

«Полимерные материалы», № 6 (313), 2025, с. 31–35

Ниша серийного аддитивного производства свободна, или Даннинг с Крюгером подобрались незаметно

Дмитрий Трубашевский, эксперт аддитивных технологий, генеральный директор ООО «Синтезиум»

Павел Биленко, директор по развитию ООО «Синтезиум»

Мы часто слышим вопрос от заводских управленцев самого разного уровня, от начальников цехов и отделов до топ-менеджеров, включая генеральных директоров: «У нас серийное производство. Мы полностью задействовали все возможные ресурсы по управлению предприятием и с некоторых пор уперлись в потолок в плане производительности, качества, гибкости, конкурентоспособности. Помогут ли нам аддитивные технологии (АТ) выйти на новый уровень?».

Если бы этот вопрос обсуждался в какой-нибудь профильной группе в социальных сетях, мы уверены, что поток предложений был бы огромным. Однако далеко не все из них реально решали бы проблемы заказчика. Чаще всего это было бы перечисление ассортимента продуктов и материалов от разных компаний-разработчиков. В результате у задавших вопрос могло бы сложиться впечатление, что АТ у нас активно развиваются: есть множество производителей оборудования, программного обеспечения и компаний, предлагающих услуги для «чудесного преобразования» производственного процесса.

От обилия таких предложений может возникнуть ощущение, что мир уже давно ушёл вперёд, а вы по какой-то причине всё ещё используете устаревшие подходы из «эпохи динозавров». Однако мало кто готов дать гарантию, что внедрение конкретной

инновации действительно решит текущие задачи вашего предприятия.

В итоге компании зачастую всё же принимают решение о покупке оборудования для аддитивного производства (АП). И часто разочаровываются по причине нерационального подбора технологии и оборудования, спонтанности, отсутствия квалифицированного персонала с достаточным опытом проектирования, работы и обслуживания оборудования, а также быстрого устаревания 3D-принтеров, на смену которым уже через полгода могут прийти новые модели, а то и технологии с гораздо более высокими характеристиками.

Но важно понимать: это оборудование не начнёт сразу выпускать серийную продукцию. Чтобы это произошло, требуется время и серьёзная работа по интеграции технологий в существующие производственные процессы, адаптации персонала и налаживанию новых цепочек поставок.

То, что игнорировать прогресс нерационально, понятно каждому здравомыслящему предпринимателю, акционеру и управленцу. Но насколько АТ стали «своими» для промышленников, придерживающихся проверенных временем методов? Здесь возникает принципиальный вопрос, заставляющий задуматься: что на самом деле нужно современному промышленнику?

Крупные компании выбирают технологии и оборудование, которые обеспечивают надёжность, производительность и оптимальное соотношение затрат и эффективности. Одни из них ориентируются на максимальную выработку на одного сотрудника (не сокращая персонал) или на каждый квадратный метр производственной площади. Другие же стремятся к полной автоматизации процессов с минимизацией человеческого фактора благодаря сложно перенастраиваемой производственной конвейерной линии или находящейся в тренде гуманоидной робототехники. В обоих случаях без внедрения инноваций не обойтись.

Аддитивное производство может стать одной из таких инноваций. Оно способно частично решить задачи заказчика, особенно в сочетании с классическими методами (гибридный подход). Однако, несмотря на потенциал 3D-печати, в России пока мало успешных примеров применения для серийного производства. За рубежом таких примеров тоже немного, но они наглядно показывают, что при твёрдом целеполагании и визионерских способностях руководства или любого инициативного лидера проекты могут стать знаковыми для всей индустрии.

Вот лишь некоторые из них:

- 1 Форсунка для двигателей CFM International LEAP 1A и 1B, разработанная совместным предприятием компаний GE Aviation (ныне GE Aerospace) и Safran Aircraft Engines, была произведена

в количестве сотен тысяч единиц. В каждом двигателе используется 18 или 19 топливных форсунок, изготовленных методом АП с использованием технологии селективного лазерного плавления СЛП/L-PBF. Двигатели используются на авиалайнерах Airbus A220, A320neo, A321neo, Boeing 737 MAX и COMAC C919. Эта форсунка приобрела популярность благодаря агрегации 20 деталей в одну, что позволило снизить вес на 25 % и повысить топливную экономию до 15 % по сравнению с предыдущими моделями двигателей, такими как CFM56. Кроме того, прочность детали увеличилась в 5 раз благодаря использованию кобальт-хромового сплава и оптимизации конструкции, а также обеспечению устойчивости к высоким температурам до 1300 °С. Одним из самых значимых результатов для руководства компании стало снижение затрат на материалы и упрощение производственного процесса, что позволяет экономить до 3 миллионов долларов на каждом самолете. В 2021 году сообщалось, что детали успешно налетали более 10 миллионов часов.



