом. Объясняют это требованиями режима секретности. Хотя в любом случае нужно понимать — алюминий никогда



Алюминиевая демонстрационная модель авиационного двигателя с управляемыми соплами на стенде ZRapid Tech. Фото: Кирилл Казмирчук

не используют для производства двигателей».

Многие наши соотечественники, однажды побывав на TCT Asia, становятся затем ее постоянными посетителями. Неоднократно посетивший этот форум генеральный директор компании «АйЗД» Алексей Ембулаев считает ее одной из главных отраслевых выставок, которая показывает, куда движется аддитивный мир. А Китай в целом — это лакмусовая бумажка для сферы АП: что работает у них, будет работать везде. Вот какие впечатления Алексей вынес из посещения TCT Asia 2025:

«В этом году экспонентов стало меньше, а стенды — проще. В прежние годы многие участники привозили гигантские машины, чтобы поразить масштабами, — например, SLM-принтеры с полутораметровыми камерами. Сейчас даже крупные

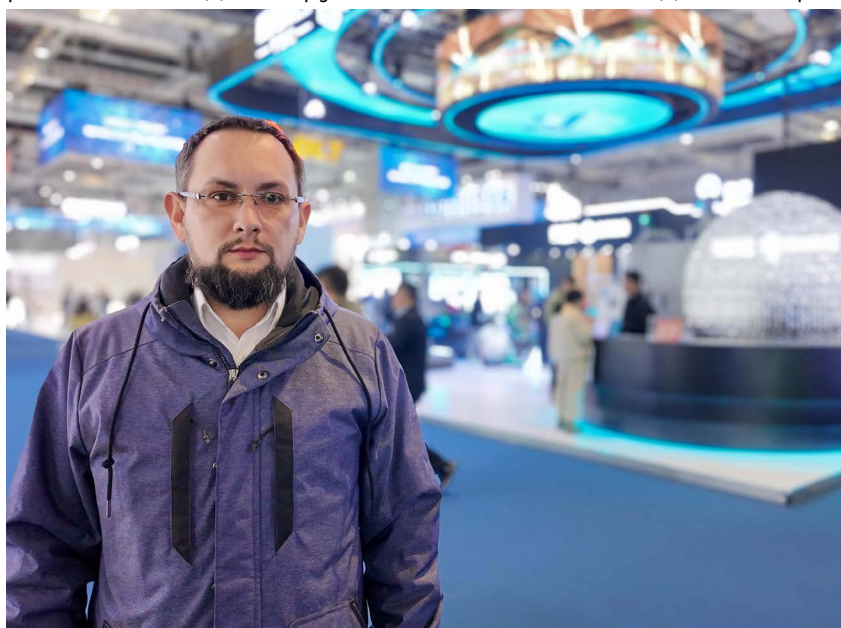
компании ограничились скромными стендами. Исключение — LiM Laser, у них был, пожалуй, самый впечатляющий стенд. Но даже такая лаконичная форма подачи последних достижений китайского аддитивного производства не оставляла сомнений в том, что перед нами — мировые лидеры в этой сфере. Производители вроде BLT или Farsoon адаптируют оборудование под глобальные рынки, и менее именитые компании ориентируются на тот же подход. Кстати, и реакция посетителей, среди которых было немало россиян, была соответствующей: стенды европейских поставщиков, вроде HP или Siemens, практически пустовали, тогда как на стендах китайских лидеров было столпотворение.

Главными трендами, судя по всему, остаются SLM и SLS. Китайцы массово выпускают новые модели. Напри-

мер, настольные SLM-принтеры — это новый тренд, как когда-то FDM/FFF. Ещё появилось много производителей оборудования для постобработки: сита, сушики, пылесосы. Что касается технологий вроде MJF (Multi Jet Fusion), то местные производители оборудования, похоже, к ней пока только примечиваются. Одна китайская компания (HPRT – прим. ред.) создала машину, явно вдохновлённую продуктом HP MJF, но пока она остаётся «сырой». Технология сложная, с множеством нюансов — видимо, потребуется ещё время на её доработку.

В сфере оборудования для проволоочной печати особенно впечатлила компания AMmake. Они представили систему с шестью лазерами и ИК-камерой, контролирующей каждый слой. При обнаружении дефекта лазер автоматически корректирует мощность, благодаря чему качество поверхности приближается к SLM-печати.

Не менее впечатляющей оказалась компания Arburg с её технологией капельной печати. Их решения позволяют создавать мягкие структуры, такие как мебельные подушки. Система использует три шнековых экструдера, работающих с недорогим материалом, но обеспечивающих превосходное качество изделий. Остаётся загадкой, почему



Алексей Ембулаев



Архитектурный макет китайской пагоды. Фото: Павел Биленко

эту технологию не копируют повсеместно — вероятно, она слишком сложна в реализации.

В целом выставка оставила двойственное впечатление. С одной стороны, достижения аддитивной сферы не могут не радовать: впечатляют темпы её развития и масштабы распространения — от точного машиностроения до производства широкого спектра потребительских товаров. С другой — очевидно отставание России от лидеров по

многим параметрам.

Некоторые считают, что через три года мы достигнем уровня, который сегодня демонстрирует Китай в области аддитивных технологий. Однако такой прогноз представляется излишне оптимистичным, даже с учётом нашего значительного научного и инженерного потенциала. Проблема не в потенциале, а в подходах к развитию аддитивного производства.

Дело даже не в масштабах рынка. В Китае цикл

сделки по поставке оборудования занимает в среднем полгода, тогда как у нас бюрократия и проблемы с бюджетированием растягивают процесс на 2-4 года. Китайские предприятия заказывают оборудование для песчано-полимерной и металлической печати крупными партиями, в то время как у нас преобладают единичные закупки.

Причина в разнице подходов: китайские производства приобретают отдельные принтеры под конкретные материалы, сплавы и задачи, тогда как у нас пытаются перенастраивать единственный аппарат под всё сразу, что существенно тормозит развитие.

Это во многом вопрос опыта. Наши специалисты пока недостаточно квалифицированы, особенно в области металлической печати. Отсюда осторожность: сначала нужно изучить процесс, «набить руку» на одной машине, оценить результаты, и лишь затем задумываться о расширении парка оборудования.

В Китае же проекты реализуют команды профессионалов с серьёзным опытом. Они сразу определяют, сколько единиц оборудования и каких производителей (например, BLT или Farsoon) потребуется для решения конкретных задач. Оборудование закупается партиями, и команда сразу



Обувной бум. Фото: Кирилл Казмирчук

приступает к работе. За три года они окупают вложения и переходят на новые технологии или более совершенные принтеры с увеличенным количеством лазеров. Именно поэтому Китай — лидер в этой области.

Есть ли у нас шансы приблизиться к ним? Безусловно, если начать инвестировать в партии принтеров, ставить амбициозные задачи и активнее внедрять аддитивные технологии в новые сферы производства».

Генеральный директор ООО «Диджикай», директор по развитию ООО «Синтезиум» Павел Биленко в своем комментарии сделал акцент на доступности и функциональности представленных технологий и оборудования:

«Впервые я посетил TCT Asia вместе с сыном. Десять лет назад мы купили наш

первый 3D-принтер, но из-за незрелости технологии тогда сложно было сосредоточиться на использовании 3D печати в бизнесе. Калибровка, подбор параметров, нестабильность процесса — это превращало 3D-печать скорее в хобби для энтузиастов, чем в удобный инструмент.

Но за последние два года всё изменилось — и в этом большая заслуга нового поколения изобретателей и предпринимателей. Технологии стали доступнее, надежнее, появились удобные системы мониторинга и множество функций, упрощающих работу. Это вызвало интерес не только у меня, но и у наших детей, для которых важен сам процесс создания, а не погружение в технические сложности, способные ско-

рее отпугнуть, чем вдохновить.

Выставка превзошла все ожидания — это генератор эмоций и идей. Я советую каждому там побывать и увидеть, как производство становится ближе — дома или в офисе. Теперь фраза «изобретения создаются в гаражах» обретает новый смысл. С такими доступными и функциональными принтерами мы действительно можем вырастить новое поколение инженеров, способных изменить мир. Мы с сыном и проектом NIKZA — часть этого процесса.

Более того, нам удалось посетить несколько фабрик цифрового производства — центров аддитивных технологий. Конечно, невозможно остаться равнодушным, наблюдая за тем, как создаются реальные изделия. Сегодня мы работаем над тем, чтобы такие производства появились не только в Китае».

Выводы

Выставка TCT Asia 2025 прошла с привычным размахом, подтвердив свой статус ключевой глобальной площадки в сфере аддитивных технологий. Хотя Запад продолжает относиться к ней с некоторой настороженностью, эксперты всего мира внимательно следят за происходящим на этом меропри-

Китай демонстрирует впечатляющую способность быстро адаптироваться к мировым трендам. В сегменте SLM-технологий появилось множество новых игроков.

ятии. Российский рынок, несмотря на географическую удаленность, проявляет к выставке особый интерес.

Однако возникает закономерный вопрос: какое будущее ждет отечественный рынок аддитивных технологий? Не превратится ли он в «зоопарк» брендов, где поставщики и интеграторы всех мастей будут конкурировать за внимание покупателей? Есть опасения, что российские разработчики 3D-оборудования могут остаться один на один с мощным китайским натиском, особенно учитывая, что коммерческие интересы интеграторов часто превалируют над лояльностью к конкретным производителям.

Китай демонстрирует впечатляющую способность быстро адаптироваться к мировым трендам. В сегменте SLM-технологий появилось множество новых игроков. Крупные компании выводят на рынок компактные системы для настольной металлической печати, в то время как небольшие предприятия осваивают производство крупногабаритных высокопроизводительных

установок. Вот что отметил эксперт Кирилл Казмирчук:

«Даже Haitian, традиционно специализирующийся на термопластавтоматах, представил двухэтажную машину для селективного лазерного плавления. Рынок перенасыщен предложениями, и теперь ключевой вопрос – кто сможет предложить действительно работоспособные решения. Параллельно растет число компаний, предлагающих услуги постобработки: одни делают акцент на окрашивании SLS-деталей, другие продвигают технологии галтования металлов. Набирают популярность альтернативные методы, такие как Metal MEX и Metal Binder Jetting, которые, несмотря на некоторые компромиссы в точности, обещают снижение себестоимости производства.

Наблюдается и ослабление патентных барьеров – несколько производителей представили оборудование, использующее технологию Multi Jet Fusion от HP, но предназначенное для работы с пластиками.

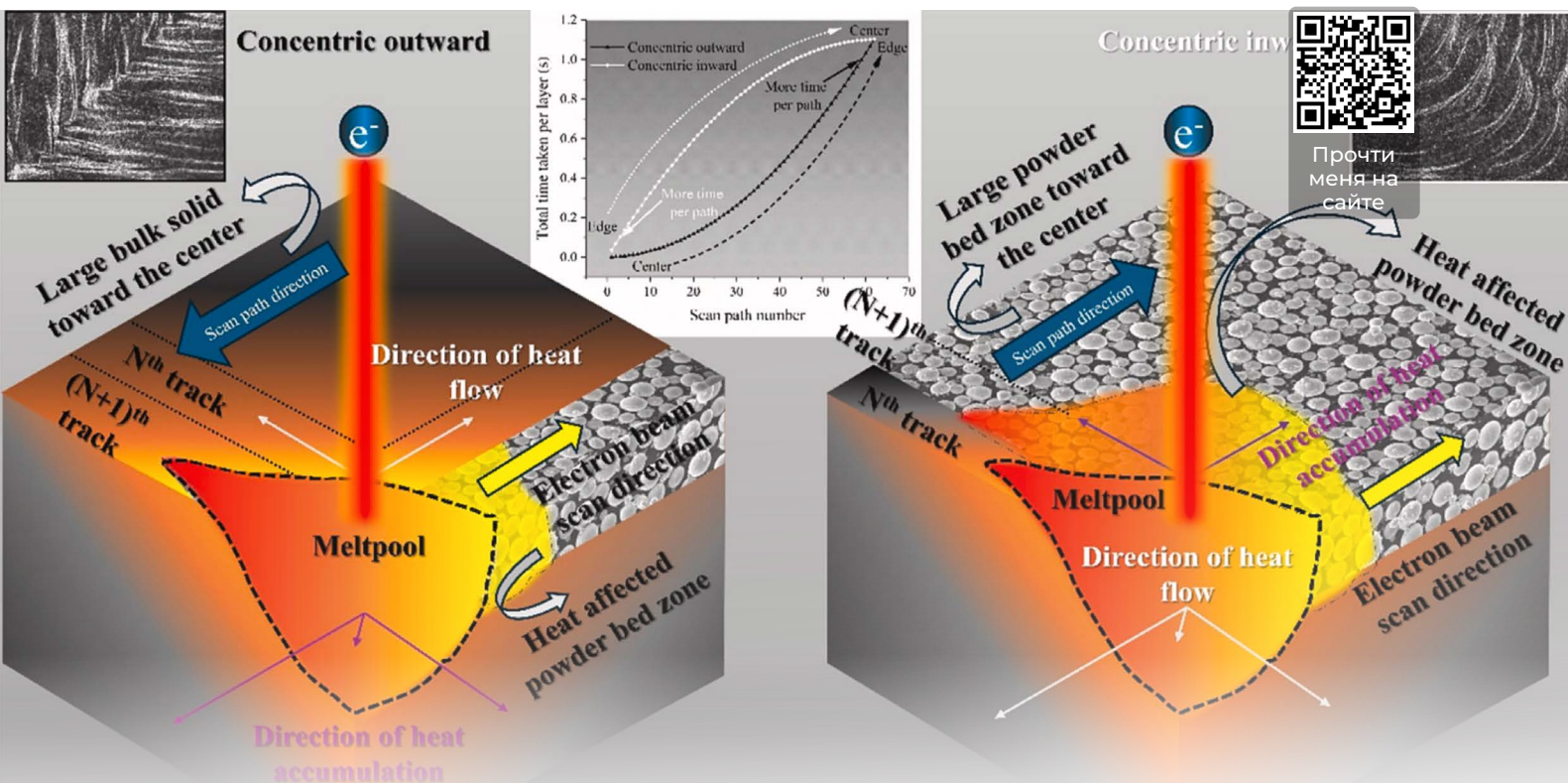
В сегменте программного обеспечения

привлекает VoxelDance, функциональность которого значительно расширилась, что заставляет задуматься о его потенциале как альтернативы традиционному Magics».

Особого внимания заслуживает китайский подход к демонстрации технологий. Многие экспонаты, стилизованные под компоненты смартфонов или умных часов, при ближайшем рассмотрении оказываются скорее маркетинговыми макетами, чем реальными продуктами. Например, обилие поддерживающих структур на видимых поверхностях вызывает вопросы о практичности таких решений.

Тем не менее, масштабы китайского присутствия в сфере аддитивных технологий впечатляют. Страна успешно сочетает агрессивный маркетинг с реальными производственными возможностями. Остается открытым вопрос: где проходит грань между настоящими технологическими прорывами и искусной имитацией? 

Дмитрий Трубащевский



ЕВ-РВФ: у меня есть стратегия

Как добиться того, чтобы деталь, которую вы печатаете, получилась одновременно прочной, пластичной и устойчивой к коррозии? Нет, вам не придется менять материал либо проводить долгую постобработку, вы просто подбираете другую траекторию сканирования (движения) луча в металлопорошковом 3D-принтере. Скажете, фантастика? Нисколько. Последние исследования в области электронно-лучевой плавки ЕВ-РВФ/ЕВМ показывают, что именно стратегия сканирования может стать ключом к созданию деталей с заданными свойствами. Давайте разберёмся, как это работает на примере нержавеющей стали 316L — материала, без которого немыслимы современная медицина, авиация и энергетика.

ЕВ-РВФ против L-РВФ: почему электронный луч выигрывает?

Все, кто в теме, наверняка знают о возможностях технологии селективного лазерного плавления L-РВФ. Но у её «младшего

брата» — ЕВ-РВФ — есть скрытые преимущества. Главное отличие — температура. В L-РВФ порошковый слой нагревается до 200–300°C, а в ЕВ-РВФ — до 800–900°C. Это как сравнивать прогрев кухонной

духовки и кузнечный горн. Высокая температура в ЕВ-РВФ снижает остаточные напряжения, а значит, детали не деформируются после печати и не требуют отжига. Но здесь есть нюанс: управлять микрострук-

турой при таких условиях сложнее. Именно поэтому учёные из Университета Линчёпинга (Швеция) решили проверить, как разные траектории луча влияют на сталь 316L.

Интересно, что сама технология EB-PBF зародилась ещё в 1990-х, но долгое время оставалась нишевой из-за сложности управления электронным лучом. Сегодня, с развитием программного обеспечения и систем контроля, она переживает второе рождение. Например, в аэрокосмической отрасли EB-PBF используют для печати турбинных лопаток, где важна жаропрочность и точность. А в медицине — для создания пористых имплантатов, которые лучше срастаются с

костной тканью.

Эксперимент: восемь стратегий, сотни образцов

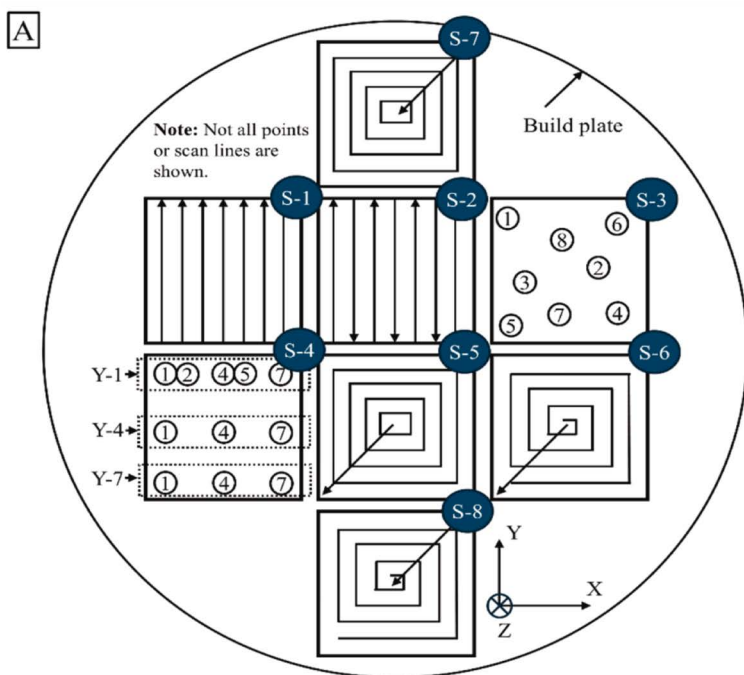
Исследователи взяли порошок 316L с частицами 53–106 мкм и напечатали на машине Freemelt One два типа образцов: кубоиды 15×15×20 мм (для изучения микроструктуры, стержни (для испытаний на растяжение).

В своей работе они исследовали восемь стратегий сканирования:

1. Однонаправленный растр — луч движется в одну сторону, как при классической 3D-печати.
2. Двухнаправленный растр — луч возвращается обратно, сокращая время печати.

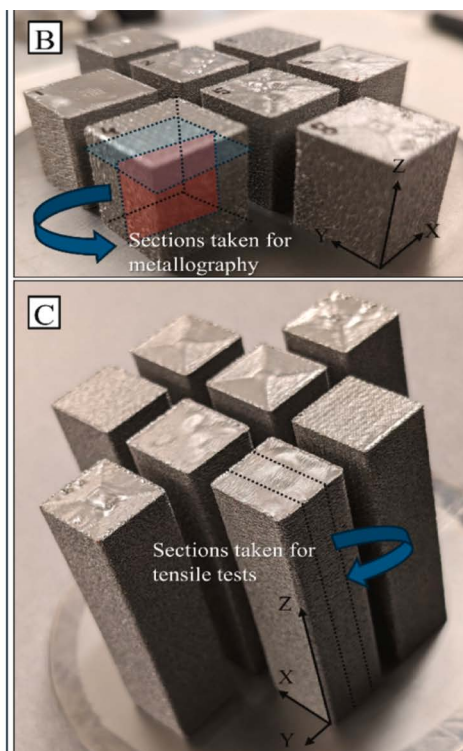
3. Случайное точечное плавление — луч хаотично прыгает по слою, создавая «пятна» расплава.
4. Упорядоченное точечное плавление — точки плавления расположены в шахматном порядке.
5. Концентрические и спиральные стратегии (с пятой по восьмую) — луч движется от центра к краю или наоборот, как штопор.

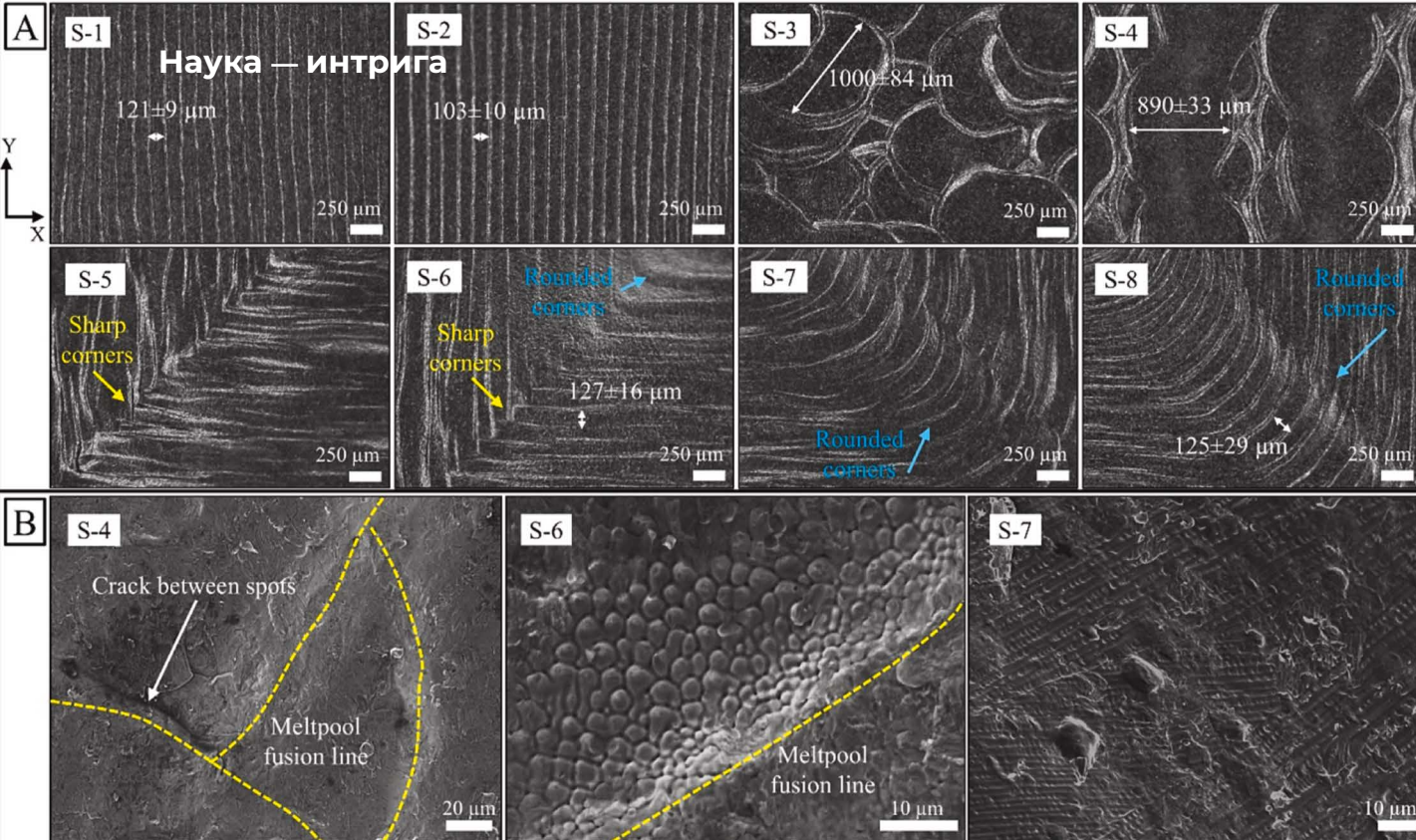
Почему были выбраны именно эти стратегии? «Мы хотели охватить максимально разные подходы: от классики до экспериментальных методов», — объясняет Пратвиш Тарафдер, ведущий автор исследования. — Например, спиральное сканирование редко используют в EB-PBF



S-1 Unidirectional raster; S-2 Bidirectional raster; S-3 Random spot; S-4 Ordered spot; S-5 Concentric outward; S-6 Spiral outward; S-7 Concentric inward; S-8 Spiral inward

Схематическое представление стратегий сканирования, используемых в исследовании (обратите внимание, что внутри S5-S8 стрелки показывают направление сканирования (a); кубоидная сборка (b); стержни на растяжение (c))





Оптические микрофотографии (ОМ) верхней поверхности для всех стратегий сканирования (А); изображение поверхности выбранных образцов, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM), демонстрирующее характерные особенности (В).

из-за сложности управления тепловыми потоками, но оно может дать уникальную микроструктуру».

После печати образцы разрезали, шлифовали и изучали под микроскопами. Учёные измеряли всё: от размера зёрен до плотности дислокаций. Но самые интересные открытия ждали их впереди.

