



Еppur si muove, или забудьте все, что вы знали о классической 3d-печати

Д. С. Трубащевский
ООО «Современное оборудование», Москва, Россия

Главная цель аддитивного производства (АП) – это значительное повышение производительности серийного производства. Динамичное развитие аддитивных технологий (АТ) связано с перспективами их автоматизации при внедрении в конструкции станков модульных компоновочных решений. Рассмотрены схемы, в которых рабочий стол представляет собой важный элемент для автоматизации производства и увеличения производительности всего технологического комплекса. Использование круглого стола с полярными координатами может повлиять на производительность АП. Рассмотрены разные АТ, в том числе MJM, STEP, MoldJet, HSR, для демонстрации использования таких столов.

Ключевые слова: аддитивное производство, аддитивные технологии, 3d-печать, 3d-принтеры, автоматизация, роботизация, серийное производство, декартова система координат, полярная система координат, мультиматериальность, пьезоэлектрические головки, ротационная 3d-печать, 3d-печать электронных компонентов, носимая электроника

Статья получена: 05.07.2022

Статья принята: 04.08.2022

ВВЕДЕНИЕ

Ошибочно приписываемая Галилео Галилею фраза: «Еppur si muove! И все-таки она вертится!», как и многие красивые легенды без фактов и доказательств, сегодня прочно прижилась в народе.

Еppur si muove or Forget Everything You Knew About Classic 3D Printing

D. S. Trubashevskiy
Modern Equipment LLC, Moscow, Russia

The main goal of additive manufacturing (AM) is to significantly increase the full-scale production capacity. The dynamic development of additive technologies (AT) is related to the prospects for its automation when integrating into the machine designs of the modular layout arrangements. The layouts are considered where the workbench is an important element for production automation and performance improvement of the entire process system. The usage of a round table with polar coordinates can affect the AM capacity. Various ATs are considered, including MJM, STEP, MoldJet, HSR, in order to demonstrate application of such workbenches.

Keywords: additive manufacturing, additive technologies, 3d printing, 3d printers, automation, robotic process automation, full-scale production, cartesian reference system, polar coordinate system, multi-materiality, piezoelectric heads, rotational 3d printing, 3d printing of electronic components, wearable electronics

Received on: 05.07.2022

Accepted on: 04.08.2022

INTRODUCTION

Like many wonderful legends without any facts and evidence, at present a phrase “Еppur si muove! Albeit it does move!” erroneously attributed to Galileo Galilei has firmly taken root in the folklore. However, I want to give some amazing examples with the evidence of 3D printing systems with specific layout that are successfully functioning today and that can be confidently indicated as the developments that make a significant contribution to the dynamic world of additive manufacturing. Why am I talking about classic 3d printing in the title of this article? The fact is that the last few



Однако я хочу привести удивительные примеры с доказательствами успешно функционирующих сегодня систем 3d-печати с особой компоновкой, которые можно с уверенностью назвать разработками, вносящими весомый вклад в динамичный мир аддитивного производства. Почему в названии статьи я говорю про классическую 3d-печать? Дело в том, что несколько последних десятилетий позволили первым аддитивным технологиям укорениться и стать определенного рода классическим стандартом нового производства и новых изделий независимо от бренда-разработчика 3d-принтера. Сегодня же мир АТ продвинулся далеко вперед и может похвастаться новыми разработками, которые по причине инерционности рынка пока не имеют достойной популярности. Давайте условимся, что обсуждать в данной статье мы будем промышленные или профессиональные производственные системы, которые отличаются в лучшую (кроме цены) сторону от настольных 3d-принтеров своей надежностью, качеством, универсальностью, точностью, габаритами и производительностью.