Рис. 1 Напечатанная топливная форсунка (GE Aerospace)

- 2 ЕССО, в сотрудничестве со Stratasys и Henkel-Loctite, внедрила фотополимерную 3D-печать для создания форм, используемых в разработке и производстве уникальных подошв для своей обуви. Совместная разработка позволила создавать формы, выдерживающие более 1000 циклов впрыска без признаков износа. Новая технология обеспечивает значительное снижение затрат и ускорение процесса разработки по сравнению с традиционными алюминиевыми формами. Несмотря на то, что здесь мы говорим о печати единичной формы, она дает возможность также осуществлять серийное производство, избавляя от необходимости задействования инструментального производства.



Рис.
2 Индивидуализированная фотополимерная вставка в обувную пресс-форму (BUSINESS WIRE)

- 3 Компания Merit3D напечатала для Adhesive Technology 1 миллион кронштейнов для крепления смесительной насадки к тьюбику с эпоксидной смолой. Особенностью проекта явился вынужденный уход от затрудненной логистики с Китаем во время ковидных ограничений. Инженеры используют фотополимерную технологию LCD, материал от BASF, что позволяет обходиться без оснастки, менять форму кронштейнов и даже материал при любых новых обстоятельствах.



Рис. 3 Серийное производство кронштейнов для крепления смесительной насадки (Merit3D)

- 4 Компания GE Additive произвела более 100 000 напечатанных ацетабулярных чаш для тазобедренных суставов по технологии электронно-лучевой плавки ЭЛП/Е-PBF с 2007 по 2018 год. Технология ЭЛП предлагает множество преимуществ для производства многих медицинских имплантатов. Она обеспечивает высокую прочность и точность изделий, свободу проектирования и снижение стоимости производства вплоть до 50 %, что делает ее предпочтительным выбором по сравнению

с традиционными методами производства в области медицины и других высокотехнологичных отраслей.



Рис. 4 Производство ацетабулярных чаш по технологии ЭЛП (GE)

- 5 Проект Michelin по производству металлических ламелей с использованием 3D-печати начался в 2017 году и успешно продолжается до сих пор. Ежегодно производится один миллион ламелей для пресс-форм шинной продукции. В результате скорость производства партии сократилась с недель до дней, отходы материала снизились на 20 %, а затраты на производство — на 30–50 %, увеличилась производительность и эффективность шин на дорогах благодаря производству ламелей с индивидуальными характеристиками, срок службы шин увеличился на 10–15 %.



Рис. 5 Пресс-форма с ламелями и готовая шинная продукция (AddUp)

Не правда ли, такие примеры способны подвигнуть многих промышленников пересмотреть их отношение к 3D-печати и поставить его на один уровень с классическим производством? Почему же достоинства АТ часто недооцениваются? Одна

из причин — поверхностное восприятие АП, вызванное недостаточной осведомлённостью о его возможностях, а также ошибками интеграторов и производителей.

Мы неслучайно начали с ярких примеров, чтобы уже в начале статьи помочь читателю открыть для себя новые перспективы. Возникает вопрос: хватит ли сил, знаний, опыта, времени и инвестиций для реализации таких проектов у тандема «классических» промышленников и организаций, работающих в сфере АП? Этот вопрос в России поднимается нечасто.

Тем не менее примеры серийного производства в мире с использованием 3D-печати существуют, и они далеко не единичны.

Для многих отечественных промышленников важнее всего видеть примеры, реализованные в России, а не за рубежом. Это логично: в условиях санкций предприятия вынуждены работать с отечественными партнёрами. Если у таких компаний нет опыта в подобных проектах, то становиться первопроходцем и сталкиваться с трудностями готовы далеко не все.

Отечественный опыт успешного внедрения АТ уже есть, и эти примеры могут стать ориентиром для тех, кто готов сделать шаг вперёд и использовать 3D-печать для выхода на новый уровень.

Почему серийное производство с использованием 3D-печати пока не стало массовым в России? Несмотря на глобальный интерес к АТ, в России их серийное применение остается скорее исключением, чем правилом. Основная причина кроется в незрелости отечественного рынка. Да, можно найти отдельные успешные примеры внедрения, однако они лишь подчеркивают ограниченность и фрагментарность развития данной отрасли. Даже на мировом уровне зрелость АТ остается дискуссионной темой: она во многом зависит от отрасли, географии и уровня технологического развития.