Микроструктура: где рождаются трещины и растут зёрна

Если смотреть на сталь под микроскопом, при растровом сканировании вы увидите чёткие параллельные дорожки — следы движения луча. Ширина каждой — около 120 мкм, а внутри них — столбчатые зёрна,

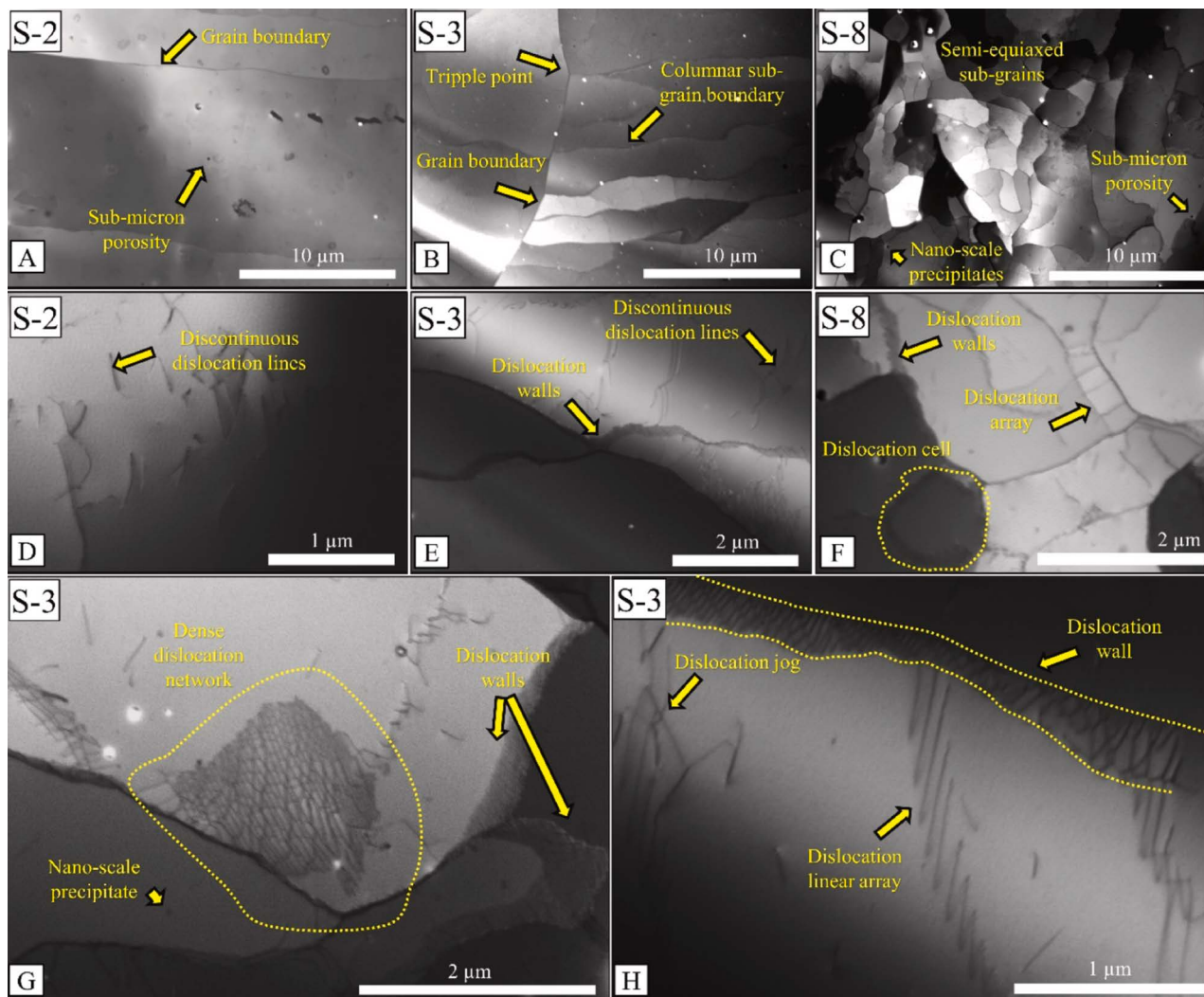
вытянутые вдоль направления печати. Это классика EB-PBF. Но стоит сменить стратегию, и картина меняется.

Точечное плавление создаёт округлые зоны диаметром до 1 мм. Из-за многократного переплава соседних точек здесь образуются мелкие зёрна (25 мкм), но есть и обратная сторона — трещины. «Они появляются на стыках точек, где состав расплава неоднороден, — поясняет Тарафдер. — Это как если бы вы пытались склеить два куска стекла с разным коэффициентом расширения».

Спиральные стратегии преподнесли сюрприз. В центре образцов, где луч начинает движение, зёрна получались округлыми, а на

периферии — вытянутыми. Всё дело в теплопередаче: в центре порошок хуже отводит тепло, поэтому расплав остывает медленнее. На краях же тепло уходит в уже затвердевший металл, создавая направленный рост зёрен.

Но самый неожиданный результат связан с дислокациями — дефектами кристаллической решётки, которые влияют на прочность. В L-PBF дислокации образуют плотные сети, как паутина. В EB-PBF их меньше, и расположены они хаотично. «Медленное охлаждение позволяет металлу «расслабиться», — комментирует Тарафдер. — Дислокации не успевают создавать жёсткие структуры».



Распределение дислокаций и наномасштабные осадки в двунаправленном растре (A, D), случайных точках (B, E, G, H) и спиральной внутренней (C, F) стратегиях сканирования при различных увеличениях

Механические свойства: прочнее стали, пластичнее алюминия

Все напечатанные образцы показали плотность выше 98%, а их механические свойства превзошли традиционную прокатную сталь 316L. Вот ключевые цифры:

- Предел текучести: 207–221 МПа (у прокатной стали — 170 МПа).
- Предел прочности: 470–487 МПа (сравнимо с литой сталью).
- Относительное удлинение: 67–79% (выше, чем у мно-

гих алюминиевых сплавов!).

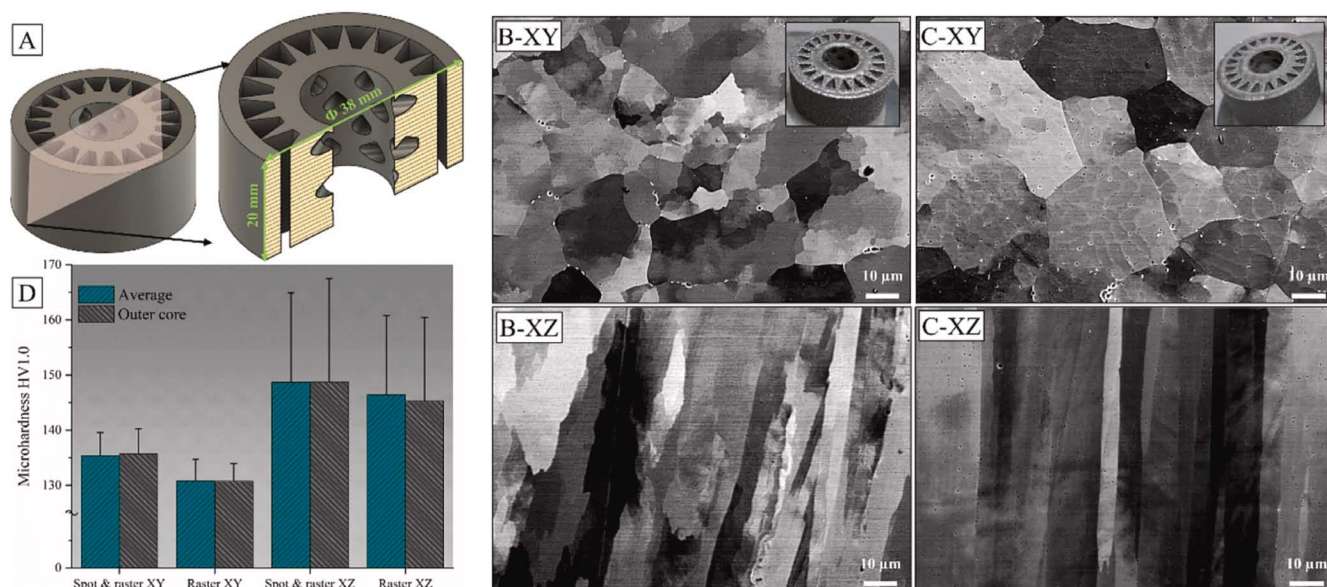
Но дьявол, как всегда, в деталях:

- Растровое сканирование дало крупные зёрна (45 мкм) и самую низкую твёрдость (160 HV), зато образцы хорошо растягивались.
- Точечное плавление с мелкими зёрнами (25 мкм) обеспечило твёрдость 180 HV, но из-за трещин образцы ломались раньше.
- Спиральные стратегии нашли баланс: смесь столбчатых и равноосных зёрен дала прочность 475 МПа и удлинение 77%.

Любопытно, что модуль Юнга (жесткость материала) оказался на 30% ниже, чем у традиционной стали — 112 ГПа против 160 ГПа. Виной всему — преимущественная ориентация зёрен вдоль направления печати. «Это как закрытая книга: вдоль корешка она жёсткая, а поперёк — гнётся», — приводит аналогию Тарафдер.

Промышленный кейс: песчаный фильтр с «умной» микроструктурой

Чтобы доказать практиче-



CAD-модель песчаного фильтра и вид в разрезе с основными размерами (A); микроструктура и общий вид построения для секций XY и XZ при стратегиях печати «точка + растр» и только «растр», соответственно (B-C); измерения микротвердости (D).

скую ценность метода, учёные напечатали уменьшенную модель песчаного фильтра для нефтегазовой отрасли. Внешний обод, который контактирует с абразивной средой, изготовили методом точечного плавления (для твёрдости), а внутреннюю часть — растровым сканированием (для пластичности). Результат? Твёрдость обода оказалась на 15% выше, чем у ядра. «Это как броня: снаружи — прочная скорлупа, внутри — вязкая сердцевина», — поясняет Тарафдер.

Но не всё прошло гладко. На стыке стратегий обнаружилось поры — следы неидеального перекрытия расплавленных зон. «Мы работаем над алгоритмами, которые автоматически подберут параметры для сложных геометрий», — делится планами команда.

Что дальше? Вызовы и перспективы

Исследование шведских учёных — важный шаг, но до массового внедрения EB-PBF ещё далеко. Вот главные вопросы, на которые предстоит ответить:

- Как избежать трещин в точечных стратегиях? Возможно, поможет предварительный нагрев порошка или изменение химического состава.

- Можно ли масштабировать процесс для крупных деталей? Пока что эксперименты проводились на небольших образцах. Печать метровых конструкций потребует пересмотра параметров.

- Как интегрировать EB-PBF в цифровые технологические процессы предприятия? Нужны программы, которые автоматически под-

берут стратегию сканирования под нагрузку на деталь.

«Мы стоим на пороге революции, — заключает Тарафдер. — Скоро инженеры смогут «программировать» микроструктуру стали так же легко, как программисты пишут код».

Исторический контекст: от кузнецов до цифровых кузниц

Интересно, что сама идея управления свойствами материала через его структуру не нова. Кузнецы древности эмпирически находили способы закалки и ковки, меняя прочность мечей. В XX веке металлурги научились контролировать размер зёрен с помощью термической обработки. Но EB-PBF выводит эту идею на новый уровень — здесь микроструктура «выращивается» слой за слоем,

как цифровая голограмма.

Экономика EB-PBF:

дорого, но перспективно

Сегодня стоимость EB-принтеров начинается от \$1 млн, что делает технологию доступной лишь для крупных компаний. Однако с развитием рынка и ростом конкуренции цены могут снизиться. Уже сейчас EB-PBF конкурирует с традиционным производством в нишевых областях. В медицине она применяется для печати индивидуальных имплантатов с пористой структурой. В аэрокосмической отрасли с ее помощью изготавливают лопатки турбин с внутренними каналами охлаждения. В энергетике по технологии EB-PBF печатают детали для реакторов, работающие в агрессивных средах.

«Через 5–10 лет EB-PBF

станет стандартом для сложных деталей малых серий», — прогнозирует Антон Виберг, эксперт по аддитивным технологиям.

Экологический аспект:

меньше отходов —

больше устойчивости

Традиционное производство металлических деталей часто сопровождается огромными отходами: до 80% материала уходит в стружку. EB-PBF, напротив, использует до 95% порошка повторно. Кроме того, высокая энергоэффективность электронного луча (КПД до 70%) снижает углеродный след.

«Это не просто технология будущего — это шаг к устойчивой промышленности», — подчёркивает Тарафдер.

Итак, EB-PBF больше не экзотическая технология для лабораторий. Это инструмент, который позволяет не просто печатать детали, а проектировать их свойства на атомном уровне. Выбор стратегии сканирования становится столь же важным, как выбор марки стали или типа термообработки. И кто знает — возможно, через десять лет в техзаданиях будет строка: «Стратегия сканирования: спираль от центра, шаг 0,2 мм». А пока остаётся восхищаться тем, как наука превращает металлический порошок в шедевры инженерной мысли. 

[Авторская адаптация](#)

Дмитрий Трубашевский

АП выходит

на новый уровень

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
сайтеПрочти
меня на
сайте

Технология без человека не живет

Главный вызов – в том, как масштабировать это понимание

Часть 1: Становление рынка и вызовы отрасли

В 2012 году российский рынок аддитивных технологий был практически пуст. Немногие компании, рискнувшие ступить на эту неизведанную стезю, обычно начинали с дилерских поставок оборудования для 3D-печати и изготовления сувенирных изделий. Основанная в 2008 году московская компания SIU System (АО «НПО СИСТЕМ») тоже стартовала в аддитивке с продаж, затем годами нарабатывала опыт создания аддитивных центров, проведения НИОКР, аддитивного инжиниринга и консалтинга, а также реализации уникальных проектов для ответственного машиностроения на базе собственного аддитивного центра. Сегодня АО «НПО Систем» — один из ключевых игроков, чьи решения используют в авиации, автопроме и даже космической отрасли. Как компании удалось превратить нишевую технологию в стратегический инструмент? Почему 80% её клиентов возвращаются с повторными заказами? И какие барьеры до сих пор мешают России стать лидером в этой сфере?

Ответы — в эксклюзивном интервью с командой АО «НПО Систем» (или SIU System), где обсуждаются не только успешные кейсы, но и стратегии, которые могут изменить будущее отечественного производства. Собеседники редакции – финансовый директор АО «НПО Систем» Наталья Михайлова, руководитель Центра Аддитивного Инжиниринга Дмитрий Филиппов и руководитель отдела продаж Елена Ефремова.

– Коллеги, опыт вашей компании и других лидеров отечественного рынка АП убедительно подтверждает и тенденцию к увеличению востребованности аддитивки в российской индустрии, и конкурентоспособность отечественных решений в этом сегменте. Но почему, на ваш взгляд, этот опыт всё же до сих пор очень туго масштабируется по всей стране и прежде всего на высокотехнологичных производствах? И как можно ускорить этот процесс?

Наталья Михайлова:

– Сегодня очень важно понимать предназначение каждого производственного метода, будь то аддитивные или тради-





Наталья Михайлова.
Фото: АО «НПО СИСТЕМ»

ционные технологии. И мы надеемся, что спор «А что же лучше?» остался в прошлом. Единственным верным ответом на этот вопрос будет производственная синергия, в которой, например, аддитивные технологии позволяют создавать высокосложные изделия, а завершить техпроцесс позволит уже классическая лезвийная механообработка. И вот, по нашим наблюдениям, на стадии этого синергетического процесса как раз и происходит основной сбой.

Грамотный, знающий о возможностях 3D-печати инженер должен разрабатывать КД с учетом оптимизированного, облегченного изделия, наделенного всеми атрибутами бионического дизайна. И вот здесь, на мой взгляд, возникает самая большая задержка в развитии сферы АП. Нам всем

нужно направить все усилия на то, чтобы так называемый аддитивный инжиниринг стал основополагающим в вопросах вузовского или дополнительного образования профильных специалистов.

Потому что делать малоответственные прототипы или сувениры, пусть даже достигая в этом высокого мастерства, – это неминуемый путь в забвение, потому как тренды приходят и уходят. Или же пытаться традиционную технологию заменить на аддитивную без соответствующего перепроектирования, – это вчерашний день, нам это понятно, и это должно быть понятно промышленникам.

– Вопрос, как убедить во всём этом и инженеров, и руководство промышленных предприятий.

Наталья Михайлова:

– Мы уже видим это понимание на некоторых предприятиях, где есть люди, настолько увлеченные своим делом, что они преодолевают традиционные конструкторские ограничения и выбирают новый путь. Когда такой подход приходит в конструкторские бюро, при осознанном использовании современных технологий — не только аддитивных, но и многих других, включая прорывы в материаловедении, — тогда возможна настоящая революция. И именно в этом направлении может произойти серьезный прорыв. Нам очень хотелось бы увидеть его в ближайшие год-два.

– А механизмы для этого уже есть? И как в них можно включиться? Например, организовать программы дополнительного профессионального образования (ДПО)? Вы говорите, что такие специали-

Нам всем нужно направить все усилия на то, чтобы так называемый аддитивный инжиниринг стал основополагающим в вопросах вузовского или дополнительного образования профильных специалистов.

Стратегия опережения требует принципиально иного подхода. Вместо того, чтобы догонять других, можно сосредоточиться на развитии перспективных отраслей, которые уже сегодня являются стратегически важными. Именно там нужно делать упреждающие шаги.

сты — штучные, так каким образом их собрать, познакомиться между собой, поддержать, обучить? Возможно, стоит привлекать ведущие вузы, чтобы они могли работать не по науку, а опираться на научную и технологическую базу.

Наталья Михайлова:

– История показывает: когда начинаешь отставать от рыночных конкурентов и кто-то из них вырывается вперед, неизбежно начинается лихорадочная гонка за восстановлением позиций. В таких условиях осознанная необходимость диктует жесткие решения — обстоятельства просто не оставляют выбора.

Однако стратегия опережения требует принципиально иного подхода. Вместо того, чтобы догонять других, можно сосредоточиться на развитии перспективных отраслей, которые уже сегодня являются стратегически важными. Именно там нужно делать упреждающие шаги.

Возьмем для примера судостроение или космическую отрасль — здесь

мы сохраняем лидерские позиции, причем уровень производства не снижается. Интересно, что именно в этих сферах аддитивные технологии приживаются быстрее всего. Возможно, их успешный опыт может стать драйвером для других направлений.

– У вас есть идеи, как изменить ситуацию?

Наталья Михайлова:

– Начнём с малого — с российского рынка. Первый шаг — преобразовывать пространство вокруг себя. Мы с командой методично движемся вперед, небольшими, но уверенными шагами, анализируя мировой и собственный опыт, но ориентируясь на российского потребителя. Приведу показательный исторический пример.

Цифровая 3D-печать существует уже 40 лет — срок более чем достаточный для глобального признания. Однако настоящий прорыв для массового сегмента произошёл лишь в 2012–2014 годах, когда истекли сроки защиты ключевых патентов компании Stratasys, включая патенты на экструдеры и си-

стемы позиционирования. С этого момента ежегодно стали появляться сотни компаний, предлагающие доступные FFF-принтеры. Но по-настоящему встряхнул рынок только выход в 2022 году продукции Bambu Lab — доступного домашнего помощника Bambu Lab X1 Carbon. Компания создала целую экосистему, предлагая невероятно простой, но эффективный инструмент для воплощения идей как для рядовых пользователей, так и для профессионалов. Примечательно, что даже промышленные конструкторы и владельцы 3D-ферм обратили внимание на продукцию китайской компании благодаря новому «золотому стандарту» в индустрии.

Где же была Stratasys все эти годы в профессиональном и потребительском сегменте? Компания десятилетиями работала исключительно для КБ и дизайн-студий, предлагая системы стоимостью в десятки тысяч долларов. Для промышленности цены достигали даже сотен тысяч. Завоевала ли она рынок

3D-печати? Лишь частично, закрепив за собой статус родоначальника FDM-технологии, но так и не сумев покорить массового потребителя, несмотря на попытки сделать это через своего дочернего производителя — пионера массовой 3D-печати MakerBot. Став жертвой корпоративной бюрократии и не сумев предложить надёжные решения по конкурентной цене, к 2020 году MakerBot проиграла гонку таким компаниям, как Bambu Lab, Creality, Anycubic и Prusa. А ведь массовый рынок исключительно перспективен — он способен поглощать десятки миллионов устройств 3D-печати ежегодно.

Почему лидерство должно принадлежать таким новаторам, как Bambu Lab? Потому что они делают технологии доступными, массовыми, простыми в использовании и надёжными, чётко обозначая их возможности и перспективы. По сути, Bambu Lab не изобрела ничего революционного — даже технологию FDM/FFF она позаимствовала у Stratasys, подтвердив известное вы-

сказывание Стива Джобса: «Хороший художник копирует, великий — ворует».

Представьте себе будущее, где школьники копят не на игровой компьютер, а на 3D-принтер — и не для бессмысленного времяпрепровождения, а для создания чего-то нового, и в процессе этих поисков и экспериментов они развивают воображение и навыки творца. Именно в этом мы видим свою миссию — стать проводниками в увлекательный и невероятно востребованный мир производственных инноваций.

Хочу также отметить важную роль государства, способного задавать нужные ориентиры. Достаточно вспомнить успешное внедрение цифровых платежей Сбера: за пять лет система, простая в обращении и понятная всем — от школьников до пенсионеров, стала одной из лучших в мире. Или беспилотники: за полтора года они кардинально изменили логистику на поле боя.

Аддитивные технологии уже сегодня могли бы трансформировать промышлен-

ность. Но для этого нужен новый подход — не конкуренция в узких нишах, а широкая коллаборация. Только так мы сможем добиться реальных изменений.

Сегодня на слуху тезис: для реальных изменений необходимо трансформировать само мышление людей, внедрить так называемое «аддитивное мировоззрение». Чтобы обычный инженер или конструктор на производстве интуитивно понимал, что традиционные подходы к проектированию, — например, система креплений или геометрия детали, — требуют принципиально иных решений.

Однако пока такое видение доступно лишь единицам — творческим новаторам, которые и обеспечивают локальные технологические прорывы. Главный вызов заключается в том, как масштабировать это понимание, сделать его массовым явлением.

– Полностью разделяю вашу позицию. Однако пассивное ожидание приведет лишь к консервации нашего отставания. Проведу аналогию с компьютерной

Аддитивные технологии уже сегодня могли бы трансформировать промышленность. Но для этого нужен новый подход — не конкуренция в узких нишах, а широкая коллаборация. Только так мы сможем добиться реальных изменений.

Интервью

индустрией: когда производители столкнулись с замедлением темпов обновления техники, они создали новые стимулы. С одной стороны – майнинг криптовалют, вызвавший ажиотажный спрос на видеокарты. С другой – революция в игровой индустрии, превратившая апгрейд ПК в постоянную потребность. Результат – многократный рост рынка.

Наталья Михайлова:

– Верно! Этот же принцип применим и к промышленным аддитивным технологиям, но с важной поправкой: ключевой аудиторией долж-

ны стать не частные потребители, а инженеры и промышленные руководители. Как их мотивировать? Здесь необходима системная государственная политика, включающая: раннюю профессиональную ориентацию (кружки 3D-моделирования со школьной скамьи), стимулирование предприятий через налоговые льготы за внедрение аддитивного производства, массовые образовательные программы для инженеров.

Рынок прошлого года, согласно исследованию КАТ, по самым скромным оцен-

кам составивший 15,5 млрд рублей, – это капля в море. Для сравнения: один только Сбер вложил в цифровизацию свыше 300 млрд. Парадокс в том, что чиновники, распределяющие бюджеты, ждут быстрых результатов, но не готовы создать условия для скачка. Это замкнутый круг, который можно разорвать только через комплексные институциональные изменения.

Нам нужен не эволюционный, а революционный сценарий. Вместо 1500 специалистов, о которых говорит Минпромторг, следу-



Инжиниринговый отдел – интеллектуальная гордость и сердце компании

Для реального прорыва необходимо системное продвижение аддитивных технологий и соответствующего мышления на всех уровнях – от школ до промышленных предприятий. Однако без активного участия государства такая трансформация невозможна.

ет вовлекать десятки тысяч предприятий. Без масштабных отраслевых форумов, государственных программ поддержки и изменения образовательных стандартов прорыв невозможен.

Для реального прорыва необходимо системное продвижение аддитивных технологий и соответствующего мышления на всех уровнях – от школ до промышленных предприятий. Однако без активного участия государства такая трансформация невозможна.

– Вы упомянули миссию компании – стать проводниками в мир производственных инноваций. И сами подаете пример погружения в этот мир. Имеется в виду в том числе ваша программная разработка и опыт использования нейросетей в бизнесе компании. Пожалуйста, расскажите подробнее, как это работает?

Дмитрий Филиппов:

– Что касается применения ИИ, мы используем его в двух основных направлениях. Во-первых, для автоматизации рутинных задач – в

этом нам помогает платформа Битрикс с её встроенными функциями. Битрикс в первую очередь анализирует звонки менеджеров по продажам. Аналитический модуль работает по заданному сценарию, но без жесткого требования следовать алгоритму буквально. Важно, чтобы менеджер, используя индивидуальный подход, спокойно и обстоятельно обсудил с клиентом все необходимые вопросы.

Через цифровую АТС искусственный интеллект обрабатывает содержание разговоров, сопоставляя их с установленными параметрами. В результате мы получаем полную текстовую расшифровку, оценку эффективности диалога и практические рекомендации по улучшению. Конечно, здесь мы не можем сказать, что участвовали в разработке этого программного обеспечения, но мы в определенном смысле произвели ее настройку под наши нужды, о чем смело можно говорить как о ноу-хау. Как видно из последнего отчета координатора, система демонстрирует четкую и понятную работу.

Наталья Михайлова:

– Тот же алгоритм успешно применяется для обработки записей совещаний, планерок и координационных встреч. Он обеспечивает не только текстовую расшифровку, но и детальный анализ реплик участников, выявление достигнутых договоренностей и автоматическое формирование задач для ответственных сотрудников. Достаточно использовать ключевые фразы, и система самостоятельно распределит задания, фактически взяв на себя функции секретаря.

Отдельно стоит отметить возможность общения с заказчиками. Мы ценим краткий и информативный стиль изложения. Когда поступает объемный неструктурированный текст, система за мгновение преобразует его в четкое, логичное изложение, что существенно экономит время.

Кроме того, искусственный интеллект помогает нашей креативной группе в подготовке к выставкам, таким как «Металлообработка» или «Росмолд», предлагая идеи для сувенирной

продукции и других маркетинговых материалов.

И второе использование ИИ состоит в оперативном расчете стоимости услуг.

– А как организован процесс расчета стоимости услуг? Какой точности удается достичь при сопоставлении расчетных и фактических показателей?