Позвольте начать немного издалека, но не с надоевших всем историй первого появления ручной, а потом и цифровой технологии послойного синтеза объектов. Любой завод интересуют новые управленческие, цифровые и производственные технологии получения рентабельной продукции с их быстрой диффузией без значительной трансформации рутинных операций. Это зачастую происходит в самом начале пути их непрерывного совершенствования, если таковую цель ставит менеджмент завода. В дальнейшем же менеджмент может рискнуть и пойти на глобальные изменения с прорывными решениями, что точно заставит нервничать и активно включиться в работу по трансформации технологии производства многие службы завода. Так вот на первых этапах руководство старается помочь отстающим отделам и процессам с помощью лоскутных (локальных) трансформаций. И поверьте, к технологиям 3d-печати приходят тогда, когда уже многое было испробовано, а ожидаемый эффект не был достигнут. И вот, тыдыщ! Наконец-то доходит очередь до АТ.

Долгий и скрупулезный анализ рынка позволяет сделать неутешительные выводы менеджментом завода: аддитивными технологиями сегодня невозможно полноценно заменить традиционные серийные технологии, но для опытного производства и отработки новых вариантов продукции рискнуть можно. Рискнули, зака-

decades have allowed the first additive technologies to gain ground and become a certain kind of classic standard for new production and new products, regardless of the 3d printing developing brand. Today, the world of AT has moved far ahead and can boast of new developments that have not grown popular yet due to the market persistence. Let us agree that in this article we will discuss industrial or professional production systems that differ for the better (except their price) from the desktop 3d printers in terms of reliability, high quality, versatility, accuracy, dimensions and performance.

Let me speak in a roundabout way, but not with the boring stories of the first occurrence of manual, and then digital technology of the layer-by-layer object synthesis. Any plant is interested in new managerial, digital, and production technologies for obtaining the cost-effective products with its rapid diffusion and without any significant transformation of routine operations. This often happens at the very beginning of their continuous improvement path, if that is the goal of plant management. In the future, such management can take a risk and be bent on global changes with the breakthrough solutions that will definitely make many plant departments nervous and actively involved in the production technology transformation. Thus, at the first stages, the management tries to help the lagging departments and processes using the patchwork (local) transformations. Believe me, 3D printing technologies are used when a lot of other methods have already been applied with no expected results. Boom! Finally, let's turn to AT.

The long-term and rigorous market research allows the plant management to draw disappointing conclusions: at present, it is impossible to completely replace the conventional commercial technologies with the additive ones, but you can take risks for pilot production and development of new product options. Thus, the management has taken a risk, ordered, set up, and tested. Then, the following narrative is used to justify the costs: bionic design – light weight – customization – compaction – aggregation... Possibly, during the entire production cycle of a unit/product (the shorter it is, the more pronounced the effect) the happy owner will receive a 1–10% cost/time reduction (depending on the AM scope used). However, what's done can't be undone.

A team of designers and engineers begins to transform the classic design and manufacturing skills and increasingly incorporates new engineering thought into their work that is embodied by the innovations of the 3D printing world. The stepwise progressive movement with innovations leads to the possible AM abandonment by the plant, since the AM was one way



зали, настроили, испытали... И вот для оправдания затрат звучит уже следующий нарратив: бионический дизайн – облегчение веса – индивидуализация – компактизация – агрегация... И, возможно, во всем производственном цикле узла/товара (чем он короче, тем эффект более ярко выражен) счастливый собственник получит 1–10% сокращения затрат/времени (в зависимости от объема использования АП). Но что сделано, то сделано.

Коллектив конструкторов и технологов начинает трансформировать классические навыки проектирования и производства и все чаще использовать в своей работе новое инженерное мышление, воплощаемое инновациями мира 3d-печати. Движение вперед шаг за шагом с инновациями – и завод уже может отказаться от АП, поскольку в КД и техпроцессы не мытьем, так катаньем было включено АП. Вот в этот самый момент и можно говорить о диффузии АП, ставшего неотъемлемой частью современного производства завода. Руководители отделов рапортуют об успехах топологической оптимизации конструкций, небывалых локальных экономических эффектах, компактном производстве деталей на минимальных площадях без использования инструментальной оснастки. Вроде все выглядит оптимистично, кто-то даже находит возможность для инвестиций для масштабирования производства. Но все ждут от АП немного другого...