Готова ли Россия к массовому внедрению промышленного АП? Ответ — «да», но с оговорками. На сегодняшний день применение АТ в нашей стране остается избирательным и сосредоточено лишь в нескольких ключевых секторах: авиация, космонавтика, медицина (хирургия, стоматология, протезирование), оборонно-промышленный комплекс (ОПК). Также наблюдаются первые попытки интеграции АТ в топливную отрасль. Однако эти примеры скорее демонстрируют усилия по освоению технологий, чем их широкую доступность и масштабируемость.

Основными барьерами в этом можно назвать:

- Ограниченный доступ к передовым технологиям. Российские инженеры долгое время полагались на копирование лучших зарубежных решений. Однако с учетом современных геополитических условий и ограничений в доступе к западным инновациям, отечественная отрасль оказалась в изоляции, что замедляет ее развитие.

- Низкая готовность производственного бизнеса. Многие компании видят в АТ перспективы, но не всегда готовы вкладываться в дорогостоящие системы, срок устаревания которых может составить менее 3 лет. На мировом рынке это понимание уже привело к выборочному подходу: покупают системы, которые обеспечивают измеримую эффективность, часто в нишевых, но прибыльных применениях.

Чему учит зарубежный опыт? На Западе компании, которые используют АТ в серийном производстве, демонстрируют определенные успехи. Хотя лишь немногие предприятия вышли на плато их промышленного использования, инвестиции в высокопроизводительные системы дают бизнесу ощутимую отдачу. Это подталкивает компании к долгосрочному планированию и закладке бюджетов на модернизацию оборудования.

Для российского рынка урок очевиден: успех АТ напрямую связан с созданием устойчивой экосистемы — от доступных разработок и материалов до качественного сервисного обслуживания. Это требует системных инвестиций, грамотной стратегии и активного международного сотрудничества. Без этого серийное производство с применением 3D-печати так и останется точечной практикой, а не массовым явлением.

Например, сегодня технология селективного лазерного плавления L-PBF/SLM считается одной из самых зрелых для коммерческого применения. Это подтверждается использованием принтеров с большими рабочими зонами (свыше 1 метра по одной из сторон), высокой производительностью (от 4 до 64 лазеров) и активным внедрением в авиационной и медицинской отраслях, а также в ОПК.

Но представьте себе технологии, которые способны значительно повысить производительность даже уже зрелых решений при минимальных инвестициях. Такой прорыв неизбежно вызовет резонанс и откроет новые горизонты для промышленности.

AMPOWER Maturity Index: Metal AM 2024



Рис. 6 Диаграмма технологической зрелости АТ по металлу (Ampower, 2024)

Подобные технологии нового поколения, например, по работе с металлами и сплавами, находятся на пороге значительных изменений. Уже в ближайшее время они могут устранить ключевые недостатки существующих методов, таких как лазерное и электронно-лучевое плавление (L-PBF/E-PBF).

Одним из наиболее перспективных направлений является лазерная технология Area Printing, разработанная Seurat Technologies. Она представляет собой кардинальный апгрейд лазерного плавления, позволяя заменить десятки традиционных 3D-принтеров одной установкой. Это решение сочетает высокую производительность с возможностью точного масштабирования.

Еще одна инновация — безлазерная технология Metal Binder Jetting (MBJ/BJT), которая предлагает совершенно иной подход к работе с металлами. Вместо использования лазеров или электронных пучков, процесс основан на связующем веществе, что позволяет сократить затраты на оборудование и повысить производительность.

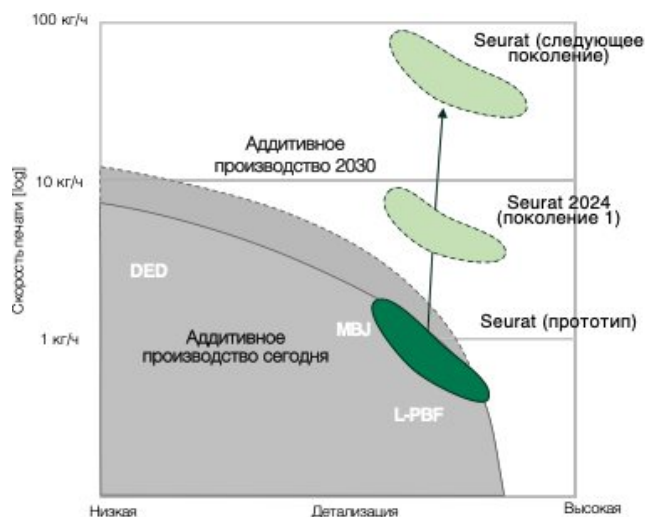


Рис. 7 Перспективы развития технологии Area Printing (Seurat)