Наталья Михайлова:

– Мы разработали собственный алгоритм расчетов и выдачи рекомендаций. Эта система существенно помогает нам обрабатывать десятки поступающих ежедневно рутинных запросов. Что касается точности, результаты

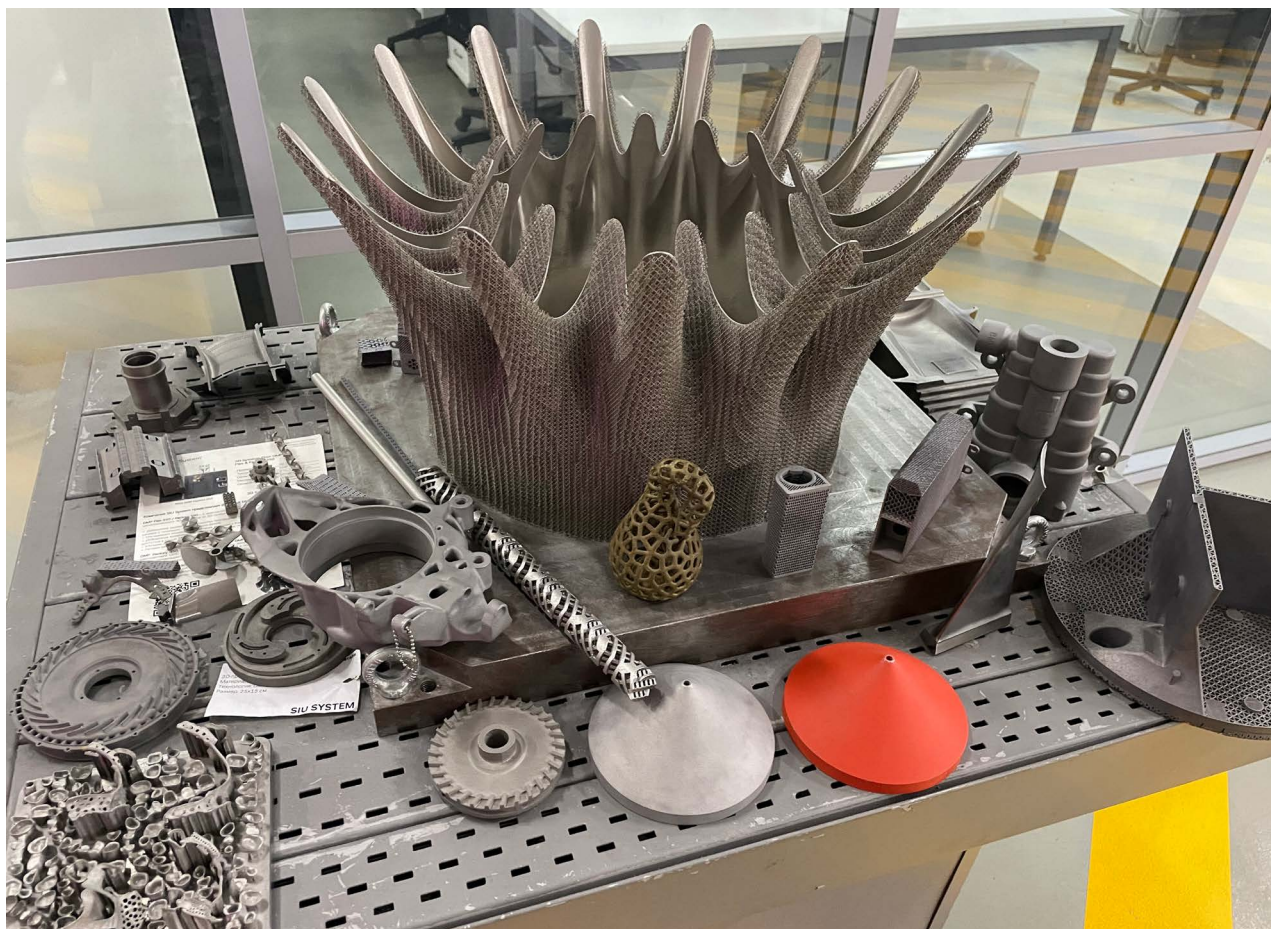
нас впечатляют: например, при расчетном времени изготовления изделий под заказ клиента в 176 часов фактическое время составило 178 часов, что находится в пределах допустимой погрешности. Сейчас мы формируем базу данных и будем осознанно переходить к оптимизации процессов. Скорость работы значительно возрастет. Быстрая реакция на запросы заказчика – один из наших текущих приоритетов. Также в планах – установка датчиков, автоматизация сбора данных.

– Эти датчики станут частью СМК? Вы ведь планируете внедрение этой си-

стемы на предприятии?

Дмитрий Филиппов:

– Мы действительно работаем над тем, чтобы получить ИСО ГОСТ Р 9001-2015. Именно для этого сейчас мы выполняем перепланировку производственного помещения. Второй этап – мы взяли обязательства по повышению производительности. Это совместный проект с Департаментом развития московской промышленности по внедрению принципов Бережливого производства. Они уже начали оказывать нам методическую поддержку.



Демонстрационные модели возможностей АТ и реальные детали, произведенные для российских предприятий

Часть 2: Практические кейсы и стратегии развития

Во второй части публикации руководитель центра инжиниринга АО «НПО «Систем» Дмитрий Филиппов и руководитель отдела продаж Елена Ефремова рассказывают о тонкостях работы с клиентами и о самых интересных кейсах компании, рассуждают о стратегиях, способных изменить будущее отечественного аддитивного производства.

– Чтобы объективно оценить достигнутое вашей компанией к настоящему моменту, давайте, что называется, обратимся к истокам. Правильно ли мы понимаем, что аддитивный центр создавался в ответ на рыночный спрос?

Дмитрий Филиппов:

– Да, это действительно так. Изначально НПО «Систем» занималась поставками лабораторного и периферийного оборудования. В 2012 году наши зарубежные партнеры увидели в работе 3D-принтер, печатающий по технологии FDM индивидуальные вставки для чехлов, где кастомизировать изделие можно было буквально за несколько минут. Это их вдохновило, и мы тоже обратили внимание на аддитивные технологии. Важно отметить, что тогда в России этот рынок был практически свободен. Именно эти факторы стали стимулом для нашего развития в этом направлении.

Вскоре стало ясно, что для роста спроса необходимо наглядно демонстрировать возможности оборудования. Так появился сначала шоурум, а затем и небольшая производственная площадка для демонстрации технологий. Кстати, наш аддитивный шоурум, открытый в 2013 году, был первым в России. В нем были представлены наиболее доступные на тот момент технологии – полимерная FDM и восковая MJR. Эти решения особенно заинтересовали ювелиров, которые получили возможность быстро изготавливать высококачественные заготовки



Дмитрий Филиппов.
Фото: АО «НПО СИСТЕМ»

для литья с недостижимыми ранее характеристиками.

К 2015-2016 годам к нам стали поступать запросы от стоматологов на печать заготовок для прозрачных элайнеров. Хотя у нас тогда были только профессиональные принтеры, а не промышленные, мы четко осознали необходимость перехода на более серьезное оборудование. Параллельно мы активно продвигали технологии выжигаемых моделей и металлической печати, демонстрируя образцы деталей из различных материалов. Проводили специализированные семинары для корпораций и крупных предприятий, популяризировали сетчатые структуры и топологически оптимизированные модели. Всё это способствовало формированию спроса и развитию рынка аддитивных технологий в России.

– Вы тогда работали по заказам клиентов или чаще поставляли оборудование, помогая с запуском и обучением?

Дмитрий Филиппов:

– Эти процессы шли параллельно. Конечно,

Современный продвинутый клиент уже точно знает, какой материал и технологию ему нужно использовать. Некоторые даже указывают особые требования к расположению детали при печати.

демонстрация возможностей в первую очередь служила увеличению продаж оборудования. Но прежде, чем купить принтер, клиенту нужно было оценить его рабочие характеристики. Так мы начали получать заказы на печать. Убедившись в эффективности технологии, клиент приобретал оборудование, а мы проводили пусконаладочные работы и обучали персонал. Позже этот опыт позволил нам развить полноценное инженеринговое направление, включающее доработку продукции, оптимизацию процессов и готовых изделий.

– Какие направления пользовались наибольшим спросом вначале?

Дмитрий Филиппов:

– Мы сразу развивали два направления. В 2017 году появился наш первый металлический принтер и первый промышленный SLA-принтер. С тех пор активно работаем с печатью сталью и алюминием. Титан пока не печатаем – в таких случаях обращаемся к партнерам. Второе направление – развитие инженеринговых услуг.

– Как менялись ваши клиенты и их запросы за эти годы? Насколько они сейчас понимают возможности аддитивного производства?

– Мы прошли путь от изготовления брелоков и ручек для холодильников до выполнения серьезных промышленных заказов. Современный продвинутый клиент уже точно знает, какой материал и технологию ему нужно использовать. Некоторые даже указывают особые требования к расположению детали при печати. Особенно радует, когда

к нам присылают чертежи с четкими указаниями аддитивной технологии, материала и вида постобработки. Это колоссальная разница по сравнению с тем, что было всего 8 лет назад.

– Это не может не радовать. Но много ли таких продвинутых клиентов в общей массе промышленных предприятий, где АП могло бы найти широкое применение? Что, на ваш взгляд, может способствовать активному пополнению их рядов?

Дмитрий Филиппов:

– Развитие действительно



Восковые изделия, напечатанные при помощи струйной печати MJP - хрупкие, но любимые литейщиками и ювелирами

идет медленно. Как верно отметила Наталья, основное препятствие – отсутствие нормативной базы, на которую могли бы опираться инженеры, будучи уверенными в надежности технологии. И здесь мне кажется единственно верным решением поддержка на высоком уровне от людей, которые смотрят не только на финансовые показатели, но и понимают стратегический потенциал этих технологий.

– То есть требуется кардинальное решение сверху?

Дмитрий Филиппов:

– Совершенно верно. Более того, в некоторых случаях мы уже видим результат такого подхода – когда на вопрос «почему выбрали 3D-печать» клиенты отвечают, что получили указание «сверху» попробовать аддитивные технологии. Обычно это касается госкорпораций или компаний, выполняющих гособоронзаказ.

– Много ли сейчас заказов на создание собственных участков 3D-печати под ключ?

Дмитрий Филиппов:

– Такие проекты есть, но их пока немного. У нас в разработке несколько подобных решений, где клиенты действительно хотят создать полноценные ад-

дитивные участки.

– Что, на ваш взгляд, выгоднее для компаний – пользоваться услугами или создавать собственное производство?

Дмитрий Филиппов:

– Здесь нет универсального ответа. Нужно анализировать конкретную задачу: объемы, сложность, периодичность выпуска, используемые материалы, требования к складированию. Для учебных заведений, например, окупаемость оборудования не главное – их цель подготовка кадров. Наш подход – сначала дать клиенту попробовать: мы оперативно печатаем образцы в нашем ЦАТ, чтобы клиент мог оценить результат.

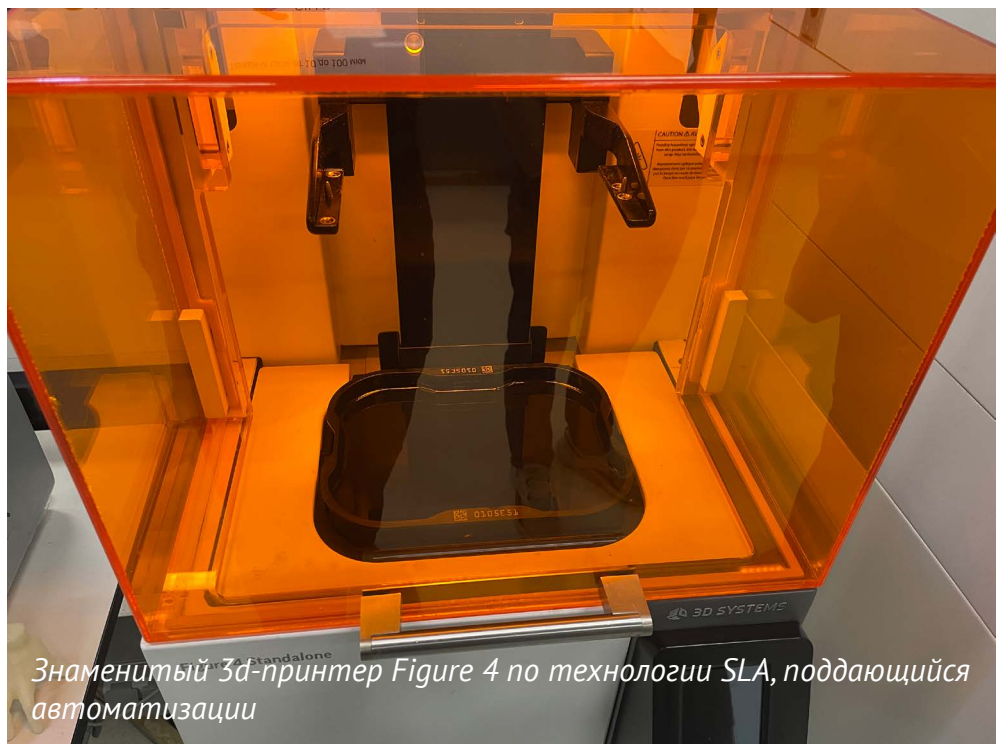
Для разовых малых серий выгоднее заказывать услуги. Но для предприятий с постоянной номенклатурой

или ремонтными потребностями, особенно в ОПК и у исполнителей ГОЗ, собственные участки 3D-печати – это возможность оперативно производить детали из цифровой библиотеки, минуя очередь у подрядчиков. Каждый случай требует индивидуального анализа.

– Как вы выявляете скрытые потребности клиентов, например, при реверс-инжиниринге? Можете привести примеры кейсов?

Дмитрий Филиппов:

– Наша работа начинается с анализа ремонтных участков, где изготавливают запчасти. Мы изучаем номенклатуру, состав узлов и предлагаем решения: агрегацию нескольких деталей в одну, топологическую оптимизацию для снижения веса или адаптацию деталей под аддитивное произ-



Знаменитый 3d-принтер Figure 4 по технологии SLA, поддающийся автоматизации



Участок фотополимерной печати

водство для штучного выпуска.

Еще один подход – анализ мелкосерийной продукции (до 100 единиц), где 3D-печать может ускорить производство.

Конкретный пример: клиент производил установки для забора проб воздуха из канализационных труб. Ключевой элемент – специальная колба сложной формы, состоящая из двух спаянных частей с внутренней перемычкой. Традиционно для её изготовления требовалась пресс-форма.

Мы предложили агрегированное изделие. Первые образцы не выдержали нагрузок. После анализа поломок конструкторы усилили соединение со шлангом. Новые тесты показали, что колбы ломаются в других местах из-за грубого обращения. Добавили рёбра жёсткости

и укрепили стенки – третья партия успешно прошла испытания. Теперь клиент заказывает эти расходники у нас вместо китайских поставщиков.

Этот кейс показал, как последовательная доработка и тестирование позволяют создать оптимальное аддитивное решение, превосходящее традиционные методы по экономичности и качеству.

– То есть ваши колбы оказались дешевле оригинальных?

Дмитрий Филиппов:

– Они вышли чуть дороже, но клиент получил значительные преимущества в логистике и долговечности изделий.

– Это действительно показательный пример. Сегодня подобные кейсы востребованы в самых разных отраслях промышленно-

сти. Однако не все руководители предприятий в полной мере представляют, как можно применить аддитивные технологии для решения своих производственных задач. Могли бы вы привести еще несколько конкретных примеров таких решений?

– Один из показательных примеров – сотрудничество с компанией по переработке ABS-пластиков. Они использовали итальянские насосы с металлическими рабочими колесами, которые изнашивались за три месяца. Новые детали приходилось заказывать в Италии за 12,5 тысяч рублей с месячным сроком поставки. Мы разработали решение из полиамида: стоимость 7,5 тысяч рублей, срок поставки 3-5 дней, вес снизился в 4 раза, а срок службы увеличился до 9 месяцев. Понача-

Хотя чисто аддитивные решения имеют право на существование, наибольший эффект достигается при их комбинации с традиционными методами.

лу клиента пришлось долго убеждать в целесообразности замены металлических колес полиамидными. Однако после успешных испытаний компания уже вскоре полностью перешла на наши изделия.

Еще одним вызовом стал для нас заказ для авиационного двигателестроения. Изначально нам дали полгода на изготовление трех комплектов крупногабаритных деталей для литья, но затем срок сократили до трех месяцев. Мы оперативно пересмотрели подход: разбили модели на части, напечатали все за месяц, провели сборку на площадке заказчика с точностью ± 1 мм на диаметре 1,5 метра и обучили персонал. Это был серьезный вызов, который мы успешно преодолели.

И еще пример: модернизация форсунок гидросби-ва. Благодаря аддитивным технологиям мы сократили количество деталей с семи до трех. В каждом проекте мы тщательно анализируем условия эксплуатации и подбираем оптимальное решение по материалам, технологиям и конструкции. Главное – точно понять потребности клиента и предложить максимально эффек-

тивное решение.

– Что чаще доводится внедрять: сугубо аддитивные проекты или комплексные с рядом различных технологий «под ключ»?

Дмитрий Филиппов:

– Хотя чисто аддитивные решения имеют право на существование, наибольший эффект достигается при их комбинации с традиционными методами. Например, в металлообработке: аддитивные технологии создают сложные заготовки с минимальными припусками, которые затем дорабатываются на токарно-фрезерных или фрезерных станках с ЧПУ. Именно такой комплексный

подход дает наилучший результат.

– Какие задачи вы помогаете решать клиентам?

Дмитрий Филиппов:

– Спектр задач значительно расширился. Если раньше это были преимущественно штучные изделия и мелкие серии, то сейчас мы производим средние серии для конструкторских бюро – корпуса, крышки, держатели, защитные элементы для электронных блоков управления. В металлообработке чаще работаем с автомобильной промышленностью, полиамиды по технологии SLS востребованы в приборостроении, а SLA-технологии – в литей-



ном производстве пластиковых изделий.

– Какие изделия вы печатаете для автопрома?

Дмитрий Филиппов:

– Для автомобильной промышленности мы изготавливаем различные компоненты – точнее, заготовки для автозапчастей. В частности, печатаем сложные детали торпедо: держатели и направляющие проводов со встроенными креплениями для датчиков. Эти изделия заказывают серийно, примерно раз в квартал. Также производим элементы интерьера для премиальных российских автомобилей, где базовые детали создаются аддитивным способом. Используем как металлическую SLM-печать, так и полиамидную SLS. Еще одно направление – изготовление мастер-моделей для последующего тиражирования.

– Насколько часто клиенты возвращаются к вам с повторными заказами?

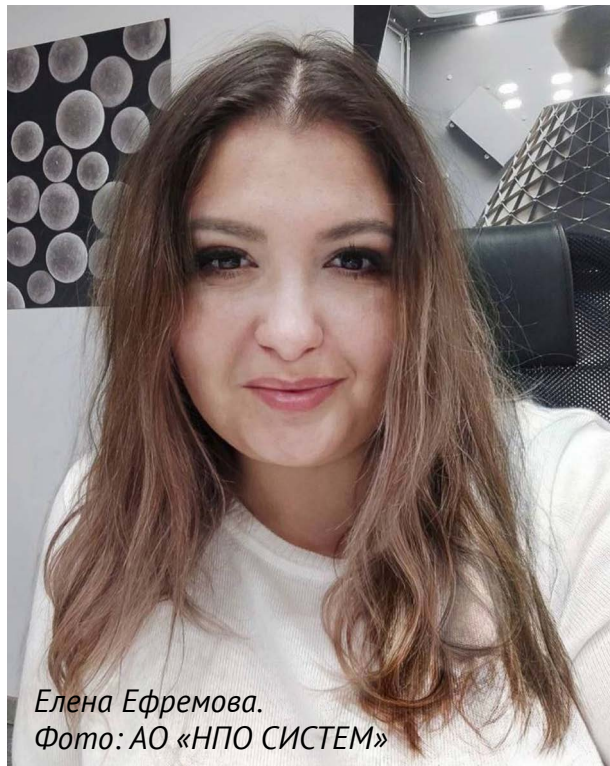
Елена Ефремова:

– По нашим данным, около 80% заказов – это повторные обращения. Для нас это важный показатель: он подтверждает, что мы правильно понимаем потребности клиентов и качественно выполняем работу. Для заказчиков же удобно работать с проверенным поставщиком по принципу «одного окна».

– Расскажите о сотрудничестве с Московским инвестиционным кластером.

Дмитрий Филиппов:

– Наша компания является резидентом кластера. Это дает нам возможность получать субсидии из городского бюджета, чем мы периодически пользуемся. Кроме того, кластер включает фабрику прототипирования – площадку для взаимодействия между заказчиками и производителями. Для нас это дополнительный канал привлечения новых проектов.



Елена Ефремова.
Фото: АО «НПО СИСТЕМ»

– Как показывает мировой опыт, самые прорывные, революционные решения – это сегодня обычно результат коллабораций, в том числе кросстехнологических и межотраслевых. Как вы выстраиваете сотрудничество с другими компаниями и научными институтами?

Елена Ефремова:

– Наш подход всегда начинается с потребностей клиента. Для нас ключевое значение имеет конечный результат. Когда перед нами стоит задача добиться полного соответствия изделия стандартам или даже превзойти существующие параметры, мы тщательно анализируем, каким способом лучше реализовать проект. В зависимости от ситуации мы прибегаем к сотрудничеству с профильными предприятиями – лидерами в разработке и производстве материалов, их стандартизации.

В таких случаях обычно требуется углубленное изучение и тестирование деталей, особенно когда речь идет о замене традиционных технологий аддитивным производством. Для этих целей мы активно взаимодействуем с ведущими техническими



Инжиниринговый отдел. Фото: АО «НПО «Систем»

вузами, прежде всего с МИ-СиС и МГТУ им. Баумана.

– А собственный персонал как обучаете и поддерживаете в нужной творческой форме?

Елена Ефремова:

– Для сервисных служб мы регулярно организуем обучение у производителей оборудования – это позволяет им решать сложные задачи и профессионально развиваться. Что касается производственных специалистов, то мы по праву ими гордимся. Благодаря разнообразным заказам, в том числе на сложные и нестандартные проекты, которые другие компании часто отказываются брать, наши сотрудники накопили уникальный практический опыт. Мы сознательно беремся даже за экономически не самые выгодные, но показательные заказы – это инвестиции в репутацию и привлечение

новых клиентов.

Наша коммерческая команда состоит преимущественно из молодых специалистов, многие пришли из IT-сферы. Их креативность и нестандартное мышление помогают находить новые решения. Внутри компании мы организовали систему обучения – от базовых знаний до бизнес-игр и дискуссий. При этом стараемся не замыкаться на внутреннем опыте, изучая практики российских и зарубежных коллег.

Мы также участвуем в совместных образовательных проектах с вузами и промышленными предприятиями, включая компании госкорпораций. Многие из них, имея современное аддитивное оборудование, сталкиваются с острой нехваткой квалифицированных кадров.

– И как, на ваш взгляд, надо решать проблему этого дефицита?

Елена Ефремова:

– Сделать сложные технологии доступными – задача непростая. Важно начинать знакомство с аддитивными технологиями еще в школе, чтобы формировать соответствующее мышление с раннего возраста. Но главное – не ждать, когда проблема станет критической, а заранее создавать систему подготовки кадров, расширяя образовательные возможности. Мы видим решение в комплексном подходе: сочетании академического образования, практического обучения и популяризации технологий среди молодежи.

– Пока что отечественная аддитивка – в положении догоняющей. При этом сегодня важно не просто замещать импорт, но и опережать его, что требует свежих технологических и конструкторских решений. Хотя у нас есть доступ к ми-

ровому опыту в аддитивных технологиях, включая ошибки первопроходцев, для реального прогресса необходима консолидация усилий. К сожалению, многие игроки нашего пока еще небольшого рынка предпочитают работать изолированно, что серьезно замедляет развитие отрасли. Как вы считаете, можно ли преодолеть эту ситуацию в ближайшее время?

Елена Ефремова:

– Чтобы ответить на этот вопрос, нужно понять, почему вообще произошел бум аддитивных технологий в России. По моим наблюдениям и подтвержденным исследованиям, основной рост пришелся на металлическую печать. Кто же наши основные заказчики?

Фактически, аддитивные технологии у нас стали развиваться вынужденно, как реакция на кризисную ситуацию. Пока мы решаем текущие проблемы, у нас просто нет ресурсов для стратегического развития.

Если бы появились экономические условия или поддержка на государственном уровне с установкой: «Давайте посмотрим, что можно вырастить из этого семени аддитивных технологий», ситуация была бы иной. Сейчас же развитие ограничено теми рамками, которые задали первоначальный импульс.

Кроме того, сохраняется значительный скептицизм и предубеждения против аддитивных технологий. Я убеждена, что корень и проблем, и достижений – в людях. Когда мы приходим на предприя-

тия, то видим, что средний возраст инженеров превышает 40 лет. Это означает необходимость серьезной работы по преодолению психологических барьеров перед новыми технологиями. Дальше мы переходим на уровень предприятия в целом, чтобы решить вопрос внедрения технологии. Следующий этап – адаптация конструкторской документации.

– Кстати, о документации. Проблема стандартов – еще одна хроническая болезнь нашей аддитивной отрасли. Как вы с ней справляетесь?

Елена Ефремова:

– Есть институты и заводы, которые помогают в вопросах стандартизации. Например, один завод, с которым мы сотрудничаем, может не иметь такой теоретической базы, как, например, ЦИАН с его столетней историей, но зато он более гибкий и ориентирован на практику. Когда есть конкретные, подтвержденные практикой результаты и достижимые параметры – значит, проблема решается. Главное – двигаться от практических достижений к системным решениям.



Беседовали:

**Светлана Бакарджиева
Дмитрий Трубащевский**



Фокус компаний сосредоточен на требовательных к качеству отраслях промышленности



Прочти
меня на
сайте

Сканируя прошлое, создавая будущее

Как scan-to-CAD с ИИ меняет правила игры в цифровом проектировании

В мире, где границы между физическим и цифровым миром становятся всё более размытыми, технологии реверс-инжиниринга и 3D-сканирования занимают центральное место в арсенале инженеров, архитекторов и дизайнеров. Но если раньше процесс превращения 3D-сканов в готовые CAD-модели требовал недель кропотливой работы, сегодня он сокращается до нескольких минут благодаря scan-to-CAD. Этот инструмент не просто ускоряет процесс — он переосмысливает сам подход к проектированию, делая его доступным, быстрым и интуитивно понятным.

Как известно, 3D-сканирование — это создание «цифрового слепка» объекта, однако результат этой операции далек от идеала.

Облака точек, полученные с помощью сканеров, часто содержат шумы, дефекты и неточности. Превратить их в чистую, геометрически точную CAD-модель — задача, которая раньше требовала не только времени, но и глубоких знаний в области проектирования.

Scan-to-CAD — это процесс преобразования трехмерных сканов физических объектов в редактируемые CAD-модели, готовые для дальнейшего проектирования и производства. Этот метод обратного инжиниринга позволяет быстро и точно создавать цифровые 3D-модели существующих деталей или объектов. До недавнего времени процесс scan-to-CAD требовал практически полного вовлечения специалиста или специалистов, ответственных как

за 3D-сканирование, обработку данных с оптимизацией и очисткой полученного облака точек, так и за ручное создание CAD-моделей.

Проект Backflip.ai пошел дальше, а его основатели решили переосмыслить scan-to-CAD и добавить всё возрастающую мощь нейросетей для автоматической обработки данных. Система не просто «чистит» скан — она анализирует его структуру, распознает геометрические формы (плоскости, цилиндры, конусы) и преобразует хаотичное облако точек в логичную, редактируемую модель. Это, как если бы вы дали художнику эскиз, а он превратил его в законченное произведение искусства, сохранив при этом все детали и пропорции.

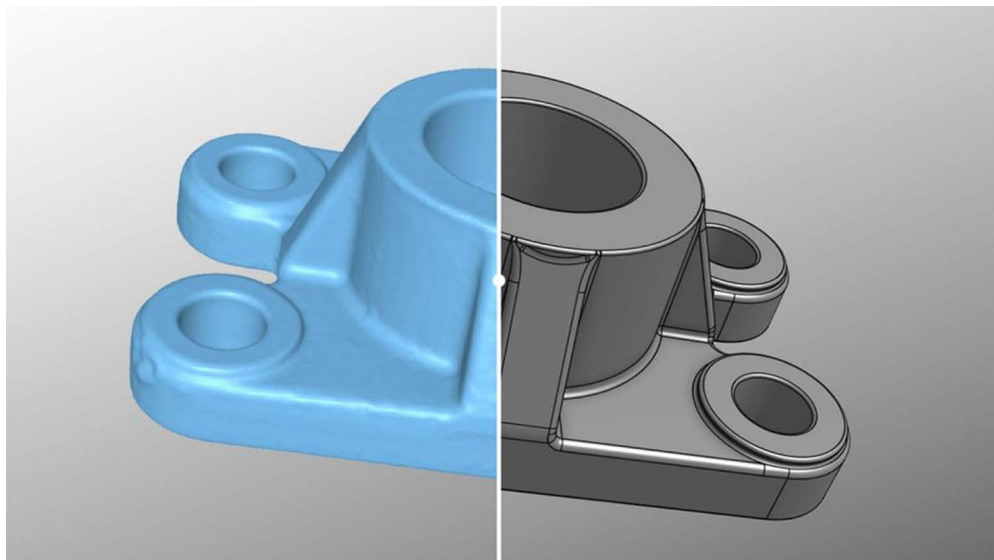
Backflip.ai — это результат многолетнего опыта и инно-

ваний. Его основатель Грег Марк известен как создатель компании Markforged, которая произвела революцию в мире 3D-печати. После успеха Markforged Марк и его команда не остановились на достигнутом. Они обратили внимание на проблему, с которой сталкиваются тысячи производственных компаний: отсутствие CAD-моделей для устаревших или поврежденных деталей.

«Мы поняли, что многие производства простаивают из-за отсутствия чертежей, — рассказывает Марк. — Даже наши 3D-принтеры не могли помочь, потому что у клиентов просто не было моделей для печати. Именно тогда мы задумались о создании инструмента, который мог бы превращать сканы в CAD-файлы за считанные минуты».

В итоге появился Backflip.ai — не просто инструмент для преобразования сканов, а интеллектуальная система, которая понимает, как устроены объекты, и воссоздает их с учетом производственных стандартов. Например, если вы сканируете деталь с фасками или резьбой, ИИ автоматически добавляет эти элементы в модель, как это сделал бы опытный инженер, — в самом конце процесса проектирования.

Один из ключевых моментов — интеграция с



Скан и CAD-модель (Источник: Backflip)

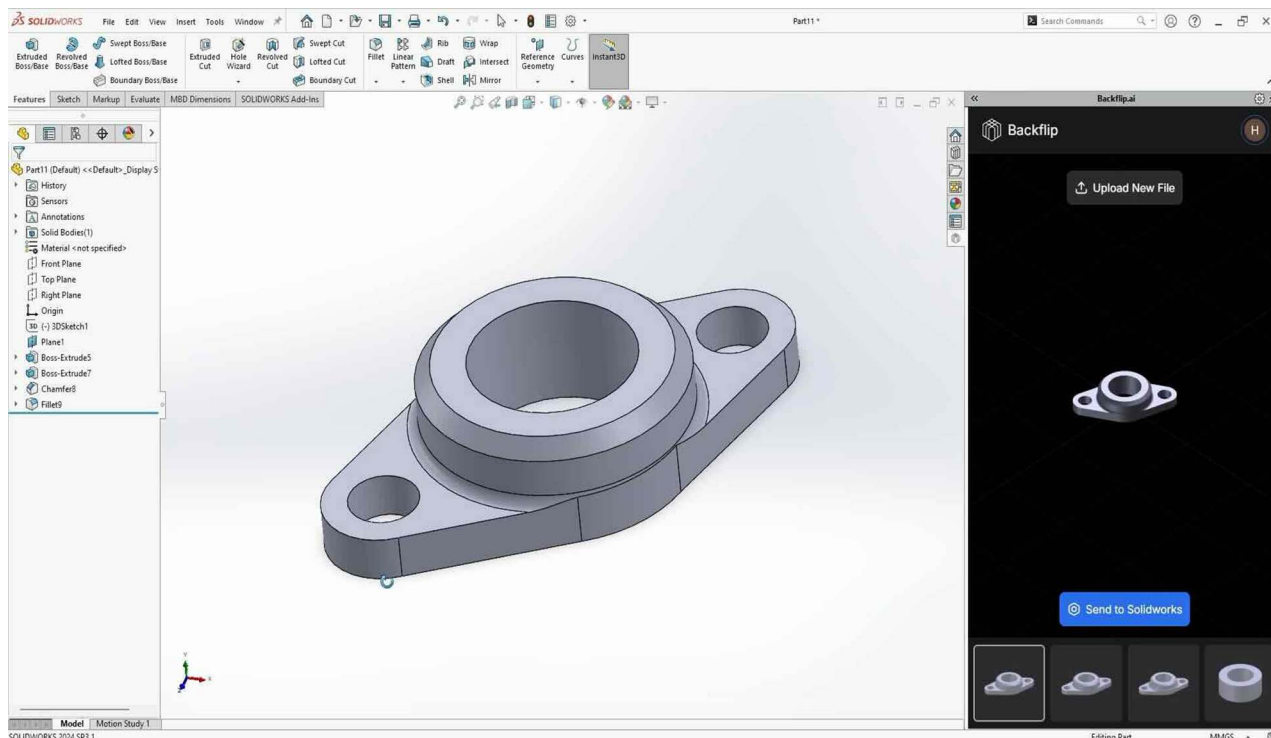
Solidworks. Плагин Backflip позволяет загрузить скан в облако, где ИИ анализирует его и генерирует CAD-модель всего за 30–60 секунд. Результат — готовый файл, который можно редактировать, масштабировать или отправлять на печать.

Функционал Backflip.ai не ограничивается решением задач крупных производственных компаний. Он может быть полезен инженерам, которые работают с устаревшим оборудованием и нуждаются в быстром восстановлении деталей. Архитекторам, стремящимся сохранить исторический облик зданий, при этом адаптировав их под современные стандарты. Дизайнерам, которые черпают вдохновение в реальных объектах и хотят быстро перенести их в цифровую среду. И даже энтузиастам с их хобби-проектами и интересом к экспериментированию с 3D-моделированием.

Таким образом, Backflip.ai — это не просто инструмент или технология, а новый подход к проектированию. Он не заменяет человека, а становится его помощником, освобождая время для творчества и инноваций. Вместо того, чтобы тратить часы на рутинные задачи, инженеры и дизайнеры могут сосредоточиться на создании новых продуктов, экспериментировании с материалами и оптимизации процессов.

«Мы не хотим, чтобы люди боялись технологий, — говорит Марк. — Мы хотим, чтобы они использовали их как инструмент для реализации своих идей. Backflip.ai — это шаг к будущему, где каждый может превратить свои замыслы в реальность».

Backflip.ai — это еще и новый способ мышления. Он стирает границы между физическим и цифровым миром, делая проектирование доступным, быстрым и ин-



Интеграция Backflip в Solidworks (Источник: Backflip)

туитивно понятным. В мире, где время — это самый ценный ресурс, Backflip.ai становится инструментом, обеспечивающим стратегическое преимущество.

Основатели Backflip, Грег Марк и Дэвид Бенхаим, продемонстрировали работу своего продукта на конференции 3DExperience World 2025 в Хьюстоне. Кроме того, на той же конференции Solidworks анонсировал разработку аналогичной функции преобразования сеток (mesh) в параметрические модели, хотя подробности и сроки реализации проекта пока не раскрываются.

Важно отметить, что использование ИИ в решениях scan-to-CAD становится все более распространенным трендом, особенно для автоматизации процессов распознавания объектов,

улучшения точности моделей и оптимизации рабочих процессов. Однако не все компании открыто заявляют об использовании ИИ в своих продуктах.

И если вы всё еще сомневаетесь, спросите себя: когда вы в последний раз сталкивались с задачей, которая казалась невыполнимой из-за отсутствия чертежей или моделей? С Backflip.ai такие задачи становятся не только выполнимыми, но и простыми. Будущее проектирования уже здесь — и оно начинается с первого скана.

Интересно, смогут ли российские стартапы предложить что-то подобное? Ведь сама идея не кажется чем-то недостижимым, но при этом таит в себе огромный потенциал. Быстрая и беспроblemная оцифровка объектов — это то, что может

изменить правила игры, сократив зависимость от узких специалистов. Возможно, в ближайшем будущем профессия инженера трансформируется, став более рутинной и управляемой алгоритмами. Это заставляет задуматься о том, как занять свое место в новой эпохе, где нейросети становятся неотъемлемой частью процесса. Время действовать — пока другие только размышляют.



Источники:

engineering.com

backflip.ai

fabbaloo.com

Дмитрий Трубашевский



Прочти
меня на
сайте

WAAM с переменной высотой слоев

Когда речь заходит о конкурентных преимуществах аддитивного производства перед субтрактивным, чаще всего упоминается возможность создавать с его помощью детали недостижимо сложной для традиционных методов геометрии. Вопрос лишь в выборе оптимальной аддитивной технологии под конкретную задачу. Рассмотрим в этом плане Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) — аддитивное производство с использованием дуговой сварки. Этот метод выгодно отличается высокая скорость наплавки и возможность создавать крупногабаритные металлические детали. Но вот насколько успешно WAAM справляется с задачей создания сложных геометрий, например, нависающих элементов? И как ее лучше приспособить для этой цели? Этой теме посвящено исследование, о котором мы рассказываем в этой статье.

Чем сильна WAAM?

WAAM — это технология, которая использует дуговую сварку для послойного нанесения металла. В отличие от других методов аддитивного производства, например, селективного лазерного плавления (L-PBF/SLM) или электронно-лучевой плавки (E-PBF/EBM), WAAM позволяет ра-

ботать с большими объемами металлов и сплавов и высокой скоростью. Это делает её идеальным инструментом для создания крупных деталей – корпусов судов, элементов авиационных конструкций или даже частей мостов.

Однако, когда дело доходит до сложных геометрий, особенно тех, где есть нависающие элементы, WAAM сталкивается с проблемами. Традиционно такие элементы требуют поддержек, которые потом нужно удалять, что добавляет ряд сложностей и трудозатрат. В случае с металлами это особенно проблематично, так как удаление поддержек может быть крайне трудоемким процессом.

Однако, когда дело доходит до сложных геометрий, особенно тех, где есть нависающие элементы, WAAM сталкивается с проблемами. Традиционно такие элементы требуют поддержек, которые потом нужно удалять, что добавляет ряд сложностей и трудозатрат. В случае с металлами это особенно проблематично, так как удаление поддержек может быть крайне трудоемким процессом.



Альтернативный подход — использование переменной высоты слоев. Вместо печати каждого слоя с одинаковой высотой, можно варьировать высоту слоев, чтобы постепенно формировать нависающие элементы. Это позволяет избежать потребности в поддержках и создавать более гладкие поверхности.

Проблема нависающих элементов

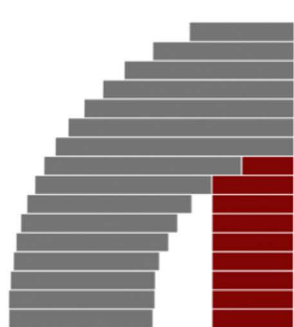
Представьте себе изогнутую трубу. Если вы попытаетесь напечатать ее слой за слоем, то в какой-то момент столкнетесь с тем, что верхние слои будут «нависать» над пустотой. В пластиковом аддитивном производстве эту проблему часто решают с помощью дополнительных структур, поддерживающих нависающие элементы. Но в случае с металлами это не всегда удобно. Поддержки

сложно удалять, и они могут повредить поверхность детали.

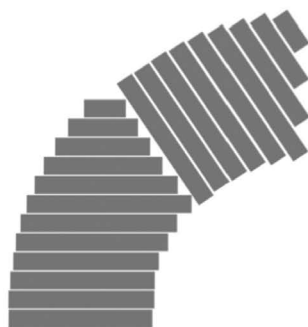
Один из подходов, который используется в WAAM, — это геометрическая декомпозиция. Идея в том, чтобы разделить деталь на несколько частей, которые можно напечатать отдельно, а затем сварить вместе. Однако этот метод имеет свои недостатки: сварные швы могут быть неровными, и потребуется дополнительная обработка для достижения нужной геометрии.

Переменная высота слоев: новый подход

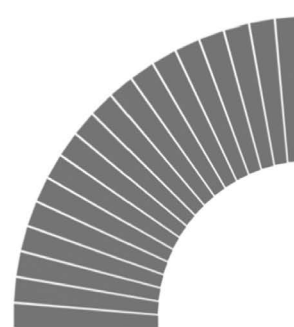
Авторы исследования этой проблемы предлагают альтернативный подход — использование переменной высоты слоев. Вместо печати каждого слоя с одинаковой высотой, можно варьировать высоту слоев, чтобы постепенно формировать нависающие элементы. Это позволяет избежать потребности в поддержках и создавать более гладкие поверхности.



(a)



(b)



(c)

Рис. Методы разделения на слои для изогнутой трубы с использованием опорных структур (a), геометрической декомпозиции (b) и слоев с переменной высотой (c)

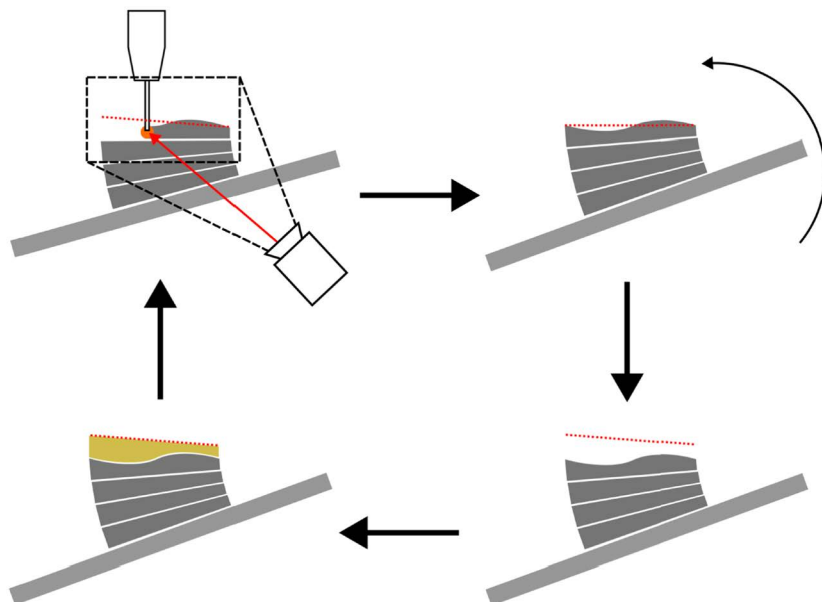


Рис. Визуализация процесса переменной высоты слоев

Итак, вы печатаете изогнутую трубу. Если вы начнете с более толстых слоев внизу и постепенно уменьшите высоту слоев по мере продвижения вверх, вы сможете создать изгиб без необходимости в дополнительных структурах. Этот метод уже был успешно применен для стали, но с алюминием все оказалось сложнее.

Почему алюминий — это сложно?

Алюминий — это материал, работа с которым значительно зависит от температуры. Когда вы наносите слой за слоем, тепло от предыдущих слоев влияет на геометрию нового слоя (фактор высокой теплопроводности). Это приводит к тому, что высота наплавленного материала может ощутимо варьироваться в разных частях детали. В результате, если использовать предварительно рассчитан-

ные профили скорости печати, как это делается для стали, можно получить деталь, которая сильно отличается от запланированной.

Именно эту проблему и решает данное исследование. Авторы предлагают использовать замкнутую систему управления, корректирующую высоту наплавленного материала в реальном времени. Для этого используется инфракрасная камера, которая отслеживает высоту каждого слоя и вносит коррективы в скорость движения робота.

Как это работает?

Давайте углубимся в детали процесса. В WAAM ключевой элемент — горелка, которая перемещается по заданной траектории, наплавливая металл слой за слоем. Скорость движения горелки и скорость подачи проволоки — это два основных параметра, влияющие на форму

и размер наплавленного материала. Если скорость движения горелки слишком высока, слой будет тонким, а если слишком низка — толстым. Однако, как уже упоминалось, в случае с алюминием эти параметры могут меняться в зависимости от температуры детали.

Для того чтобы учесть это, авторы разработали систему с использованием инфракрасной камеры для измерения высоты каждого слоя (второй робот). Камера установлена на отдельном роботе, который синхронизирован с роботом с горелкой. Это позволяет системе в реальном времени отслеживать отклонения от заданной геометрии и вносить коррективы, компенсируя ошибки.

Для этого сначала создается модель, которая связывает скорость движения горелки с высотой наплавленного материала. Эта модель учитывает такие параметры, как скорость подачи проволоки и температура. Однако, как уже упоминалось, температура алюминия может сильно варьироваться, что делает модель менее точной. Чтобы учесть это, авторы предлагают использовать две модели: «холодную» и «горячую». Первая модель задействуется в начале процесса, когда деталь еще не нагрелась, а вторая — после того, как деталь достигла стабильной температуры.

Перед тем как приступить к печати, необходимо провести калибровку системы. Для этого авторы провели серию экспериментов, в ходе которых измеряли высоту наплавленного материала при различных скоростях движения горелки. На основе этих данных была построена модель, связывающая скорость горелки с высотой слоя.

Эксперименты и результаты

Для проверки предложенного подхода авторы провели серию экспериментов, печатая изогнутую алюминиевую трубу. Результаты показали, что использование замкнутой системы управления значительно улучшает точность печати. В частности, удалось избежать проблем с окислением, возникавших при использовании открытой системы.

Один из интересных моментов — это появление ребристой поверхности на готовой детали. Авторы предполагают, что это связано с особенностями процесса WAAM, а не с системой коррекции. В любом случае, такая поверхность может быть выравнена в процессе последующей механической обработки.

А что дальше?

Это исследование демонстрирует, что использование замкнутой системы управ-



Изогнутая труба под углом 90°, изготовленная с использованием «холодной» модели с обратной связью

ления позволяет значительно улучшить точность печати при использовании WAAM, особенно для таких сложных материалов, как алюминий. В будущем авторы планируют сосредоточиться на коррекции в реальном времени, что позволит печатать детали одним непрерывным швом, постоянно корректируя высоту наплавленного материала.

Кроме того, планируется изучить возможность управления не только скоростью движения горелки, но и скоростью подачи проволоки. Это позволит контролировать не только высоту, но и ширину наплавленного материала, что может быть полезно для создания более сложных геометрий.

Аддитивное производство продолжает развиваться, и WAAM, благодаря своей высокой скорости и возможности работы с крупными деталями, занимает важное место в этом процессе. С каждым новым исследованием мы становимся на шаг ближе к тому, чтобы сделать эту технологию еще более универсальной и доступной для различных отраслей промышленности. 

Адаптированный источник: Doe J., Smith J. Advanced Robotics: Design and Applications [Электронный ресурс]: препринт. – 2024. – arXiv: 2412.04536.

Дмитрий Трубащевский



Прочти
меня на
сайте

Эффект боллинга в L-PBF: выявление причин и их устранение

Представьте, что вы потратили несколько часов на создание высокоточного металлического изделия с помощью 3D-печати, только чтобы обнаружить, что вдоль линии расплава образовались мелкие шарики, делающие вашу деталь слабой, пористой и непригодной для использования. Это не просто мелкий огрех — это эффект боллинга (англ. balling) или каплеобразования, один из самых раздражающих и разрушительных дефектов в технологии лазерной плавки в порошковом слое (L-PBF).

Что вызывает эту нестабильность? Как она незаметно ухудшает качество детали? И, что самое важное, как этого избежать?

В этой статье мы рассмотрим научные основы каплеобразования, причины его возникновения и способы оптимизации процесса, которые помогут устранить этот дефект, обеспечивая более прочные и качественные изделия, созданные с помощью L-PBF.

Что такое эффект

боллинга в L-PBF?

Технология L-PBF широко используется для высокоточного получения сложных изделий. Однако дефекты, в том числе каплеобразование, могут значительно ухудшить качество и механическую целостность напечатанных деталей.

Каплеобразование возникает, когда расплавленная ванна становится нестабильной, и жидкий металл формирует мелкие капли вместо непрерывной ванны. Этот дефект становится

причиной неровной текстуры поверхности, слабого межслойного сцепления и повышенной пористости внутри детали. Если его не контролировать, образующиеся шарики могут привести к неудачной печати, увеличению отходов материала и дорогостоящей постобработке.

Понимание причин каплеобразования крайне важно для производителей, стремящихся оптимизировать процесс L-PBF. Изучая физику этого дефекта и вы-



Понимание причин каплеобразования крайне важно для производителей, стремящихся оптимизировать процесс L-PBF. Изучая физику этого дефекта и выявляя параметры процесса, которые способствуют его возникновению, можно разработать эффективные стратегии для его предотвращения.

являя параметры процесса, которые способствуют его возникновению, можно разработать эффективные стратегии для его предотвращения.

В L-PBF мощный лазер избирательно плавит металлический порошок, форми-

руя тонкую расплавленную ванну, которая затвердевает по мере движения лазера. В идеале эта расплавленная линия должна равномерно распределяться и плавно

соединяться с соседними слоями. Однако при определенных условиях расплав-

ленный материал распадается на мелкие сферические шарики вместо формирования однородной линии. Это и называется эффектом боллинга.

Перечислим подробнее негативные последствия этого дефекта:

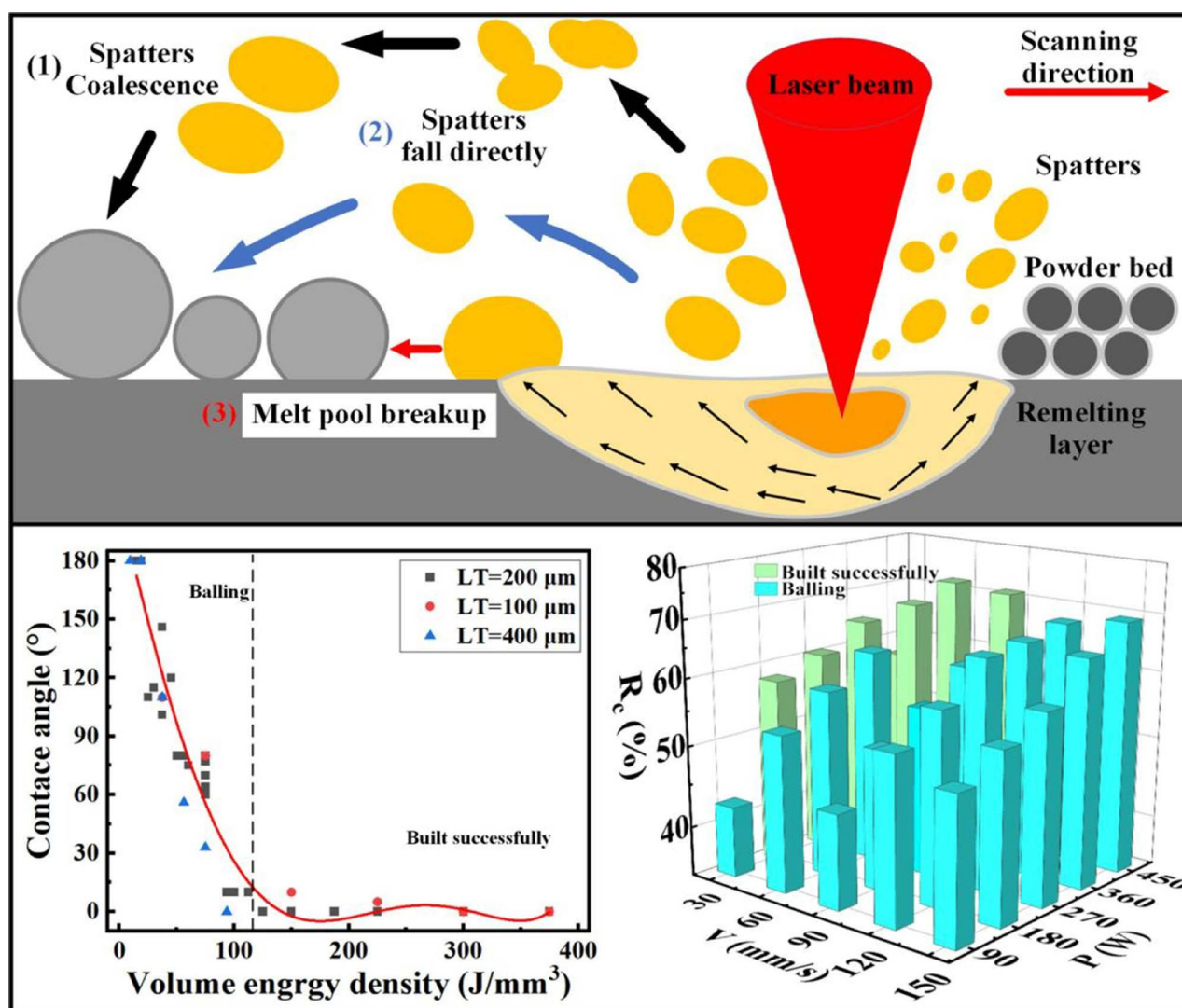


Рис. Принципиальная схема процесса каплеобразования, измерение угла контакта и изменение скорости слияния капель [2]

- Прерывистые линии расплава, что ухудшает сцепление слоев и плотность детали.
- Повышенная пористость, которая снижает механическую прочность.
- Шероховатые поверхности, требующие дополнительной постобработки.
- Увеличение количества дефектов, что приводит к увеличению отходов материала и времени производства.

Это явление возникает из-за дисбаланса между гидродинамикой, поверхностным натяжением и скоростью отверждения. Когда расплавленная ванна становится слишком нестабильной, она не может поддерживать плавное течение и вместо этого распадается на капли.

Научные основы эффекта боллинга: причины и механизмы

Гидродинамическая нестабильность и эффекты поверхностного натяжения

Одна из основных причин каплеобразования – гидродинамическая нестабиль-

ность в расплавленной ванне. Две основные теории помогают объяснить, почему это происходит:

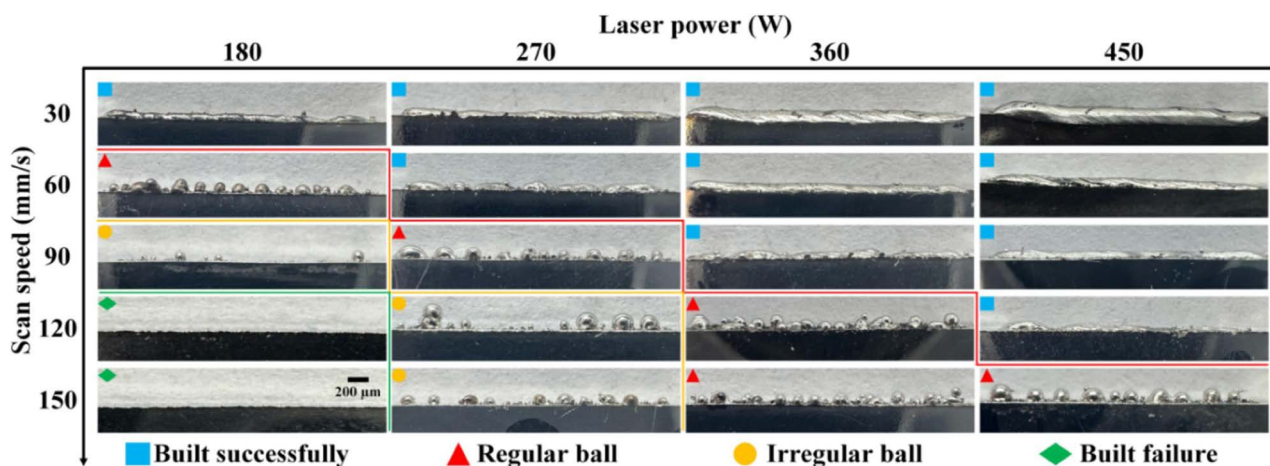
1. Нестабильность Плато-Рэлея. Эта классическая теория описывает, как поток жидкости распадается на капли, когда поверхностное натяжение преобладает над силами сцепления. В L-PBF, когда расплавленная ванна становится слишком длинной и тонкой, она достигает критической точки нестабильности и распадается на отдельные шарики. Исследования показали, что, если отношение длины к ширине расплавленной ванны (L/W) превышает определенный порог, каплеобразование становится неизбежным.