		2024	2027	2030's
AREA PRINTING™ From Seurat	FEATURE SIZE: LAYER THICKNESS: SPEED: BED SIZE:	100µm 25-50µm up to 3.0 kg/hr 450 mm	75µm 25-75µm up to 30 kg/hr 1-2m	25-50µm 10-100µm 300-1,700 kg/hr 2-10m
L-PBF Laser-Powder Bed Fusion	FEATURE SIZE: LAYER THICKNESS: SPEED: BED SIZE:	150-500 µm 25-75 µm up to 2 kg/hr 800mm	100-500 µm 25-100 µm up to 4 kg/hr 1.2m	75-500 µm 25-100 µm up to 5 kg/hr 2m
DED Directed-Energy Deposition	FEATURE SIZE: LAYER THICKNESS: SPEED: BED SIZE:	1,000-2,000 µm 500-6,000 µm up to 6 kg/hr 1 to 5m	750-5,000µm 500-6,000µm up to 15kg/hr 1 to 7m	500-10,000µm 500-8,000µm up to 30kg/hr 1-10m
BINDER JETTING	FEATURE SIZE: LAYER THICKNESS: SPEED: BED SIZE:	1,000 µm 30-200 µm up to 3 kg/hr 400 x 250 x 200mm	~500µm 30-200µm up to 5 kg/hr 600 x 500 x 350mm	~500µm 30-200µm up to 8 kg/hr ~1m

Рис. 8 Сравнение ключевых характеристик и потенциала развития популярных АТ и технологий нового поколения (Seurat, Ampower)

Однако для их внедрения потребуется подготовить соответствующую инфраструктуру, развить инженерное мышление и провести длительные испытания. Только тогда современные лазерные и электронно-лучевые технологии, которые сегодня считаются максимально зрелыми, могут оказаться в категории «устаревших».

Но пока этого не произошло: российский рынок не создаёт принципиально новые решения, а идёт по проверенному пути, сформированному в те времена, когда границы были открыты для посещения международных выставок и общения с коллегами из науки и бизнеса. Проще говоря, сегодняшние технологии в России — это результат планомерного, а иногда и хаотичного развития с опорой на мировой опыт прошлых лет.

В таких странах, как США, ЕС и Китай, государственная поддержка ИТ, искусственного интеллекта и инноваций в производстве создала благоприятную среду для появления

множества стартапов с перспективными решениями. Этот подход стимулирует конкуренцию и ускоряет внедрение передовых технологий.

В России ситуация отличается. Отечественные разработчики часто вынуждены наблюдать за успехами зарубежных коллег со стороны, порой с завистью, но не обсуждают это открыто. Их позиция объяснима: в условиях ограниченного рынка они сосредоточены на продвижении собственных решений, стараясь убедить промышленников в их идеальности и конкурентоспособности.

Вызовами для российских разработчиков являются высокая конкуренция в базовых технологиях, а также ограниченное развитие новых технологий. Особенно остро эти вызовы проявляются в сфере 3D-печати, где российские компании активно конкурируют за внимание промышленников, стараясь позиционировать свое оборудование и программное обеспечение как лучшие на рынке. Это порождает многочисленные дискуссии внутри профессионального сообщества и усиливает необходимость в поддержке инноваций на государственном уровне.

Нельзя утверждать, что Минпромторг РФ полностью игнорирует необходимость поддержки отечественных компаний в сфере АТ. Такая помощь действительно существует, но она пока не носит массового и системного характера. При этом ключевыми барьерами для развития отрасли остаются бюрократическая нагрузка (отчетность и долгие процедуры согласования) и недостаток частных инвестиций (инвесторы в России неохотно вкладываются в АТ, предпочитая проекты с быстрым и гарантированным возвратом средств. Для них критично видеть ясный бизнес-план: серийный продукт, который 3D-принтеры смогут выпускать стабильно и в течение многих лет).

Готовы ли российские компании к таким вызовам и барьерам? Далеко не всегда. А к чему же они готовы? Судя по многим кейсам и комментариям в профильных группах в соцсетях, они часто сосредоточены на... тюнинге! Тюнинг автомобилей? Лишь частично.