2. Нестабильность Ривулета: более точная модель для L-PBF. Более современные исследования предполагают, что нестабильность Ривулета более точно описывает каплеобразование в L-PBF. В отличие от традиционной модели, которая предполагает, что жидкость находится

в свободном пространстве, нестабильность Ривулета учитывает роль твердой подложки в стабилизации расплавленной ванны. Эта модель объясняет, почему расплавленные ванны с меньшей глубиной относительно их ширины более склонны к эффекту боллинга. Она также подчеркивает важность кривизны фронта затвердевания, которая влияет на то, как жидкость течет и стабилизируется в пределах линии расплава.

Динамика затвердевания и тепловые эффекты

Каплеобразование — это не только результат гидродинамической нестабильности, но и следствие того, как быстро затвердевает расплавленный металл. Если фронт затвердевания движется слишком быстро, это может привести к преждевременному остыванию до того, как металл полностью распределится, что приведет к неполному слиянию и появлению шариков.



Морфология следа расплава при различных параметрах процесса при толщине слоя 200 мкм [2]

Еще одним фактором является поверхностное натяжение, которое естественным образом стремится минимизировать площадь поверхности жидкого металла. Когда расплавленная ванна становится нестабильной, эта сила стягивает жидкость в мелкие сферические формы вместо того, чтобы позволить ей равномерно распределиться в непрерывный слой.

По сути, каплеобразование происходит, когда гидродинамическая неустойчивость развивается быстрее, чем фронт затвердевания может стабилизировать расплавленную ванну. Контроль этого баланса является ключом к уменьшению дефекта.

Как параметры процесса влияют на каплеобразование

Несколько ключевых параметров L-PBF напрямую влияют на стабильность расплавленной ванны. Корректировка этих факторов может значительно снизить вероятность эффекта боллинга.

Мощность лазера и скорость сканирования

Соотношение между мощностью лазера и скоростью сканирования – один из наиболее важных факторов в предотвращении эффекта боллинга. Если мощность лазера слишком низкая, это приводит к тому, что ванна расплавляется недостаточно и затвердевает слишком быстро. С другой стороны, если скорость сканирования чересчур высокая, расплавленная линия становится слишком мелкой и нестабильной, что увеличивает

риск каплеобразования.

Сбалансированное соотношение мощности и скорости обеспечивает стабильность расплавленной ванны, позволяя материалу равномерно затвердевать и формировать прочные межслойные связи.

Толщина слоя и плотность энергии

Более толстые слои требуют больше энергии для правильного плавления. Если энергия недостаточна, расплавленная ванна может не полностью проникнуть в слой порошка, что приведет к неполному слиянию и увеличению неустойчивости. С другой стороны, избыточная энергия может вызвать чрезмерное движение жидкости, что также способствует каплеобразованию.

Оптимизация толщины

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ: КАК КАПЛЕОБРАЗОВАНИЕ ФОРМИРУЕТСЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Недавние эксперименты с использованием рентгеновской радиографии предоставили ценные данные о том, как каплеобразование происходит во время печати L-PBF. Исследователи наблюдали, что процесс следует четкой последовательности:

1. Лазер. Лазер плавит порошок, создавая углубление в расплавленной ванне.

2. Накопление жидкости. Из-за давления пара расплавленный металл как бы отходит назад.

3. Сужение и фрагментация. Линия расплава сужается, образуя «шейки»,

которые в конечном итоге распадаются на отдельные капли.

4. Затвердевание и фиксация дефектов. Новообразованные шарики застывают на месте, оставляя после себя шероховатую и пористую поверхность.

Эти наблюдения подтверждают, что длина волны каплеобразования (λ) не всегда равна длине расплавленной ванны (L), как предполагалось ранее. Вместо этого переход между гидродинамической неустойчивостью и затвердеванием определяет окончательный рисунок дефекта.

КАК ПРЕДОТВРАТИТЬ КАПЛЕОБРАЗОВАНИЕ В L-PBF

1. Оптимизация параметров лазера и сканирования

- Увеличьте мощность лазера для создания более глубокой и стабильной ванны расплава.
- Уменьшите скорость сканирования, чтобы обеспечить достаточное время для достаточного расплавления порошка.
- Отрегулируйте толщину слоя для баланса теплового ввода и стабильности жидкости.

2. Улучшение выбора порошка

- Используйте высококачественные сферические порошки для лучшего распределения и смачиваемости.
- Минимизируйте содержание кислорода и влаги для предотвращения

нежелательных эффектов поверхностного натяжения.

3. Внедрение продвинутого контроля процесса

- Применяйте адаптивные стратегии сканирования для динамической корректировки мощности и скорости.
- Используйте системы мониторинга в реальном времени для обнаружения и исправления дефектов.
- Предварительно нагревайте платформу для снижения тепловых градиентов и стабилизации расплавленной ванны.

С помощью этих стратегий производители могут значительно снизить дефекты каплеобразования, улучшая качество печати и эффективность процесса.

слоя и плотности энергии крайне важна для поддержания стабильной расплавленной ванны на протяжении всего процесса сборки.

Свойства порошка и смачиваемость поверхности

Характеристики порошка, используемого в L-PBF, также играют роль в формировании каплеобразования. Порошки с высокой сферичностью и равномерным размером частиц распределяются более равномерно, улучшая смачиваемость и снижая нестабильность. Кроме того, контроль содержания кислорода и влаги в порошке помогает предотвратить нежелательные эффекты поверхностного натяжения.

Будущие тенденции в предотвращении каплеобразования

Развитие технологий искусственного интеллекта и машинного обучения помогает производителям предсказывать и предотвращать эффект боллинга в реальном времени. Эти технологии анализируют данные с датчиков, чтобы обнаружить ранние признаки нестабильности и динамически корректировать параметры.

Кроме того, разрабатываются системы визуализации в реальном времени и многомасштабные симуляции, чтобы лучше понять и устранить гидродинамическую нестабильность в процессе L-PBF.

По мере развития технологий L-PBF отрасль движется в сторону более качественной, бездефектной печати металлов с повышенной эффективностью и повторяемостью.

Выводы

Каплеобразование остается серьезной проблемой в L-PBF, но ее можно эффективно контролировать с помощью оптимизации процесса, контроля материалов и современных методов мониторинга. Балансируя гидродинамику и скорость затвердевания, производители могут уменьшить дефекты каплеобразования и повысить общую надежность аддитивного производства металлов. 

При подготовке статьи были использованы материалы:

[1] arxiv.org/pdf/2502.13341

[2] doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113442

[3] doi.org/10.1007/s10035-024-01442-2

[4] doi.org/10.1088/2631-7990/ad967e

Дмитрий Трубащевский



INDUSTRY3D.RU

Аддитивные технологии в России стремительно развиваются, но вместе с ростом открываются и «узкие места»: нерешенные проблемы, затянутые сроки реализации проектов, вопросы, которые остаются за рамками публичных дискуссий. Мы часто слышим от экспертов горькие реплики: «Об этом даже говорить бессмысленно!» или «На федеральном уровне всё утонет в разговорах». Но разве это повод молчать?

За последние годы накопилось слишком много того, о чем болит душа у профессионалов отрасли. Корпоративные рамки, условности площадок, страх испортить репутацию — всё это заставляет замалчивать острые темы. Но если не говорить о проблемах, как их решать?

Поэтому журнал «АПГрейд» открывает рубрику «Наболело!»:

- Это пространство для честного диалога без цензуры и страха.
- Возможность анонимно поднять вопросы, которые волнуют всех: от технологических барьеров до системных пробелов в регулировании.

- Шанс превратить «разговоры в кулуарах» в конкретные шаги.

Как это работает?

1. Вы формулируете проблему (аддитивное производство, конвергентные технологии, цифровизация).
2. Редакция гарантирует анонимность и модерацию текста.
3. Мы публикуем материал, запуская дискуссию в профессиональном сообществе.

Почему это важно?

Потому что даже самый громкий митинг на конференции не сравнится с силой текста, который прочтут те, кто принимает решения. Потому что молчание консервирует проблемы, а слова — запускают изменения.

Не дайте наболевшему стать хроническим.

Пишите. Говорите. Действуйте.

Ваш голос важен — даже если он останется без подписи.

«АПГрейд» — площадка, где проблемы превращаются в решения. 

С уважением, редакция издания

Наболело!



Девять лет тишины. Где результаты российской 3D-печати?

Коллаж: креатив нейросети и дизайн-доработка

Аддитивные технологии — это не просто модный ярлык, а пропуск в будущее: напечатал деталь, поставил в машину, полетел. Быстро, дешево, эффектно. Россия с её инженерным прошлым могла бы блистать на этой сцене. Но пока мы застряли в фойе, разглядывая афиши чужих премьер. Девять лет — срок, за который другие стали на крыло уже уверенно парят в небе. Так где наши крылья? Давайте разберём этот спектакль по ролям.

Быть вторым — не позор. Догоняющие видят, где другие споткнулись, берут их наработки и могут рвануть вперёд, пока первопроходцы зализывают набитые шишки, связанные с падением рынка и не только. Это как выйти на трассу, зная, где повороты. Россия могла бы сыграть в эту игру, зайдя с козырей. Но вместо старта мы, кажется, решили присесть на обочине. Где наш рывок? Или мы просто любители красивых видов?

Мировой аддитивной практикой доказано: от идеи до дела — в среднем девять лет. Boeing в 2005 году загорелся металлической 3D-печатью, а к 2013-му их детали дер-

жали крылья в небе. General Electric с 2009-го к 2016-му встроил напечатанные части в двигатели. Siemens за пять лет — с 2010-го по 2015-й — запустил технологию в цеха. Китайцы из COMAC и CRRC рванули в 2012–2014 годах, и к 2017-му их детали работали в самолётах и поездах. Даже Intuitive Machines с 2012 года возились с идеей напечатанных деталей для лунного модуля, и к 2021-му их Nova-C был готов к запуску — ровно девять лет.

А SpaceX с 2012 года разрабатывали Raptor, и к 2021-му он уже гудел на испытаниях. Правда, они любят тыкать нам в лицо одну и ту же заезженную фотографию трёх версий двигателя Raptor 1, 2, 3, как будто это доказательство их гениальности. Но хотя бы движутся. А мы где?

Потенциал у нас — как залежи золота: вроде есть, но где слитки? Деньги? Конечно, без них не взлететь. Но куда они утекают? На реальные проекты, или же на полировку всё тех же презентаций, либо на болтунов, которые бегают из компании в компанию, не предоставляя ничего, кроме красивых

слов? Вместо новостей о триумфах — бесконечный парад презентаций, лицензий и громких заявлений. Одни и те же слайды кочуют по конференциям из года в год, как заезженная пластинка, а мы всё хлопаем. Давайте посмотрим на наших акторов:

- **Известнейшие материаловеды.** Мы знаем про их паспортизированные сплавы — звучит солидно, правда? Только почему-то залежи этих сплавов не находят применения в авиастроении ни в каком виде. Первый пресс-релиз о напечатанной форсунке в серию был ещё в 2017-м, но где заголовок: «Форсунка – в небе»? Его нет. Для кого или для чего эта серия печатается — для отчётов или для сбора пыли на полке?

- **Металлурги.** Можно вечно слушать их саги о великой металлургии тех времён, когда мы все пешком под стол ходили. Но Китай, который считали фабрикой дешёвых поделок, теперь штампует порошок лучше и дешевле — даже с учетом перепродажи, учтите! Где ваш хваленый опыт, если вас обошли на повороте?

- **Обучение.** Университеты штампуют курсы по АТ — семестр воды и 10% сути. Если вашим специалистам это нужно, их явно забанили в Google. Коммерческие «тренеры» выдают вебинары, рекламу, рекламу вебинаров и вебинары рекламы, а в договоре важно красуются «консультации». Где знания? В слайдах, конечно, вы просто не разглядели, а при покупке услуги знания проявятся чётче.

- **Двигателисты.** Каждый год мы видим те же самые слайды о напечатанных деталях для двигателей. Конференции гудят, аплодисменты гремят. Но где пресс-релиз: «Деталь будет в двигателе»? Тишина. Может, это просто макеты для выставок и стендов, а не для неба? И через пару-тройку лет мы узнаем, (или нет), что фокус не удался, давайте отливать, как раньше?

- **Коммерсанты.** Их гимн: «Мы за светлое технологическое будущее и перепродажу (ранее западной, а теперь) китайской тех-

ники, но только если это светлое будущее будет с минимум 40% маржи, а лучше больше – так и будущее светлее». Перепродают китайскую технику, намывая на марже прибыли в карман. А клиенту каково? Ему не жалко было бы переплачивать за эту маржу, если бы покупка сопровождалась качественной инжиниринговой поддержкой, но всё, что есть, – это обычно самоучка без базовых знаний и системного мышления, или кривой перевод с китайского, где инженер с высоты уровня Джомолунгмы плюёт на ваши беды. Китай нас обогнал, но с чего вы взяли, что он будет нас тянуть?

- **Атомщики.** О, тут пафоса столько, что даже неловко снова упоминать очевидное. Дорожные карты, амбиции, заявления — всё на уровне мировых блокбастеров. Но где детали в промышленных объемах, которые работают? Или весь пар ушёл в свисток, т.е., на спецэффекты для пресс-конференций с теми же старыми слайдами?

- **Производители оборудования.** Три «калеки» в ГИСПе, остальные либо клепают «отечественные» поделки на китайских чертежах от условного Чен Ду Пина, либо мечтают сделать всё — от софта до лазера с бюджетом в три рубля, нулевой кооперацией и горизонтом планирования в полтора года. Перспективы: не умереть в судорогах на своём рынке, отказываясь сотрудничать с другими компаниями, осмысленно распределив нагрузку в коллаборации, и пребывая в постоянном страхе, что их обязательно кинут.

- **Работодатели.** Плюют на кадры с реальными навыками, выбирая жонглёров словами. Звонили из США времён администрации Буша, просили вернуть карго-культ болтунов. Зарплаты инженеров ползут, как черепахи, зато продажи — наш вечный козырь, потому что, будучи не в состоянии уверенно продемонстрировать своё качество, остаётся соревноваться в словоблудии. За неимением сумасшедших, готовых работать в этой болотной почве, инженер теперь

Наболело!

— любой студент, техрук — любой, кто был достаточно безумен или инертен, чтобы проработать год в этой среде, или оказался слишком удачлив, чтобы оказаться в нужном месте в нужное время.

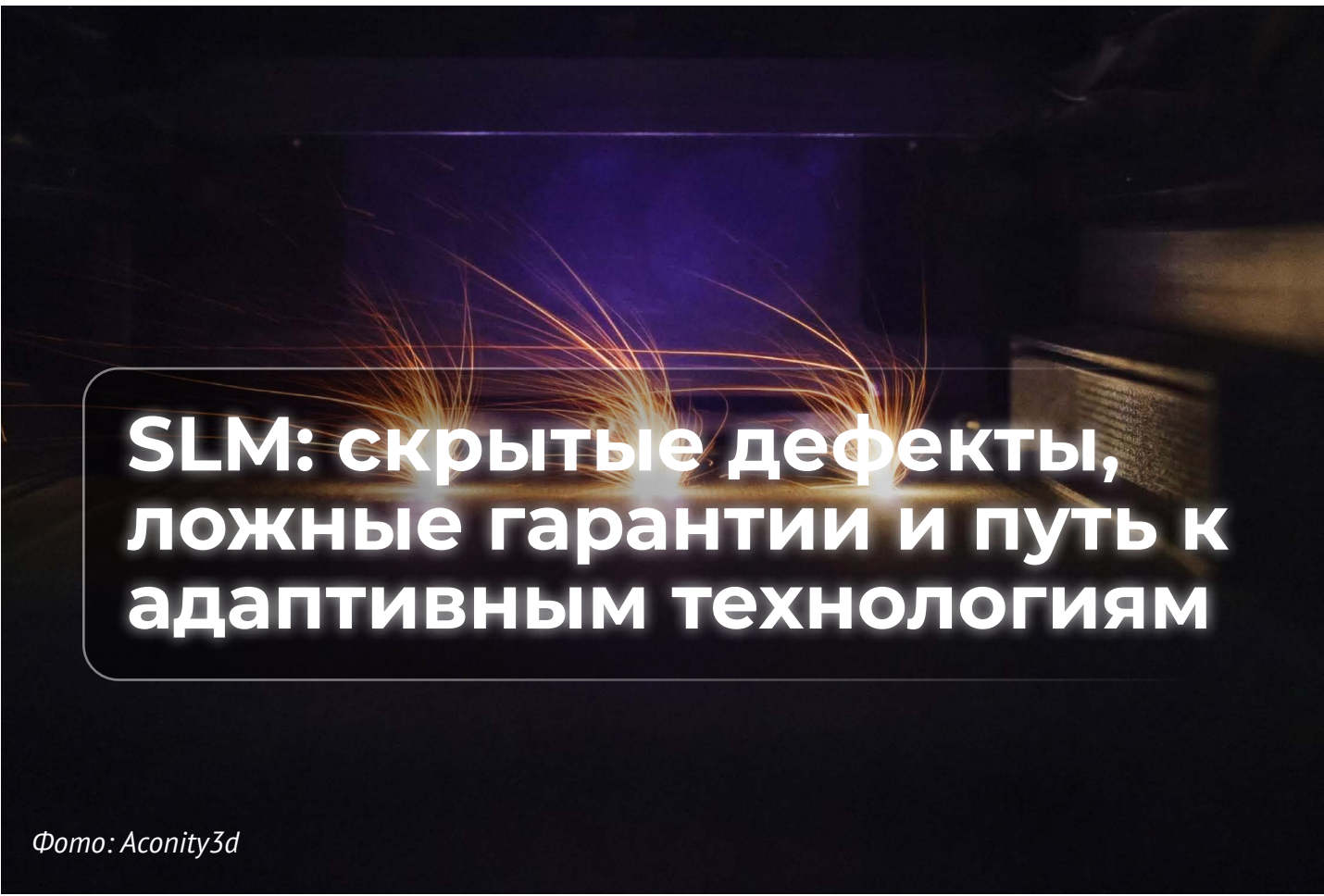
Есть дорожная карта — а что с ней? Зарубежные компании регулярно выкладывают планы и результаты, как на блюде, а у нас — туман и тишина. Санкции? О, проще красиво рассуждать об «импортоопережении» и «стохастической бинаризации», чем показать рабочую деталь, которая выдержит нагрузку. Пока одни печатают будущее, другие соревнуются в словесной акробатике. Ну и кто тут чемпион?

Мы гордимся: обучаем лучше всех, лицензий — вагон, слайды — вечный шедевр. За декаду вы уютно устроились в трясине с табличкой «Стагнация» — тепло, комфортно,

можно полировать слайды друг другу ещё лет пять, если повезёт. Но где кейсы? Где чемодан с готовыми изделиями? Наши ракеты пока летают только в мечтах — и то на бумаге.

Девять лет — срок, чтобы не просто догнать, а выйти на уровень. Россия умеет удивлять, когда захочет. Так почему бы не выкатить детали, которые заставят других хлопать нам? Хватит прятаться за пафосом и заезженными слайдами — SpaceX со своими фотографиями Raptor нас не переплюнет, если мы начнём делать. Пора вытащить из чертежей что-то, что реально работает, а не пылится в отчётах. Время пошло — или мы опять будем ждать, пока кто-то другой улетит вперёд? 

Инкогнито #1



SLM: скрытые дефекты, ложные гарантии и путь к адаптивным технологиям

Фото: Aconity3d

Аддитивные технологии, несмотря на свой революционный потенциал, сталкиваются с системными проблемами, особенно

в высокотехнологичных отраслях, таких как авиастроение. Главная сложность — обеспечение стабильности и надежности процес-

сов, где даже незначительные отклонения могут привести к критическим последствиям.

Лазерные модули и сканаторы — ключевые компоненты SLM-установок — демонстрируют постепенную деградацию характеристик. В отличие от традиционных станков, где износ можно предсказать, аддитивное оборудование ведет себя как «черный ящик»: параметры меняются незаметно, но необратимо. Например, заявленная скорость лазера в 1000 мм/с на практике достигается лишь на отдельных участках, а на краях детали может падать до 800 мм/с из-за инерционности сканирующей системы. Это приводит к неравномерному энерговыделению и, как следствие, к локальным дефектам структуры.

Скрытые поры, микротрещины и зоны несплошности — бич аддитивного производства. Они возникают в самых неожиданных местах: на стыках слоев, в зонах изменения скорости лазера, рядом с поддерживающими структурами. Со временем эти дефекты становятся очагами коррозии, даже в нержавеющих сталях и титановых сплавах. Проблема усугубляется тем, что классические методы контроля (рентген, УЗД) не всегда эффективны для сложнопрофильных деталей. В результате никто точно не знает, как будет вести себя конкретная напечатанная деталь через 2–3 года эксплуатации.

Срок службы лазерных систем в 3D-принтерах — это отдельная история, которую стоит разобрать без прикрас. Производители заявляют ресурс в 50–100 тысяч часов, что звучит впечатляюще — почти 5–11 лет непрерывной работы. Но реальность гораздо суровее этих красивых цифр. Возьмем стандартный производственный цикл: круглосуточная печать дает около 8760 часов в год. Уже после первого года эксплуатации начинается заметная деградация лазерных характеристик.

Вот как это работает на практике: изначально лазер выдает заявленные 400 Вт с

точностью $\pm 1\%$ (плюс-минус 4 Вт). Но со временем этот параметр начинает «плавать» — сначала $\pm 1,5\%$, потом $\pm 2\%$. И это в лучшем случае. Чаще мощность просто неуклонно снижается, причем предсказать этот процесс невозможно.

Металлические порошки, даже сертифицированные, ведут себя непредсказуемо при повторном использовании. Фракционный состав меняется, появляются микропримеси, а плазма в зоне печати колеблется по температуре. В результате деталь, напечатанная из «одного и того же» порошка, может иметь разные механические свойства в разных партиях. Особенно критично это для авиации, где каждый компонент работает под нагрузкой десятилетиями.

Ситуация усугубляется тем, что большинство пользователей просто не знают об этих особенностях. Они покупают оборудование, рассчитывая на заявленные параметры, а потом сталкиваются с постепенным ухудшением качества печати и непредсказуемыми отказами. И самое неприятное — доказать что-либо производителю практически невозможно, ведь формально «ресурс не исчерпан».

Промышленность пока компенсирует эти проблемы тотальным контролем и запасом прочности, но это временное решение. Будущее — в адаптивных системах: мониторинг в реальном времени (спектроскопия плазмы, высокоскоростные камеры), ИИ-коррекция параметров печати с учетом износа оборудования, новые стандарты для порошков и постобработки. Аддитивные технологии еще не достигли «зрелости» ЧПУ или литья, но их потенциал слишком велик, чтобы останавливаться на полпути. Главное — признать проблемы и работать над их решением системно, а не точечно. 

Инкогнито #2



Мы ищем

таланты и формируем круг соратников!

Станьте блогером-профи на страницах АПГрейд, делитесь открытиями и размышлениями, расскажите миру о своих успехах в сфере аддитивного производства, 3D-сканирования, разработки оборудования, ПО, новых материалов.

**Если не знаете,
с чего начать**

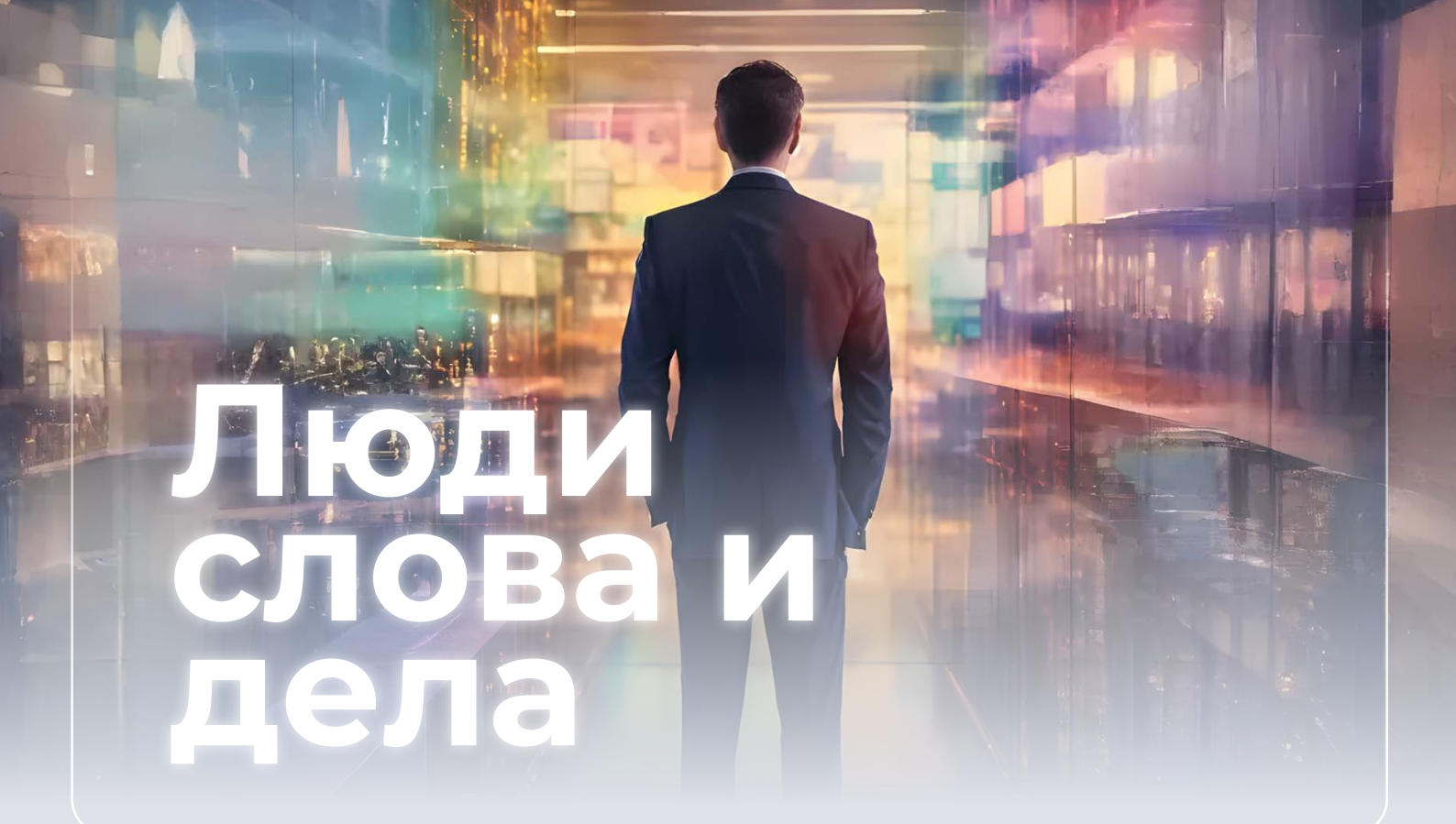
— обращайтесь к нам, мы
всегда рады помочь!

**Наиболее активные авторы получают от нас особое
внимание и помощь в продвижении проектов!**

Пишите нам на
chief_editor@industry3d.ru

Читайте нас на industry3d.ru.





Люди слова и дела

Дорогие читатели!

Мы рады представить вам рубрику «Люди слова и дела» — место, где мы рассказываем о тех, кто не просто говорит о будущем, но и активно его создает. Это люди, которые своими идеями, трудом и настойчивостью меняют мир вокруг нас, внедряя инновации, преодолевая трудности и вдохновляя других на новые свершения.

В этом выпуске «АПГрейда» мы снова предоставляем слово нашим экспертам, дебютировавшим в этой рубрике в предыдущем номере. А еще к ним присоединились новые авторы — яркие, инициативные профессионалы, чьи проекты и взгляды на развитие технологий точно стоит узнать.

Скорость изменений в современном мире поражает: технологии перекраивают реальность прямо у нас на глазах. Но за каждым технологическим скачком стоят конкретные люди — не пассивные наблюдатели, а активные творцы перемен. Это инженеры, разрушающие устаревшие подходы. Учёные, расширяющие границы возможного. Предприниматели, превращающие дерзкие замыслы в работающие бизнес-модели. Медработники, применяющие передовые

разработки для спасения жизней.

В нашей рубрике мы покажем вам настоящие истории успеха — без прикрас, но с ценными практическими выводами. Вы услышите откровенные беседы с теми, кто принимает непростые решения и переписывает отраслевые стандарты. Мы разберём реальные кейсы: как преодолевали кризисы, какие уроки извлекли из ошибок, какие советы могут дать тем, кто только начинает путь. Вы увидите, как абстрактные идеи обретают плоть и кровь, становясь рабочими решениями.

Это больше чем мотивирующие рассказы — это подробная инструкция для тех, кто предпочитает дела пустым разговорам. Ведь будущее строится не красивыми словами, а конкретными действиями. И следующей строчкой в этой летописи преобразований может стать именно ваш проект.

Присоединяйтесь к разговору с теми, кто прямо сейчас создаёт завтрашний день. Добро пожаловать в сообщество тех, кто предпочитает делать! 

С уважением, редакция издания

СПбГМТУ

Технология ПЛВ: роботы берут гибкостью и надежностью

В предыдущем выпуске АПгрейда наш эксперт, руководитель отделения аддитивных технологий института лазерных и сварочных технологий СПбГМТУ Константин Бабкин анонсировал серию публикаций, цель которых – «с новой стороны открыть для вас мир аддитивных технологий, поделиться моим видением технических и организационных проблем и путей их решения. Мы погрузимся в мир инженерных задач и посмотрим, как их решать». Этой статьей он начинает подробно знакомить нас с нюансами технологии прямого лазерного выращивания.

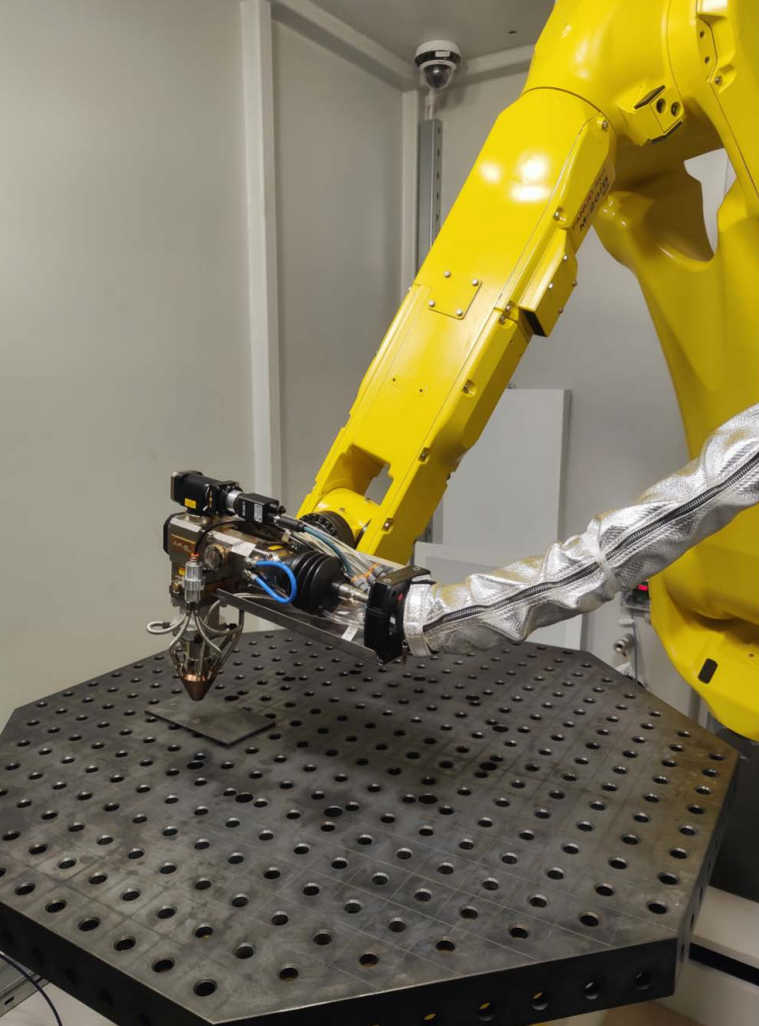
Введение

Для начала разберемся с терминологией. Прямое лазерное выращивание (ПЛВ) относится к классу аддитивных технологий с прямым подводом энергии и материала. Это технологический процесс изготовления деталей по электронной геометрической модели путем наплавки металлопорошковых композиций лазерным излучением. С помощью ПЛВ изготавливаются высокоточные заготовки, которые требуют последующей термической и механической обработки. Целевой размер деталей – от 200 до 2000 мм с массой от пары килограмм до тонны. Для реализации процесса исполь-

зуется специализированное оборудование – установки прямого лазерного выращивания. Процесс построения заготовки выполняется путем наплавки металлического порошка с помощью лазерного излучения, при этом и порошок и излучение подаются непосредственно в активную зону.

Оборудование

Основным элементом установки является технологический инструмент – это лазерная головка, которая фокусирует излучение в пятно определенного размера. Излучение поглощается металлом, выделяется тепло и образуется ванна жидкого металла, в ко-



торую подается металлический порошок. После прохождения технологического инструмента формируется валик наплавленного металла. Накладывая валики друг на друга по определенной траектории, можно «вырастить» металлическую заготовку. Порошок подается в технологический инструмент по пневматическому шлангу с использованием транспортного газа – аргона. При этом важную роль играет стабильность подачи. Как недостаток, так и избыток порошка могут привести к дефектам геометрии или внутренней структуры изделия.

Для перемещения инструмента относительно выращиваемого изделия используется манипулятор – это может быть или набор линейных осей, или промышленный робот. Роботы проигрывают по абсолютной точности и динамике, но выигрывают в размере изделия, пылезащищенности и количеству степеней свободы. Существующее оборудование для ПЛВ на линейных осях предназначено для изделий размером до полуметра и как правило показывает про-

изводительность на уровне 0,1-0,4 кг/ч. К сожалению, при таких характеристиках ему сложно соревноваться с L-PBF принтерами. Другое дело – роботизированные машины, тут и размер изделия больше метра и производительность на уровне 1 кг/ч, а то и больше. Последние семь лет ИЛИСТ производит исключительно роботизированные установки ПЛВ – они отлично зарекомендовали себя в плане соотношения цена/качество при великолепной надежности. Ряд выпущенных машин переступил через порог в 20 000 часов наработки. Это, кстати, одно из преимуществ использования роботов – они требуют более редкого технического обслуживания (как правило это смена смазки раз в год).

Кроме того, можно выделить следующие функциональные элементы установки ПЛВ:

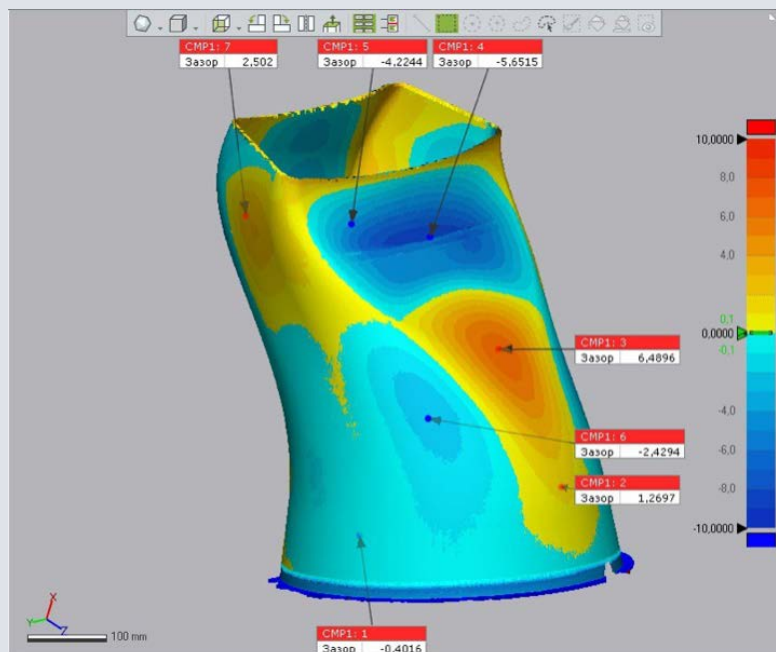
- Герметичная технологическая кабина обеспечивает инертную среду аргона для защиты от окисления.
- Порошковый питатель дозирует и подает металлический порошок в технологический инструмент.
- Фильтровентиляционная система собирает металлический конденсат, образующийся при испарении расплавленного металла.
- Волоконный лазер обеспечивает подачу лазерного излучения требуемой мощности
- Система автоматического управления отвечает за взаимодействие отдельных подсистем и пользовательский интерфейс

Точность изготовления

Ответ на вопрос о точности изготовления тянет на отдельную статью, но постараемся тезисно этот вопрос подсветить. К сожалению, точность получаемых заготовок определяется не только погрешностью позиционирования манипулятора. Любая аддитивная технология, построенная на плавлении материала, формирует в изделии

Люди слова и дела

напряженно-деформированное состояние, вызванное сварочными напряжениями. Исключением является разве что EB-PBF, но это отдельная история. Внутренние напряжения приводят к деформации детали, а характер деформаций зависит от многих факторов – химического состава материала, геометрии, межпроходной температур и так далее. Если изделие компактное, с большой толщиной стенок, то происходит равномерная усадка. Увеличению габаритов и уменьшению толщины стенок приведет к крупномасштабным деформациям. В случае тонких, «нежестких» оболочек можно наблюдать потерю устойчивости и коробление детали. За последние годы отработаны методы борьбы с этими негативными эффектами. Усадка компенсируется проще всего – с помощью масштабирования технологической модели на заранее известный коэффициент. Для компенсации крупномасштабных деформаций применяется пробное выращивание и обратный выгиб, например можно использовать ПО Reditive Compensation или другие пакеты. А вот ко-



робление победить сложнее всего, так как с ним обратный выгиб не работает. Решение – увеличение жесткости конструкции, либо за счет увеличения толщины стенки, либо за счет удаляемых элементов – стрингеров.

Надо заметить, что внутренние напряжения могут релаксироваться со временем или в процессе постобработки, вызывая изменение геометрии. Поэтому для всех заготовок, полученных по технологии ПЛВ, крайне рекомендуется термическая обработка, как минимум на снятие напряжений, а часто и для получения требуемой структуры и механических свойств металла. 

Константин Бабкин, руководитель отделения аддитивных технологий института лазерных и сварочных технологий СПбГМУ



URAL3D

Цифровая улыбка: как 3D-печать перезагружает стоматологию

Цифровая стоматология стремительно меняет облик современной медицины, и в этом номере мы продолжаем рассказ о технологиях, которые уже сегодня переворачивают представление о протезировании, имплантации и диагностике. На переднем крае этой революции — 3D-печать, превращающая стоматологические лаборатории в высокоточные цифровые производства.

Современная стоматология переживает технологическую революцию, где ключевую роль играет 3D-печать. Эта технология кардинально изменила подход к созданию зубных протезов, коронок и других стоматологических конструкций, превратив традиционные лаборатории в высокотехнологичные цифровые производства.

В арсенале стоматологов сегодня представлены два принципиально разных метода 3D-печати. Первый — фотополимерные технологии, которые позволяют создавать временные коронки и хирургические шаблоны всего за 1,5 часа. Композитные материалы, сочетающие пластик и стеклянные

частицы, обеспечивают не только высокую скорость производства, но и превосходную эстетику, химическую адгезию с тканями зуба, а также возможность коррекции. Показательный пример — первые в России 3D-печатные оверлей-вкладки, изготовленные и установленные пациенту за рекордные 4 часа: от сканирования до фиксации.

Второй метод — металлическая 3D-печать по технологии SLM. Используя кобальт-хром или титан, принтеры создают каркасы бюгельных протезов, цельнолитые мостовидные конструкции и титановые имплантационные шаблоны с точностью до 25 микрон.

Особое место в цифровой стоматологии



занимает планирование имплантационных операций с использованием модульных хирургических шаблонов. Это следующий этап эволюции, когда 3D-печать становится не просто инструментом создания конструкций, а частью комплексной диагностико-навигационной системы.

Модульный шаблон состоит из двух частей. Основа из титана или кобальт-хромового сплава, изготовленная методом SLM, обеспечивает прочность, стабильность фиксации, стерильность и точное позиционирование на челюсти. На неё крепится надстройка из фотополимера или композита, напечатанная на DLP/LCD-принтере. Такая конструкция интегрирует направляющие втулки для сверла, окна визуального контроля и каналы подачи охлаждающей жидкости, предотвращающие перегрев кости.

Цифровое планирование объединяет данные компьютерной томографии, отражающие структуру кости, и интраорального сканирования, фиксирующего положение зубов и мягких тканей. На их основе с помощью компьютерного моделирования создаётся 3D-модель челюсти с учётом анатомии, плотности кости и запланированного расположения имплантатов. В специализированном ПО шаблон проектируется

как модульная система, где металлическая база сочетается с функциональной надстройкой. Затем наступает этап 3D-печати, где конструкция формируется слой за слоем. Завершают процесс постобработка и цифровая примерка, гарантирующие идеальное соответствие изделия анатомии пациента.

Ценность модульности — в упрощённой стерилизации, возможности юстировки шаблона, повышении контроля хирурга во время операции и архивации цифровых проектов для повторного использования. Эти шаблоны трансформируют стоматологическую хирургию, приближая её к стандартам высокоточной навигационной медицины.

Будущее 3D-печати в стоматологии выглядит ещё более революционным. Уже ведутся эксперименты по биопечати дентина с использованием гидрогелей и стволовых клеток. Искусственный интеллект автоматизирует подбор формы коронок на основе анализа прикуса, а гибридные решения позволяют печатать полимерный базис и керамический слой одновременно.

По прогнозам SmarTech Analysis, к 2027 году около 50% стоматологических конструкций будут производиться с помощью аддитивных технологий. Это подтверждает, что 3D-печать — уже не просто перспектива, а новая реальность, меняющая стандарты оказания помощи. Выбор сегодня стоит между разными технологиями внутри цифровой стоматологии: от компактных фотополимерных принтеров для клиник до промышленных SLM-систем для лабораторий. 

Иван Голобородько, директор по развитию цифровой стоматологии «ООО Квалитет», международный лектор, президент Ассоциации специалистов цифрового производства, соучредитель центра 3D-печати «ООО Индустрия 4.0» (торговая марка Ural3D)

СПИН

MBJ — как мы разгадывали головоломку новой технологии

“Мы стали подопытными кроликами” — именно так первопроходцы технологии MBJ с высоты своего опыта описывают путь покорения сложной, но перспективной технологии, которой эксперты пророчат золотые времена. Дать ей шанс и встать у истоков промышленной революции решились в компании «СПИН».

Когда в марте 2023 года мы разгружали первый в России Metal Binder Jetting принтер, мы еще не знали, что нас ждет, но тогда все в отрасли говорили о потенциале MBJ, не имея реальных кейсов в стране. Мы понимали: стать первопроходцами — значит добровольно записаться в подопытные кролики.

Первые недели напоминали алхимическую лабораторию. Зелёные детали после печати крошились в руках, как песчаные замки. А процесс спекания? Это был настоящий квест — мы перепробовали десятки вариантов спекания, пока не нашли тот самый «золотой ключик». Помню, как после очередной неудачи наш технолог в отчаянии разглядывал спекшийся брикет, больше напоминающий губку, чем металлическую

деталь. Тогда мы и поняли: вакуумная печь — это не просто «духовка», а капризный музыкальный инструмент.

Особое испытание ждало нас с геометрической точностью. Казалось логичным: напечатал деталь на несколько процентов больше — после усадки получишь идеал. Реальность оказалась другой - всё очень индивидуально, усадка около 20% по каждой из осей, в зависимости от размеров детали. Но эти цифры к нам пришли только после нескольких запусков тестовой печати.

Когда через восемь месяцев привезли модернизированный принтер, мы ожидали значительных улучшений. И действительно, в связи с тем, что в обновленной версии было два картриджа, связующее тоже было другим и все в комплексе стало требовать

Когда в 2023 году мы запускали первый в России MBJ-принтер, никто не знал, с какими вызовами столкнёмся. Зелёные детали крошились, спекание превращалось в алхимию, а геометрия изделий упорно не поддавалась контролю...

меньше внимания. Улучшилась система очистки печатных голов.

Сейчас, оглядываясь назад, понимаешь: главным открытием стали не параметры печати или хитрости спекания. Важнее оказалось изменить само мышление. MBJ — это не просто «другой 3D-принтер». Это философия, где каждый этап — от выбора порошка до программирования печи — требует особого подхода.

Мы до сих пор совершаем ошибки, но теперь они другие — более интересные. Вместо «почему оно развалилось?» мы спрашиваем «как сделать ещё точнее?». И

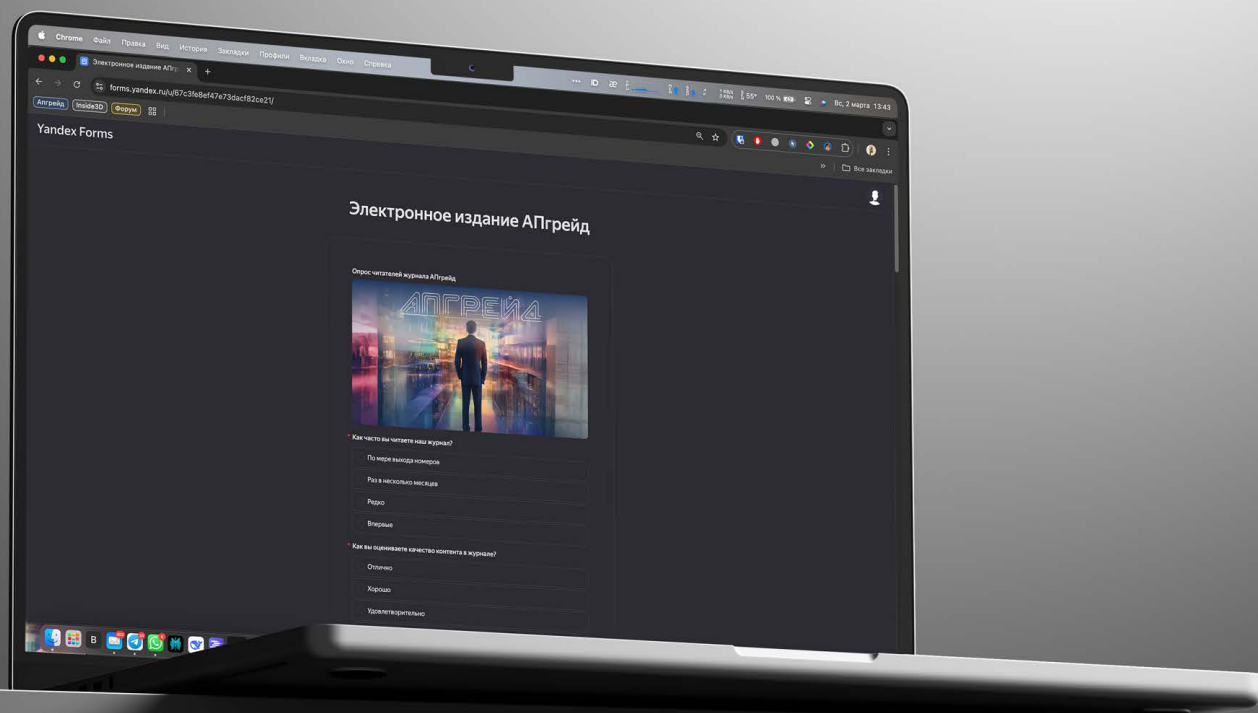
в этом, наверное, и есть главная награда первопроходцев — возможность задавать вопросы, на которые никто в нашей стране ещё не знает ответов.

В следующий раз мы постараемся рассказать о самом неожиданном ограничении технологии MBJ, которое превратило наш цех в подобие ювелирной мастерской. И о том, почему иногда проще напечатать сложную деталь, чем простую. 

Евгений Копылов, генеральный директор ООО «СПИН»

Индекс зрелости АТ по металлам 2019-2023





Электронное издание АПГрейд

Опрос читателей журнала АПГрейд



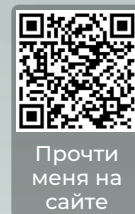
* Как часто вы читаете наш журнал?

- ☐ По мере выхода номеров
- ☐ Раз в несколько месяцев
- ☐ Редко
- ☐ Впервые

* Как вы оцениваете качество контента в журнале?

Помогите нам стать лучше! Пройдите короткий опрос и поделитесь своим мнением о журнале!



Прочти
меня на
сайте

Мечтают ли андроиды о 3D-печати

Когда-то гуманоидные роботы были чем-то из разряда научной фантастики. Мы неоднократно видели их в фильмах, читали о них в книгах, но мало кто верил, что они так скоро станут частью нашей реальности. Например, научно-фантастический роман американского писателя Филипа Дика «Мечтают ли андроиды об электроовцах?» (Do Androids Dream of Electric Sheep?), написанный в далёком 1968 году, представляет собой глубокие размышления о человеческой природе, технологиях и будущем, которые остаются актуальными и сегодня. Благодаря стремительному развитию 3D-печати и искусственного интеллекта (ИИ), создание роботов, которые выглядят и действуют как люди, перестало быть мечтой или фантазией. Это уже не вопрос «если», а вопрос «когда».

Введение

Нашего читателя вряд ли можно упрекнуть в незнании прорывных трендов, которые сегодня охватывают множество наукоёмких и зачастую кросс-отраслевых направлений. Для специалистов и практиков аддитивное производство уже давно стало привычным инструментом. Однако, как показывает наш опыт, далеко не все

компании и их руководство чётко понимают перспективы 3D-печати и могут легко выбрать подходящую технологию для своих задач. Для далекого же от индустрии человека всё, что связано с трёхмерным сканированием и печатью, и вовсе выглядит чем-то не поддающимся пониманию и доступным лишь узкому кругу специалистов.

В то же время робототехника, беспилотный транспорт и нейросети вызывают куда больший интерес. Возможно, потому, что здесь конечный результат очевиден: вроде бы всё уже разложено по полочкам, и не нужно додумывать, как это работает.

Автоматизация производства, начавшаяся в эпоху третьей промышленной революции в 1960-х годах,



Мы становимся свидетелями зарождения новой эры, где симбиоз человека и технологий приведёт к созданию устойчивого будущего. Это будущее уже трансформирует общество, культуру и даже наше мышление.

доказала свою значимость благодаря роботам и станкам с ЧПУ. Четвёртая и пятая промышленные революции укрепляют роль робототехники, делая её неотъемлемой частью не только производственных процессов, но и повседневной жизни. Для каждого из нас важны кастомизация и автономность домашних помощников, а также технологии, расширяющие человеческие возможности.

Мы становимся свидетелями зарождения новой эры, где симбиоз человека и технологий приведёт к созданию устойчивого будущего. Это будущее уже трансформирует общество, культуру и даже наше мышление. И, возможно, именно сейчас мы находимся на пороге чего-то по-настоящему грандиозного.

Итак, наш разговор – о роботах. Роботов сегодня условно можно разделить на следующие категории:

- Промышленные
- Медицинские
- Сервисные
- Военные
- Космические
- Подводные
- Бытовые
- Гуманоидные

Отдельного внимания заслуживают манипуляторы с дистанционным управлением, которые можно считать предтечами шутильной аббревиатуры «ОЧБР» (Огромный Человекообразный Боевой Робот), знакомой нам по фантастическим фильмам, играм и аниме. Уже сегодня мы видим первые признаки появления таких роботов в виде экзоскелетов, которые когда-то казались чем-то из области научной фантастики. Но об этом мы поговорим как-нибудь в другой раз, а сегодня давайте сосредоточимся на гуманоидных роботах.

Следует учитывать разницу между антропоморфными и гуманоидными роботами, хотя эти термины иногда используются как синонимы. Антропоморфные роботы имеют некоторые черты, напоминающие человеческие, но не обязательно полностью повторяют форму человека. Антропоморфизм используется для упрощения взаимодействия с людьми или для выполнения функций, где человеческие черты полезны (например, манипуляция объектами).

Гуманоидные роботы – это машины, имитирующие

анатомию и физиологию человека. Их антропоморфная конструкция позволяет им выполнять задачи, требующие взаимодействия с людьми или работы в среде, созданной для человека. Они применяются для тестирования человеко-машинных интерфейсов, исследований в области искусственного интеллекта или выполнения задач в условиях, адаптированных для людей. Их способность имитировать человеческие движения и адаптироваться к нашему окружению делает их уникальными и многофункциональными помощниками.

Таким образом, гуманоидные роботы — это подкатегория антропоморфных, но с более строгими требованиями к сходству с человеком по форме и по функциям.

3D-печать: свобода форм и скорость прототипирования

Один из ключевых факторов, ускоривших прогресс в создании роботов гуманоидного форм-фактора, — это 3D-печать. Раньше производство деталей для таких роботов было дорогим и трудоёмким процессом.