Технологии цифрового АП за более чем 40-летнюю историю прошли путь от быстрого прототипирования до полноценного промышленного сектора, ориентированного на выпуск конечных изделий и оснастки. Однако об этом знают далеко не все промышленники. Большинству на глаза чаще попадают проекты и детали, которые не имеют «взрослых» атрибутов: серийности, точности, повторяемости, эксплуатационной эффективности. Показать им такие атрибуты могут компании и эксперты, кто давно и успешно занимается продвижением промышленного АП.

Доступность технологий, особенно для работы с полимерами, породила целую армию мейкеров (DIY, сторонников движения «сделай сам»), а также школ, колледжей, университетов и студий

дизайна, использующих 3D-печать. Компании-разработчики 3D-принтеров, ориентированные на массовый потребительский сегмент, где требования к промышленному качеству минимальны, в своей рекламе делают акцент на индивидуальные прототипы, игрушки, интерьерные элементы, ремонт или тюнинг.



Рис. 9 Корпус для электроинструмента

Очевидно, что такой простой и пассивный подход вдохновляет индивидуалистов, которые получают в своё распоряжение своеобразный «швейцарский нож», способный справиться с практически любой повседневной задачей. В результате рынок наполняется предложениями от небольших студий и 3D-ферм, которые могут выполнить обратный инжиниринг (используя штангенциркуль, линейку или 3D-сканер) и выполнить единичные или мелкосерийные заказы, в основном из полимеров и композитов.

Центрам аддитивного производства (ЦАП) и студиям с системами 3D-печати по металлам повезло чуть больше. Помимо дорогостоящих принтеров, они нередко располагают высокоточными 3D-сканерами, а иногда и координатно-измерительными машинами или томографами. Некоторые из них могут позволить себе лаборатории для тестирования материалов, механическую обработку с ЧПУ и термообработку. Такие возможности открывают доступ к более сложным задачам. Сегодня заказчики всё чаще обращаются с запросами на ремонт вышедших из строя деталей, которые сложно заказать из-за санкций. Также популярны заказы на прототипы или пилотные партии продукции,

которая впоследствии будет изготавливаться традиционными методами (литье, штамповка, механическая обработка). Для целей испытаний, патентования или участия в отраслевых выставках бывает необходимо изготовить небольшое количество деталей, и сделать это быстро и без применения оснастки практически невозможно без АТ.

Отдельного внимания заслуживает использование топологической оптимизации или генеративного проектирования — это высший уровень мастерства для тех, кто понимает возможности АП. Здесь речь идёт о целенаправленной работе над созданием изделия с новыми потребительскими свойствами, соответствующими мировым стандартам.

Нельзя не отметить тот огромный вклад, который сделали и делают многочисленные производители и интеграторы аддитивного оборудования и решений для 3D-сканирования в России. Однако многие из них, будь то из-за недостатка опыта, знаний или из-за кажущейся простоты, сосредотачиваются на разрозненных проектах с намерением помочь каждому. Такие подходы, несмотря на многочисленные «успешные» истории, редко приносят ожидаемую инвесторами значительную прибыль. Большая часть времени уходит на ремесленную работу с каждым заказчиком, что не способствует масштабируемости. Промышленники, наблюдая за этим, начинают ошибочно считать, что АТ не подходит для серийного производства. Так незаметно проявляется пресловутый эффект Даннинга — Крюгера.

Кто мешает промышленным предприятиям глубже изучить потенциал АТ для производства? Формально — никто. Но готовы ли компании выделить на это ресурсы, а их руководители — углубиться в сложную техническую тему? В реальности многое зависит от уровня компетенции и подхода к управлению.



Рис. 10 Диаграмма с эффектом Даннинга — Крюгера

Новички и небольшие мастерские заполняют новостной фон красивыми, но единичными кейсами, которые больше подходят для саморекламы. Они с энтузиазмом показывают: «Вот что мы можем, и у нас есть ещё масса идей!». В то же время опытные специалисты, погружённые в решение сложных задач, остаются в тени и не создают яркой информационной повестки.

В результате складывается впечатление, что ниша серийного АП в России остаётся незаслуженно обделённой вниманием и практически свободной.

Пришло время её занять!

Авторский текст статьи. Впервые опубликована в «Монокле», № 4 (1372), 20 января 2025: monocle.ru/monocle/2025/04/nisha-serijnogo-additivnogo-proizvodstva-svobodna
Затем в журнале «Полимерные материалы», № 6 (313), 2025, с. 31–35: polymerbranch.com/articles/nisha-serijnogo-additivnogo-proizvodstva-svobodna
Иллюстрации: GE Aerospace, Business Wire, Merit3D, GE, AddUp, Ampower, Seurat Technologies.