Наиболее популярные гуманоидные роботы в мире. Фото: Voronoi

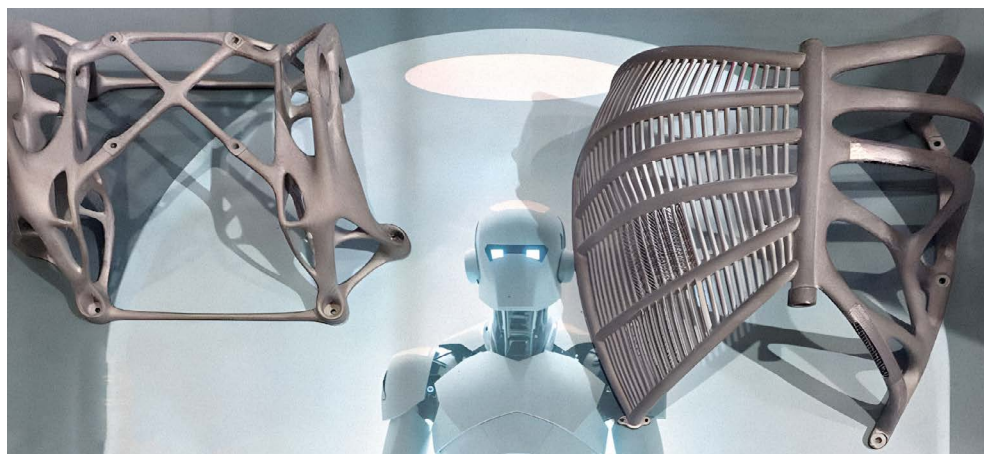
Каждый компонент требовал индивидуальной обработки, литья, шлифовки и сборки. Сейчас же 3D-печать позволяет создавать сложные детали за считанные часы. Несмотря на то, что не все компании открыто рассказывают о помощи аддитивных технологий в реализации их амбициозных проектов, стоит полагать, что абсолютно все из них используют 3D-печать на этапе прототипирования и отладки техпроцесса. Давайте рассмотрим некоторые из таких кейсов.

Apptronik

Компании Apptronik (США) и Argodesign разработали Apollo – гуманоид-

ного робота, который можно назвать «iPhone среди дроидов», своеобразное «противоядие от научно-фантастических штампов». Этот робот предназначен для выполнения задач на складах, таких как перемещение коробок и контейнеров. Робот высотой

172 см и весом в 72,5 кг способен поднимать грузы до 25 кг и работать до 4 часов на одной зарядке батареи. Apollo оснащен электрическими приводами, что делает его более надежным и удобным в обслуживании. Лаборатория компании ак-



Демонстраторы плечевого пояса и грудины для андроидов, напечатанные по технологии L-PBF. Фото: Bright Laser Technologies

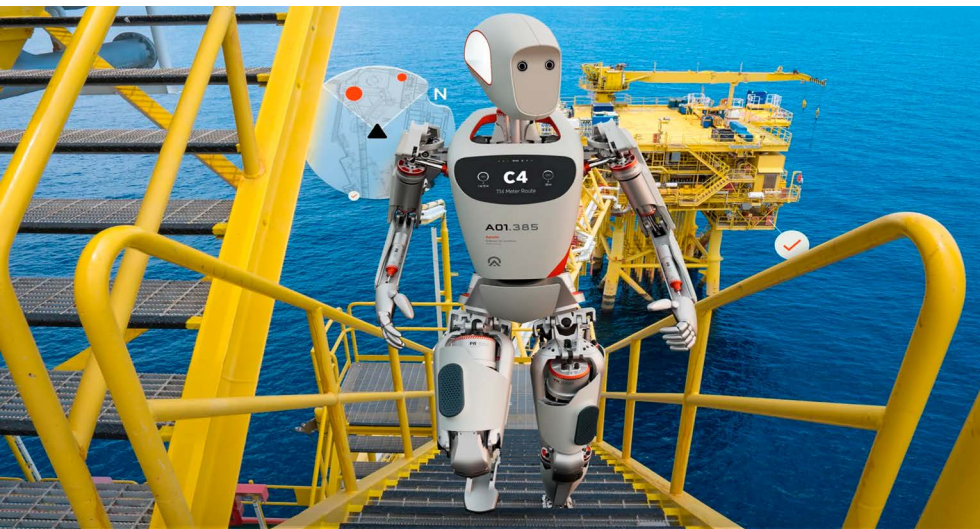
тивно использует 3D-печать для разработки прототипов и создания кастомных компонентов, которые улучшают функциональность и адаптивность роботов.

Безупречный дизайн Apollo, настолько гармоничный и «правильный», как у iPhone, своим внешним видом и функциональностью словно обрекает робота Optimus от Илона Маска выглядеть на его фоне дешевым косплейным автоматом из фильма «Я, робот». А Atlas от Boston Dynamics рядом с ним кажется неуклюжим гигантом. В общем, дизайнеры из Argodesign переосмыслили робототехнику и создали Apollo таким, чтобы он не оставлял людей равнодушными и при этом не отпугивал их.

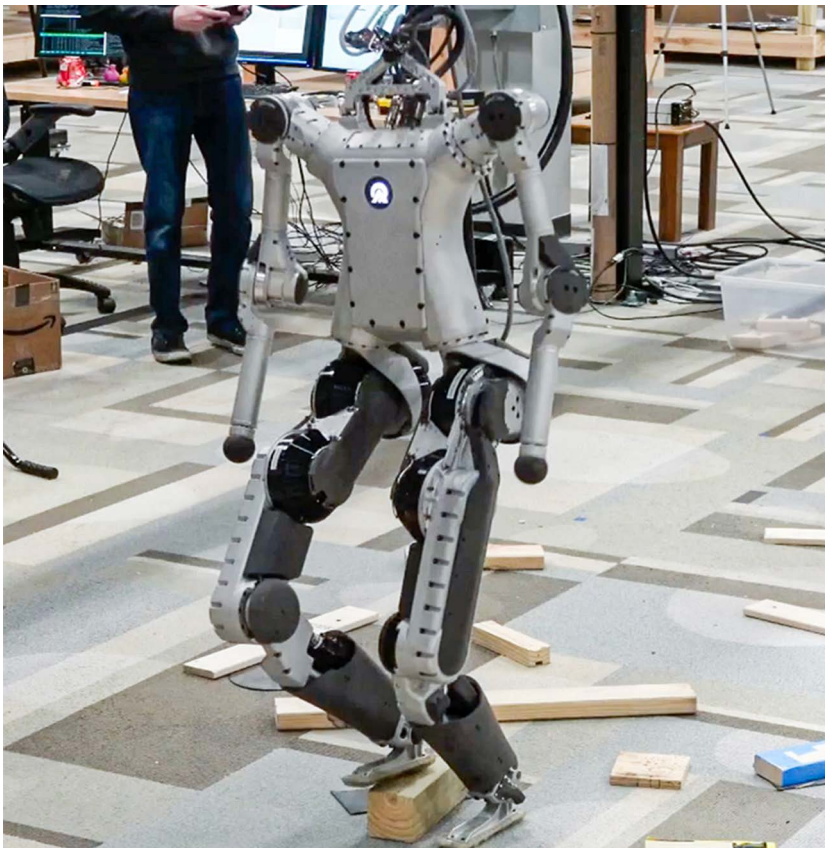
Недавно Arprtronik привлекла \$350 миллионов в рамках инвестиционного раунда, возглавляемого В Capital и Capital Factory, с участием Alphabet, материнской компании Google. Эти средства пойдут на масштабирование производства Apollo и расширение его применения в таких сферах, как уход за пожилыми людьми и здравоохранение. Это уже второй крупный пилотный проект Arprtronik, который последовал за заключенным в марте 2024 года партнерством, в рамках которого Apollo был запущен в производство на заводе Mercedes-Benz. В



Робот Apollo на складе. Фото: Argodesign



Робот Apollo на нефтяной платформе. Фото: Argodesign



Ранний прототип Arprtronik Quick Development Humanoid с напечатанными компонентами для тестирования и совершенствования алгоритмов ходьбы. Фото: Arprtronik



Роботы Agility Digit трудятся на складах, разгружая и загружая контейнеры. Фото: Agility

декабре 2024 года Apptronik объявила о сотрудничестве с Google DeepMind для разработки искусственного интеллекта для своих гуманоидных систем. Робототехнический стартап также сообщил, что начало массового производства запланировано на 2026 год.

Agility Robotics

Agility Robotics — это инновационная компания, основанная в 2015 году и базирующаяся в США. Она специализируется на разработке и производстве гуманоидных роботов, в том числе Digit и Cassie, которые предназначены для выполнения задач, требующих мобильности и взаимодействия с окружающей средой.

Компания активно развивает технологии управления роботами, представив платформу Agility Arc, которая по-

зволяет контролировать и координировать работу целых групп роботов, что особенно важно для логистических центров и складов.

В 2023 году Agility Robotics открыла завод RoboFab в Салеме, штат Орегон, где планируется массовое производство роботов Digit, способных перемещать грузы весом до 15,9 кг и адаптироваться к различным задачам. Роботы Digit уже тестируются в реальных условиях, например, на складах GXO Logistics, демонстрируя высокую эффективность в автоматизации процессов.

Figure AI

Figure AI Inc. — это американская компания, специализирующаяся на разработке человекоподобных роботов, она была основана в 2022 году Брэттом Адекоком, также известным

благодаря своим проектам Archer Aviation и Vetterly.

Первая модель робота, Figure 01, была представлена как универсальный гуманоидный робот, который выглядит и движется как человек. Он разработан для решения задач, связанных с физической работой, таких как логистика, производство и обслуживание. Его ключевые преимущества — автономность, способность к обучению и адаптации в реальных условиях.

В августе 2024 года компания представила улучшенную версию — Figure 02. Эта модель стала дальнейшим развитием предыдущей версии и была оптимизирована для более эффективной работы в промышленных условиях. Figure 02 отличается повышенной точностью движений, улучшенными алгоритмами обработки данных

InMoov

InMoov — это open-source проект робота-гуманоида, созданный французским скульптором и разработчиком Гаэлем Ланжевром (Gael Langevin). Проект стартовал в 2012 году и стал одним из первых в мире полностью открытых проектов робототехники, доступных для повторения и модификации тысячами энтузиастов по всему миру. Все файлы для 3D-печати, схемы, программное обеспечение и инструкции по сборке доступны бесплатно на официальном сайте проекта. Это позволяет любому человеку с доступом к 3D-принтеру и базовым навыкам в электронике собрать своего собственного робота. Робот поддерживает интеграцию с ИИ, что

Робот Figure 02. Фото: Figure AI Inc.

и возможностью работы в сложных средах – на складах или производственных цехах.

Figure AI активно привлекает инвестиции для развития своих технологий. К февралю 2024 года стартап привлек более 500 миллионов долларов США, а его оценка достигла 2,6 миллиардов долларов благодаря поддержке таких ключевых игроков, как Джефф Безос,

OpenAI и Nvidia. Эти средства направляются на расширение производственных мощностей и совершенствование продуктов. Кроме того, сотрудничество с крупными технологическими компаниями, в том числе Microsoft и OpenAI, открывает новые возможности для интеграции роботов Figure в экосистемы искусственного интеллекта и облачных технологий.



InMoov Photo L. Langevin

Открытый проект робота-гуманоида InMoov. Фото: L. Langevin



Гуманоид Youbionic X2. Фото: Youbionic

позволяет ему обучаться и адаптироваться к новым задачам. InMoov — это не просто робот, а глобальное движение, которое показывает, как технологии могут быть доступными, открытыми и вдохновляющими.

Youbionic

Ещё один зарубежный проект, который, возможно, не может похвастаться безупречным исполнением, как у компаний с практически неограниченным бюджетом, но он завоевал целую

армию поклонников благодаря использованию 3D-печати, открытого исходного кода и интуитивного управления. Речь о Youbionic, основанном итальянским инженером и дизайнером Федерико Сикарезе (Federico Ciccarese).

Youbionic предлагает гуманоида Youbionic с подвижной головой, ногами, руками, а также видеокурсы по проектированию, файлы для печати, чертежи и систему управления серводвигателями. Это уникаль-

ная возможность для любителей и профессионалов робототехники, желающих научиться создавать и программировать современных человекоподобных роботов.

Особого внимания заслуживают протезы Youbionic: они лёгкие, прочные и могут быть адаптированы под конкретные потребности пользователей.

Кто может сказать, сколько времени понадобится таким проектам, как InMoov и Youbionic, чтобы «прокачаться» благодаря поддержке множества энтузиастов и начать конкурировать с закрытыми и дорогостоящими разработками мировых гигантов?

Российские проекты

Российские разработки в области гуманоидных роботов активно развиваются, хотя пока уступают лидерам рынка, таким как Boston Dynamics или Agility Robotics. Тем не менее в России есть несколько заметных проектов и компаний, которые преуспели в создании человекоподобных роботов.

МФТИ

Московский физико-технический институт представил гуманоидного робота с ИИ, который может интегрироваться в человекоориентированную среду без необходимости пере-



Робот-гуманоид на футбольном поле МФТИ. Фото: МФТИ

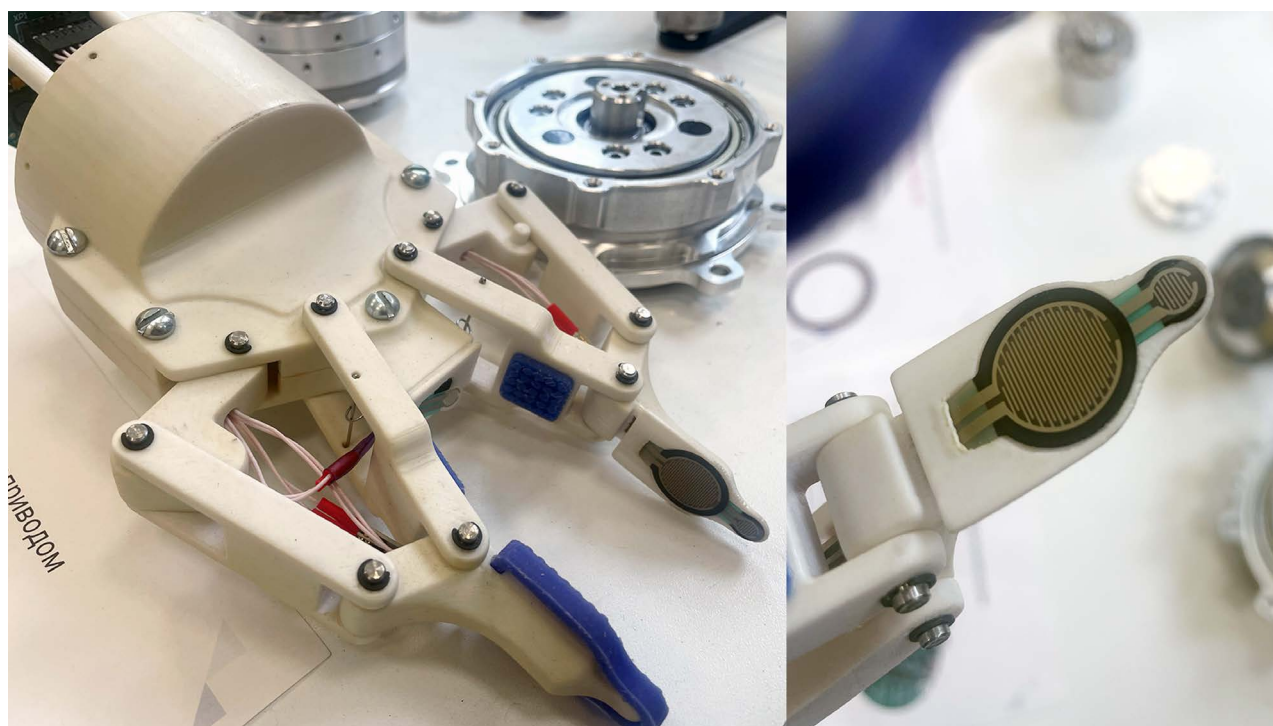
оборудования помещений. Робот оснащен системой компьютерного зрения и способен выполнять задачи курьера, сборщика или работника склада, включая

подъем тяжестей и навигацию по лестницам.

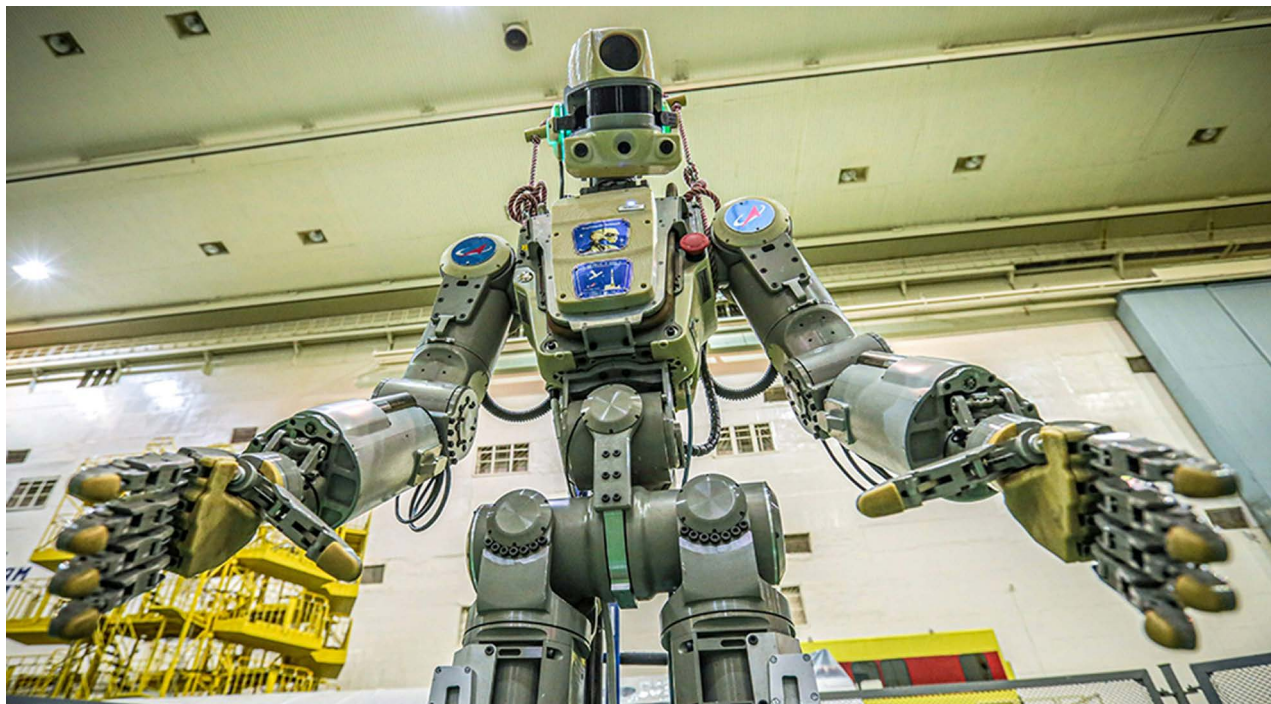
РТУ МИРЭА

В университете РТУ МИРЭА создана серия гума-

ноидных роботов для образовательных и исследовательских целей. Эти роботы ориентированы на выполнение рутинных задач, таких как мелкая логистика на



Робозахват с резистивным датчиком давления. Фото: МФТИ



Гуманоидный робот ФЕДОР. Фото: ООО «Андроидная техника»

заводах. В перспективе они могут использоваться для творческих задач, например, генерации контента.

ФЕДОР

ФЕДОР (*Final Experimental Demonstration Object Research*) — один из самых известных российских гуманоидных роботов, разработанный Фондом перспективных исследований (ФПИ) совместно с компанией «Андроидная техника». Робот с позывным Skybot F-850 был представлен в 2016 году и стал первым российским антропоморфным роботом, способным выполнять сложные задачи: он умеет стрелять, управлять автомобилем и работать с инструментами. В 2019 году ФЕДОР отправился на Международную космическую станцию (МКС) в рамках миссии «Союз МС-14», став первым

русским роботом, побывавшим в космосе. Однако проект вызвал много критики из-за ограниченной автономности и высокой стоимости. В проекте активно использовалась 3D-печать из высокоэксплуатационного hi-end пластика ULTEM.

Промобот

Хотя Промобот не является полностью гуманоидным роботом, он представляет интерес среди российских разработок в робототехнике. Этот проект ориентирован на сервисные применения, такие как помощь в навигации по общественным местам, информационное сопровождение и поддержка в сферах обслуживания. Однако в последние годы можно наблюдать тенденцию к поиску решений, объединяющих мобильность, искусственный интеллект

и гуманоидную форму для выполнения более сложных задач.

Neurobotics

Компания Neurobotics занимается разработкой роботов, управляемых через нейроинтерфейсы. Один из их проектов – гуманоидный робот, который может быть задействован в медицинских и образовательных целях. Особенность роботов Neurobotics заключается в том, что ими можно управлять с помощью сигналов мозга, что делает их ценными помощниками для людей с ограниченными возможностями

Да, российские гуманоидные роботы пока не дотягивают до уровня технологического совершенства лучших западных аналогов, таких как Boston Dynamics или Tesla Optimus, однако

отдельные проекты, например, ФЕДОР или Промобот, демонстрируют значительный прогресс. Основные направления их применения включают космическую отрасль, медицину, образование, промышленность и военную сферу.

Благодаря государственной поддержке и растущему интересу к робототехнике это направление в России продолжает развиваться. В ближайшие годы можно ожидать дальнейшей интеграции таких роботов в повседневные процессы и расширения их функционала за счёт внедрения технологий искусственного интеллекта.

Преимущества 3D-печати в робототехнике

А теперь поговорим более подробно о влиянии 3D-печати на разработку и производство гуманоидной и антропоморфной робототехники.

1. Технологическая осуществимость конструкторских идей. Производство легких и прочных деталей как на этапе быстрого прототипирования, так и для серии.

Одно из ключевых преимуществ аддитивных технологий – возможность создавать детали из материалов, близких или соответствующих по свойствам тем, что будут использоваться в конечном серийном изделии.

Широкий ассортимент материалов и их свойств позволяет разработчикам рассматривать 3D-печать как важный инструмент прототипирования, наделяя изделия такими выигрышными качествами, как легкость и прочность. Безусловно, самым логичным здесь будет использование полимеров с различными температурными и прочностными свойствами. Можно рекомендовать технологию FFF и композитные материалы, например, ABS, PETG, PC-ABS, поликарбонат, полиамид, ULTEM, PEEK.

Отличным подспорьем также будут порошковые технологии, такие как PBF/

SLS, MJF/SHS, ведь они позволяют обходиться без поддержек, ускоряя цикл получения деталей.

Технология L-PBF/SLM по металлам и сплавам на данный момент является практически безоговорочным лидером для прототипирования высокопрочных и нагруженных деталей, когда разработчик не имеет возможности воспользоваться станками с ЧПУ, писать программы и проектировать оснастку. Для 3D-печати компонентов робототехники можно рекомендовать алюминиевые сплавы для снижения веса и стальные сплавы для достижения высокой прочности.



Внешние элементы корпуса робота, напечатанные по технологии SLS. Фото: МФТИ

Применяйте облегчающие вес ячеистые структуры, которые можно использовать как в полимерах, так и в металлах.

И, конечно же, здесь можно сполна задействовать потенциал топологической оптимизации или генеративного проектирования, которые, помимо создания потрясающих воображение форм, также выполняют важную для инженера функцию – облегчение веса при сохранении основных эксплуатационных качеств.

Например, из пластика можно печатать детали внешних элементов корпуса, таких как защитные панели, в том числе для электроники, или декоративные элементы, которые также выполняют функциональные задачи. А из металла можно создавать детали, отвечающие за подвижность суставов, или корпуса, подвергающиеся большим нагрузкам. Кроме того, 3D-печать позволяет изготавливать детали со сложной геометрией, что особенно полезно для интеграции сенсоров, приводов и других компонентов в ограниченные пространства.

2. Снижение затрат на производство

Часто на этапе прототипирования важно не ограничивать себя в сложности геометрии деталей. В этом смысле классические технологии однозначно будут обходиться на порядок дороже, а сроки проектирования как рабочих прототипов, так и первой партии для испытаний могут повлиять на конкурентоспособность, масштабируемость производства и внимание инвесторов.

Традиционные методы производства – литье или механическая обработка – часто требуют значительных затрат на подготовку и настройку оборудования. Аддитивные технологии позволяют минимизировать эти затраты, особенно при небольших объемах производства. Такие технологии помогают оптимизировать процессы сборки и производства, в результате компании могут быстрее масштабировать выпуск роботов.

3. Возможности для персонализации

Аддитивные технологии позволяют создавать персонализированные версии роботов для разных клиентов и задач. Например, если робот должен работать в условиях

повышенной влажности, температуры, высокой нагрузки или химического воздействия, материалы и конструкции могут быть изменены без необходимости полного пересмотра производственного процесса. Поэтому в таких случаях необходимо переходить от доступных и универсальных материалов, таких как ABS, полиамид, стальные или алюминиевые сплавы, к PEEK и титану.

Например, роботов для логистических центров, таких как Amazon, можно адаптировать под конкретные условия работы. Роботы для тушения пожаров или обслуживания инфраструктуры химических производств требуют использования максимально дорогостоящих, но вместе с тем долговечных материалов, в то время как модели для исследовательских лабораторий могут иметь совершенно другие характеристики.

Безусловно, оборудование для аддитивных технологий в ЦАТ должно иметь возможность работы с высокоэксплуатационными пластмассами и реактивными металлами.

4. Экологическая устойчивость

Если 3D-печать даёт роботам тело, то ИИ — это их мозг. Без ИИ гуманоидный робот был бы просто марионеткой, способной выполнять только заранее запрограммированные действия.

Гуманоидные роботы должны быть не только физически гибкими, но и интеллектуально автономными. Им нужно уметь быстро переключаться между задачами, обучаться новым навыкам и взаимодействовать с людьми.

Использование аддитивных технологий снижает количество отходов, так как материал используется только там, где это необходимо. Это соответствует современным трендам на экологическую устойчивость и может быть важным аргументом для привлечения инвестиций и партнеров.

ИИ: мозг, который делает роботов «живыми»

Если 3D-печать даёт роботам тело, то ИИ — это их мозг. Без ИИ гуманоидный робот был бы просто марионеткой, способной выполнять только заранее запрограммированные действия. Робот учится ходить, как человек, но для этого ему нужно не только «чувствовать» опору, но и мгновенно адаптироваться к неровностям. Тут в игру вступают алгоритмы ИИ. Они анализируют данные с датчиков, предсказывают баланс и корректируют движения в реальном времени. Например, в современных гуманоидах ИИ помогает оптимизировать расположение внутренних компонентов, чтобы робот был устойчивым даже при быстрых поворотах. А еще ИИ используется при проектировании: он уже

способен успешно генерировать формы деталей, как, например, в нашумевшем проекте для ракетостроения LEAP71. Оптимизированные детали будут одновременно легкими и прочными, что особенно важно для ног или рук роботов.

Google, через свою материнскую компанию Alphabet, также активно инвестирует в развитие ИИ для гуманоидных роботов. После продажи Boston Dynamics в 2017 году Google возвращается на рынок робототехники, поддерживая такие компании, как Apptроник. Это подчёркивает их интерес к интеграции ИИ и робототехники.

Meta тоже не остаётся в стороне. В феврале 2025 года компания объявила о планах инвестировать в разработку ИИ-управляемых гуманоидных роботов. Новое подразделение Meta будет сосредоточено на создании потребительских роботов, использующих возможности их платформы Llama. Это ставит Meta в прямую конкуренцию с такими гигантами, как Google и Tesla.

Tesla, например, разработала робота Optimus, способного обучаться, наблюдая за

действиями человека. Это устраняет необходимость в явном программировании и позволяет роботу адаптироваться к новым задачам. Optimus предназначен для выполнения опасных, повторяющихся или скучных задач, которые обычно выполняют люди. Tesla планирует интегрировать таких роботов в процесс сборки автомобилей, что станет серьёзным вызовом для автоматизации.

Робот Figure 02 от стартапа Figure AI оснащен передовыми системами ИИ, что позволяет ему взаимодействовать с окружающей средой и выполнять сложные задачи без постоянного контроля человека. Это делает его особенно привлекательным для компаний, которые сталкиваются с дефицитом рабочей силы или стремятся автоматизировать трудоемкие процессы, например, где требуется мягко брать хрупкие предметы или крепко удерживать тяжелые.

Гуманоидные роботы – вызов для промышленной автоматизации?

Гуманоидные роботы, безусловно, представляют собой вызов для промышлен-

ной автоматизации, но этот вызов скорее вдохновляющий, чем пугающий. Они открывают новые горизонты, но одновременно ставят перед учёными, инженерами, и бизнесом сложные задачи. Давай разберёмся, в чём именно заключается этот вызов и как он может изменить будущее промышленности.

1. Гибкость против специализации

Традиционные промышленные роботы — это узкоспециализированные машины, которые отлично справляются с конкретными задачами: сваркой, покраской, сборкой деталей на конвейере. Они быстры, точны и надёжны, но их функционал ограничен. Гуманоидные роботы, напротив, задумываются как универсальные помощники, способные адаптироваться к разным задачам. Например, сегодня робот может собирать детали на конвейере, а завтра — помогать с упаковкой или даже ремонтом оборудования.

Однако именно эта универсальность и становится вызовом. Гуманоидные ро-

боты должны быть не только физически гибкими, но и интеллектуально автономными. Им нужно уметь быстро переключаться между задачами, обучаться новым навыкам и взаимодействовать с людьми. Это требует огромных вычислительных мощностей, сложных алгоритмов ИИ и, конечно, значительных инвестиций.

2. Сложность движений и баланса

Одна из главных проблем гуманоидных роботов — их анатомия. Двухногие роботы, как и люди, должны поддерживать баланс, что особенно сложно в условиях промышленного цеха, где много неровных поверхностей, препятствий и динамичных процессов. Например, робот Atlas от Boston Dynamics впечатляет своими акробатическими трюками, но его устойчивость в реальных промышленных условиях всё ещё остаётся под вопросом.

Кроме того, гуманоидные роботы должны быть способны выполнять тонкие манипуляции, например, закручивать болты или работать с хрупкими деталями.

Это требует не только точности, но и «чувствительности», которую сложно воспроизвести в машине. Современные технологии, такие как сенсорные датчики и ИИ, помогают решать эти задачи, но до идеала ещё далеко.

3. Экономическая целесообразность

Создание гуманоидных роботов — это дорого. Их разработка, производство и внедрение требуют значительных ресурсов. Для многих предприятий традиционные роботы остаются более выгодным решением, так как они дешевле и уже доказали свою эффективность.

Однако здесь есть нюанс. Гуманоидные роботы могут быть экономически оправданы в тех сферах, где требуется высокая адаптивность. Например, на небольших производствах, где задачи часто меняются, или в логистике, где робот должен уметь работать с разными типами грузов. Кроме того, с развитием технологий, таких как 3D-печать и ИИ, стоимость производства гуманоидных роботов постепенно снижается.

Современные технологии, включая аддитивные, уже интегрируются в разработку и производство роботов. Благодаря этому компании создают легкие, прочные и функциональные решения, способные работать в сложных условиях и взаимодействовать с людьми.

4. Безопасность и взаимодействие с людьми

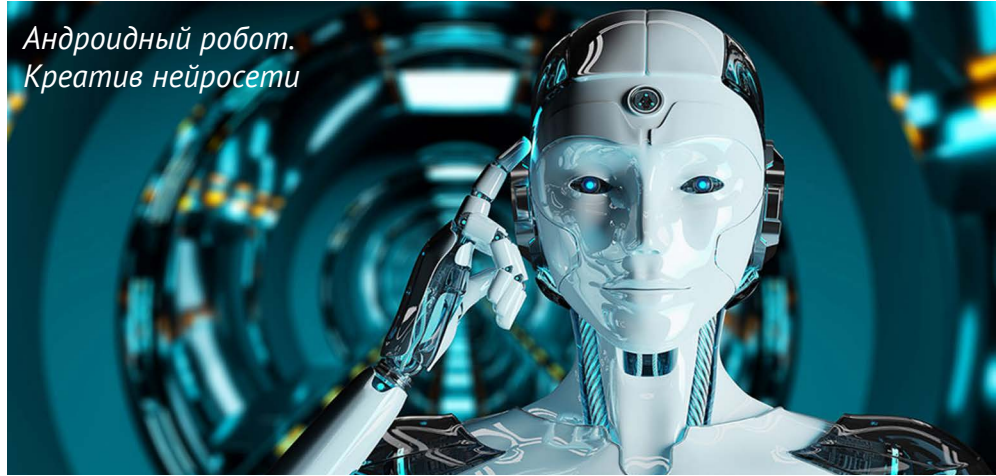
В промышленной автоматизации безопасность — это ключевой вопрос. Гуманоидные роботы, которые работают бок о бок с людьми, должны быть абсолютно безопасными. Они должны уметь распознавать людей, предсказывать их движения и избегать столкновений. Это требует сложных систем компьютерного зрения, датчиков и алгоритмов, которые могут работать в реальном времени.

Кроме того, гуманоидные роботы должны быть интуитивно понятными для сотрудников. Если робот слишком сложен в управлении или требует специальных навыков, его внедрение может столкнуться с сопротивлением со стороны персонала.

5. Этические и социальные вопросы

С использованием в производственных процессах гуманоидных роботов связаны важные этические вопросы. Например, как их внедрение повлияет на занятость? С одной стороны, они могут взять на себя опасные или монотонные задачи, освобождая людей для более творческой работы. С другой — их массовое внедрение может привести к сокращению рабочих мест, особенно в странах с низкой стоимостью труда.

*Андроидный робот.
Креатив нейросети*



Кроме того, гуманоидные роботы, которые выглядят и ведут себя как люди, могут вызывать у сотрудников дискомфорт или даже страх. Это требует тщательной работы над их дизайном и механизмами взаимодействия с ними, чтобы роботы воспринимались как помощники, а не как угроза.

Гуманоидные роботы представляют вызов для промышленной автоматизации, но это скорее возможность, чем препятствие. Они открывают путь к более гибким, адаптивным и безопасным производственным процессам. Однако их успешное внедрение требует не только технологических инноваций, но и тщательного планирования, инвестиций и учёта социальных аспектов.

В конечном итоге, гуманоидные роботы — это не замена традиционной автоматизации, а её логическое продолжение. Они дополняют существующие технологии, делая их более универсальными и человекоориентированными. Воз-

можно, именно они станут ключом к следующему этапу промышленной революции.

Современные технологии, включая аддитивные, уже интегрируются в разработку и производство роботов. Благодаря этому компании создают легкие, прочные и функциональные решения, способные работать в сложных условиях и взаимодействовать с людьми. Это открывает новые горизонты для робототехники и её применения в различных отраслях — от логистики до исследований.

Симбиоз технологий: будущее уже здесь

Самое крутое — когда технологии объединяются. Допустим, 3D-принтер печатает часть тела робота, а ИИ сразу проверяет, насколько она подходит для заданных функций. Если что-то не так — подстраивает дизайн на лету. Это как живой организм, который эволюционирует прямо в процессе создания. В итоге получаются роботы, которые не только двигаются естественно, но



*Андроидный робот.
Креатив нейросети*

и обходятся дешевле, чем их «традиционные» собратья. Кстати, именно так в Швейцарии строят дома с помощью роботов и 3D-печати — правда, там пока не гуманоиды, но принцип схожий.

Стартап Freeform Future Corp. разработал металлические 3D-принтеры, управляемые ИИ, они способны производить сложные металлические детали. Компания недавно привлекла 14 миллионов долларов США для строительства завода, где будут использоваться эти технологии.

В Японии компания ASD Robotics использует 3D-печать для создания гибких экзоскелетов, которые помогают пожилым людям передвигаться. Детали печатаются из полимеров, имитирующих мышечные волокна, а ИИ анализирует походку пользователя и корректирует поддержку в реальном времени.

В образовательных проек-

тах, как индийский MANAV, 3D-печать позволяет студентам собирать роботов из модульных частей, а ИИ-тренажеры учат их программировать движения через простые команды, как в видеоиграх. Стоимость гуманоида MANAV в разы ниже аналогов как раз благодаря 3D-печати, которая сокращает расходы на производство.

А в промышленности, например, на заводах Tesla, роботы с 3D-печатными манипуляторами используют ИИ для сборки деталей с точностью до микрона. Это сокращает брак и ускоряет производство.

Это яркие примеры того, как ИИ и 3D-печать объединяются для создания инновационных решений. Такой симбиоз открывает двери для массового производства гуманоидных роботов.

Что дальше?

Будущее гуманоидных роботов выглядит одновре-

менно пугающим и вдохновляющим. С одной стороны, мы можем оказаться в мире, где роботы станут неотъемлемой частью нашей повседневной жизни. С другой — это мир, полный возможностей для улучшения качества жизни, решения глобальных проблем и создания новых форм взаимодействия между человеком и машиной.

И кто знает, может быть, через пару десятилетий мы будем вспоминать нынешние технологии как первые шаги в эпоху, когда гуманоидные роботы стали такими же обычными, как смартфоны сегодня. А пока остаётся только наблюдать, учиться и, конечно, мечтать. Ведь именно мечты двигают прогресс. 

Дмитрий Трубашевский





Прочти
меня на
сайте

Медный L/E-PBF: на пути к масштабированию

Исключительная теплопроводность и электропроводность меди делают её востребованным материалом для аэрокосмической, электронной и энергетической отраслей. Однако её использование в технологиях Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) и Electron Beam Powder Bed Fusion (E-PBF) сдерживается высокой отражательной способностью, проблемами с отводом тепла и с пористостью.

С развитием аддитивных технологий, которые всё чаще занимают нишу масштабируемого производства, перед производителями встают вопросы: достаточно ли современных лазерных технологий, усовершенствованных порошков и инноваций в процессах для эффективного использования PBF в стабильной и высококачественной печати медными сплавами? И когда технологии PBF для меди смогут заменить традиционные методы, такие как литьё и механическая обработка? В этой статье мы попытаемся дать ответы на эти вопросы.

Спрос всё выше

В отличие от традиционного производства, PBF позволяет создавать сложные геометрии и облегчённые конструкции, которые повышают производительность и эффективность, одновременно сокращая отходы материала. Эти технологии также обеспечивают ускоренное прототипирование и сокращение производственных циклов, что уменьшает время вывода на рынок

критически важных компонентов.

Растущий спрос со стороны промышленности стимулирует разработку новых составов медных сплавов, адаптированных для АП. Например, сплав Cu-Cr-Zr с добавками Ti, Zr или Nb демонстрируют превосходную прочность и электропроводность. Важным достижением стало использование микролегирования для управления фазовыми превращениями. Исследования Ма и соавторов (2022) показывают, что добавление Y_2O_3 значительно увеличивает плотность дислокаций за счёт несоответствия между матрицей и наночастицами, обеспечивая существенный вклад в общую прочность материала.

Сплавы Cu-Ni-Sn также находятся в центре внимания благодаря своей коррозионной стойкости и механической прочности. Zhou и соавторы (2023) в своей статье продемонстрировали, что эти материалы можно эффективно использовать в электронике и теплообменниках благодаря уникальным комбинациям свойств. Добавление TiB_2 к

Cu-15Ni-8Sn уменьшает размер зерна и улучшает границы высокоугловых зёрен (HAGBs), что способствует синергии прочности и пластичности.

Сплавы Cu-Al с эффектом памяти формы также активно исследуются. Их уникальная способность «запоминать» форму после деформации делает их перспективными для ряда высокотехнологичных отраслей. При этом ключевыми задачами остаются управление текстурой и минимизация пористости. Даже малейшие изменения в составе могут кардинально повлиять на конечные характеристики. Например, добавление Cr или Nb позволяет достичь высокой прочности при сохранении проводимости благодаря выделению наночастиц (Kini и соавторы, 2020).

В аэрокосмической промышленности, где особенно ценятся высокая прочность и лёгкость материалов, из медных сплавов печатают сопла ракет, системы охлаждения двигателей и теплообменники. В электронике и электротехнике при изготовлении печатных антенн, волноводов и радиаторов для схем востребованы их электропроводность и теплопроводность. В энергетике и промышленности с их использованием реализуют-



Рис. Примеры использования медных сплавов и композитов в аддитивном производстве

ся высокоэффективные решения для охлаждения, печатаются компоненты батарей и электрические контакты. В автомобильной промышленности эти материалы находят применение благодаря их коррозионной стойкости и механической прочности.

Особый интерес представляют перспективы создания многофункциональных материалов с уникальными свойствами. Например, использование градиентных композиций Cu-Ni позволяет создавать материалы с контролируемыми характеристиками (Que и соавторы, 2024). Кроме того, развитие новых источников лазерного излучения, таких как синие диодные лазеры, открывает новые горизонты для создания высокоплотных структур (Hori и соавторы, 2021).

Видим цель, но видим и препятствия

Несмотря на очевидные преимущества, масштабирование L-PBF для медных сплавов в промышленности тормозится в силу ряда технических стоп-факторов. Ключевые вызовы и возможные пути их преодоления представлены в следующей таблице:

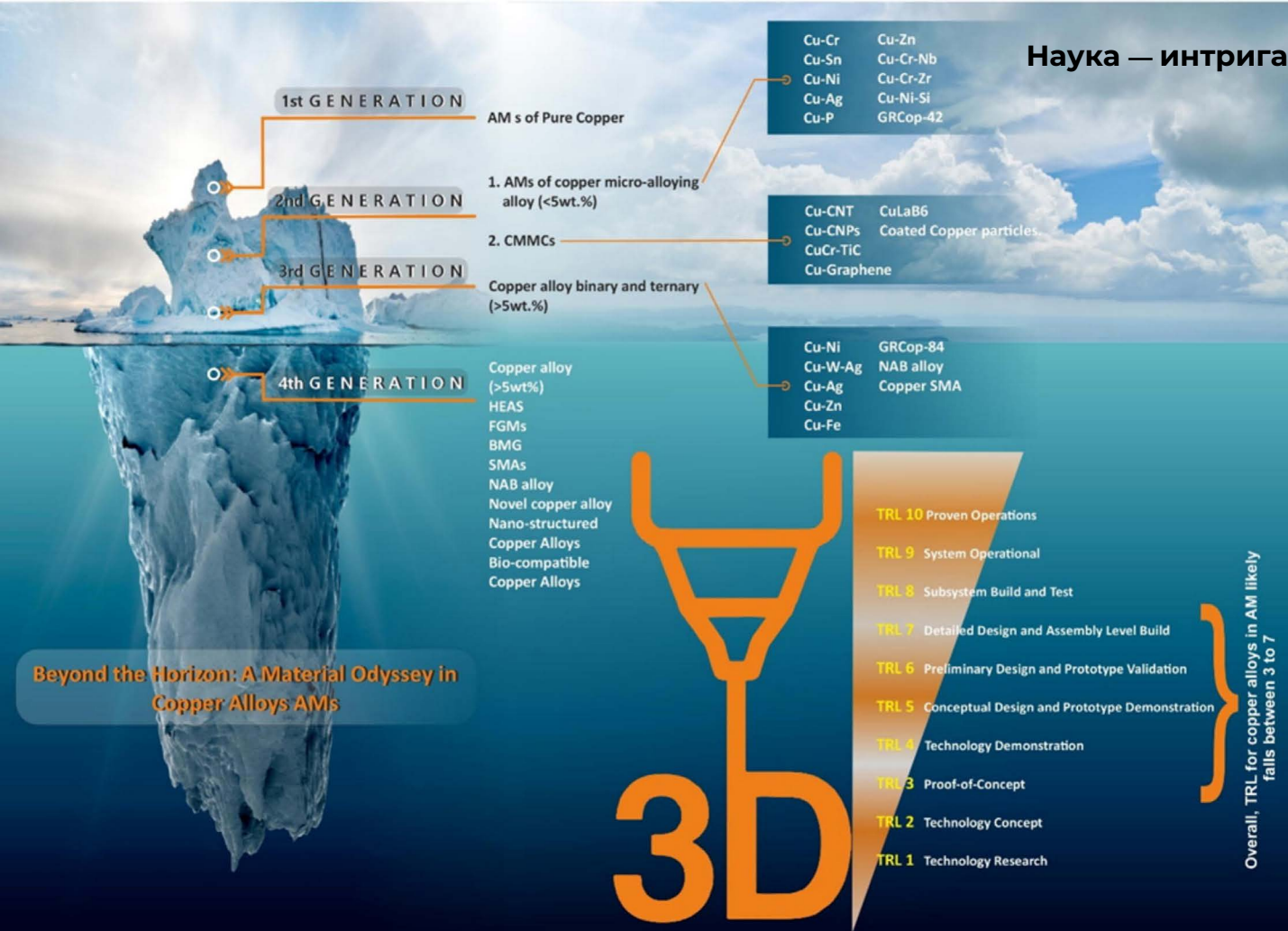


Рис. Эволюция медных сплавов для аддитивного производства и общие уровни готовности технологий (TRL). (CMMC: медный металлический композит; HEA: высокоэнтропийные сплавы; FGM: функционально-градиентные материалы; BMG: объемные металлические стекла; SMA: сплавы с памятью формы; NAB: никель-алюминиево-бронзовые сплавы)

Теперь рассмотрим эти вызовы подробнее.

• Дефекты структуры и их контроль

Одна из ключевых проблем — это дефек-

ты структуры: пористость, трещины и несплавленные частицы порошка. Пористость особенно критична, поскольку она напрямую влияет на механические свойства и

Проблема	Описание	Решение
Высокая отражательная способность и проблемы с поглощением.	Медь отражает ~95% инфракрасной лазерной энергии, что затрудняет её эффективное плавление в L-PBF.	Новые зелёные и синие лазерные технологии значительно увеличивают поглощение, что приводит к повышению энергоэффективности и снижению дефектов.
Теплопроводность и нестабильность расплавленной ванны	Высокая теплопроводность меди (~390 Вт/мК) вызывает быстрое рассеивание тепла, что приводит к неполному сплавлению и слабому сцеплению.	Более высокая мощность лазера и оптимизированные стратегии сканирования обеспечивают более глубокие и стабильные ванны расплава. Предварительный нагрев платформы минимизирует термические напряжения и растрескивание.
Пористость, трещины и дефекты окисления	Газовая пористость из-за захваченного кислорода и испаряющихся элементов ослабляет механическую целостность.	Улучшенная защита инертными газами (аргон, азот, вакуумная обработка) снижает окисление и загрязнение.
Сыпучесть порошка и доступность материала	Медный порошок склонен к окислению и плохой сыпучести, что влияет на качество печати и плотность деталей	Достижения в области газо- и плазменно-атомизированных порошков улучшают согласованность и надёжность в L-PBF

долговечность изделий. Точный контроль параметров процесса, таких как мощность лазера и скорость сканирования, позволяет минимизировать этот дефект. Однако даже при соблюдении всех условий полностью устранить пористость удастся редко.

Не меньше забот доставляют трещины горячей и холодной усадки, возникающие из-за быстрого охлаждения материала. Несплавленные частицы порошка также остаются актуальной проблемой, снижая качество конечного продукта. В статье Chen и соавторы (2024) выявили несколько типов трещинообразных дефектов в многослойных структурах: внутри зоны плавления, пересекающие границы зон плавления, распространяющиеся до подложки. Эти дефекты зависят от термофизических свойств материалов, таких как коэффициент теплового расширения (СТЕ), теплопроводность, теплоемкость и температура плавления.

• **Механические свойства и их оптимизация**

Механические свойства медных сплавов, полученных методом АП, варьируются в широких пределах. Прочность может достигать 600 МПа, а относительное удлинение — до 40 %. Электропроводность находится в диапазоне от 30% до 90% IACS (International Annealed Cu Standard, Международный стандарт отожжённой меди), и зависит как от состава сплава, так и от режимов термообработки. Важно отметить, что первый час старения значительно увеличивает предел прочности и предел текучести, но затем эти значения стабилизируются (Yang и соавторы, 2023).

Добавление различных элементов, таких как Cr или Nb, позволяет улучшить комплекс характеристик. Например, сплавы Cu–Cr–Nb демонстрируют высокую прочность при сохранении хорошей проводимости благодаря выделению Cr-наночастиц (Kini и соавторы, 2020). В статье Shen и соавторов (2022) показали, что модификация наночастицами TiC позволяет достичь высокой плотности

(более 96%) и улучшенных механических свойств.

Исследования показывают, что микроструктура материала играет ключевую роль в определении его свойств. Например, добавление Y₂O₃ к Cu–Cr–Zr увеличивает плотность дислокаций из-за большего несоответствия между матрицей и наночастицами, что вносит значительный вклад в общую прочность материала (Ma и соавторы, 2022). Размер зерна и морфология также важны: переход от столбчатых к равноосным зернам позволяет улучшить синергию прочности и пластичности.

• **Технологические параметры и их роль**

Ключевые параметры процесса — мощность лазера, скорость сканирования, размер пятна и толщина слоя порошка — оказывают значительное влияние на результат. Каждое изменение этих параметров может кардинально повлиять на свойства материала. Например, увеличение мощности лазера помогает уменьшить пористость, но одновременно повышает риск образования трещин (Gresco и соавторы, 2020). Поэтому поиск оптимального баланса остается одной из главных задач исследователей.

Интересно отметить, что использование синего диодного лазера мощностью 200 Вт для чистой меди позволяет создавать высокоплотные структуры (Hori и соавторы, 2021). Кроме того, стратегия многократного экспонирования снижает шероховатость верхней поверхности с 40 ± 5 до 9 ± 2 мкм (Lintel и соавторы, 2023). Это открывает новые возможности для создания деталей с улучшенными трибологическими характеристиками.

• **Многолазерные системы и гибридные подходы к производству**

Как показывает практика, результат применения технологии L-PBF улучшается за счёт многолазерных систем и лучшего управления лучом. Многолазерные установки L-PBF улучшают распределение энергии, повышая скорость печати и снижая дефекты.

L-PBF ПРОТИВ E-PBF:
КАКОЙ ПРОЦЕСС БОЛЕЕ МАСШТАБИРУЕМЫЙ?

Особенность/процесс	Лазерный L-PBF	Электроннолучевой E-PBF
Источник энергии	Инфракрасный, зеленый или синий лазер	Электронный луч
Эффективность поглощения	Низкий (для ИК-лазеров)	Высокий
Вакуум	Нет	Да
Температурный градиент	Высокий (больше трещин)	Ниже (меньше трещин)
Масштабируемость	Ограничено рассеиванием тепла	Более перспективно для более крупных деталей

А E-PBF предлагает лучшее управление теплом и снижение трещин, но требует вакуумной среды, что ограничивает его гибкость.

Гибридные методы АП, сочетающие L-PBF с прямым подводом энергии и материала DED, позволяют создавать более крупные и прочные конструкции с лучшим тепловым контролем.

Также всё большую роль в оптимизации процессов играют ИИ и машинное обучение. Мониторинг дефектов в реальном времени с использованием датчиков на основе ИИ позволяет адаптивно управлять параметрами печати. Модели машинного обучения предсказывают и предотвращают пористость, коробление и трещины, повышая успешность печати.

• **Последующая обработка**

Для улучшения свойств материала часто применяют дополнительную обработку. Горячее изостатическое прессование (HIP) помогает устранить пористость и улучшить плотность материала. Термообработка, включая закалку и старение, позволяет управлять микроструктурой и свойствами материала. Эти методы особенно важны для сплавов Cu-Cr-Zr, где первые часы старения дают наиболее значительные улучшения (Yang и соавторы, 2023).

В статье Li и соавторов (2024) исследовали влияние горячего прессования иковки на микроструктуру и механические свойства сплавов Cu-3Ag-1Zr. Результаты показыва-

ли, что термообработка при 420°C снижает плотность дислокаций на 74%, а при более высоких температурах (500–550°C) наблюдается ее дальнейшее уменьшение.

Выводы и прогнозы

Итак, готов ли L-PBF к крупномасштабному производству медными сплавами? В целом – да, в сегменте премиальных высокосложных и ответственных применений, например, в аэрокосмической отрасли, радиоэлектронике, энергетике и медицине. И пока – нет, если речь идет о массовом производстве недорогих деталей. В данном случае затраты на процесс и масштабируемость остаются проблемами для широкого промышленного внедрения.

При этом отметим, что АП медных сплавов продолжает развиваться, предлагая уникальные возможности для создания материалов с новыми свойствами. Однако для полного раскрытия потенциала этой технологии необходимы дальнейшие исследования и разработки. Управление микроструктурой, контроль дефектов и оптимизация технологических параметров с использованием ИИ остаются ключевыми направлениями работы. Будущее этой области зависит от нашего понимания фундаментальных процессов и способности интегрировать новые технологии в производственные процессы. 

[Адаптированный источник.](#)

Светлана Бакарджиева



Прочти
меня на
сайте

КАТ

клуб
аддитивных
технологий

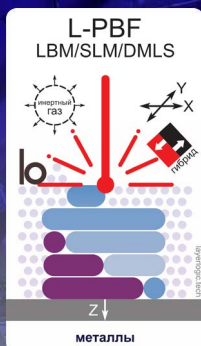
© 2024. Клуб аддитивных технологий.

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
(выход — май 2025)



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	+	+	+

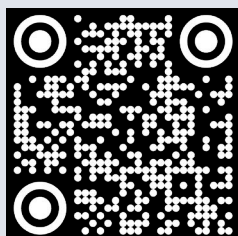


Комплектация	Минимальная	Оптимум	Максимальная
Потребители	Студии и мелкие производства	ЦАП базового уровня	ЦАП для ответственных задач и НИОКР
Сито для минусовой (минимальной) и плюсовой (максимальной) фракции	+	+	+
Сушильный шкаф для порошка (с возможностью подачи аргона для порошков из сплавов алюминия, 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 (акваблест)		+	+
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		+	+



ИНДУСТРИЯ



industry3d.ru



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