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Главная цель АП – значительное повышение производительности для серийного производства. Для высокоразвитых стран АП – не что иное, как просто бизнес. Даже самый современный 3d-принтер у одного хозяина редко служит более 3–5 лет. За это время он успевает морально (редко физически) устареть и не отражает возможности АП в текущем моменте. Поэтому, чтобы оставаться в тренде и в рынке, промышленник избавляется от старых систем и приобретает новые.

В России все обстоит несколько иначе. Не секрет, что стоимость иностранного оборудования и материалов импортного производства, ввиду таможенных пошлин, логистики и налогов, может отличаться в 1,5–2 раза от цены закупки, соответственно окупаемость будет заметно дольше общемировой практики. Находить такие высокие инвестиции, несмотря на высокое качество продукции, но при отсутствии заметной окупаемости в 3–5 лет, крайне сложно: ведь здесь работают

or another integrated in the design documentation and technical processes. At this very moment we can talk about the AM diffusion that has become an integral part of the modern industrial production. The heads of departments report on the success of topological structure optimization, unprecedented local economic effects, space-saving production of parts on the small sites without the use of tooling equipment. It seems that everything looks optimistic, some people even find ways to invest for the production scaling. However, everyone expects something different from the AM.

INCREASED PERFORMANCE FOR FULL-SCALE PRODUCTION

The main AM goal is to significantly increase performance for full-scale production. For the highly developed countries, AM is nothing more than just business. Even the most advanced 3D printer with one owner rarely has the service life of more than 3–5 years. During this period of time, it manages to become functionally (rarely physically) obsolete and does not reflect the current AM opportunities. Therefore, in order to stay on track and be popular in the market, the industrialist has to get rid of old systems and acquire new ones.

In Russia, things are somewhat different. It is no secret that due to the customs duties, logistics, and taxes, the cost of foreign equipment and imported materials may differ by 1.5–2 times from the purchase price. Therefore, the pay-back period will be noticeably longer than in the global practice. It is extremely difficult to find such high investments, despite the high quality of products, but in the absence of a noticeable payback period of 3–5 years, since the business laws and regulations are applied in this situation. It is necessary to honestly recognize that in Russia the level of innovative developments, requiring the fastest and simplest production of critical components without tedious preparation is not high enough, and this fact affects the use of additive equipment. Therefore, the renewability of the fleet of expensive foreign-made systems in Russia is not the highest in the world. In other words, the Russian plants use the obsolete equipment for a long period of time, and this equipment is less accurate, convenient, and efficient.

But what about the Russian developers? Are they not capable of producing the systems that copy the capabilities of successful foreign manufacturers, with due regard to the obvious absence of customs duties and comprehensive logistics, the use of inexpensive Russian components? Will this make it possible to influence cheapening of the manufactured systems, and as a result, to increase the final product attractiveness due to the decreased cost of active fixed assets?

законы бизнеса. Также стоит честно признать, что в России недостаточно высокий уровень инновационных разработок, требующих максимально быстрого и простого изготовления ответственных компонентов без утомительной подготовки производства – а это все влияет на загрузку аддитивного оборудования. Поэтому обновляемость парка дорогих систем иностранного производства в России не самая высокая в мире. Другими словами, в России долго работают на устаревшем оборудовании, менее точном, удобном и производительном.

Позвольте, скажете вы, а как же российские разработчики? Разве не способны они производить системы, повторяющие возможности успешных зарубежных производителей, принимая во внимание очевидное отсутствие таможенных пошлин и сложной логистики, использования недорогих российских комплектующих? Позволит ли это повлиять на удешевление производимых систем и, как следствие, повысить привлекательность конечной продукции из-за снижения затрат на активные основные фонды? Вы будете правы: пожалуй, способны. Но давайте зададимся вопросом о настоящей мировой рыночной инновационности: присутствует ли она у российских разработок? Но что самое главное: показывают ли российские 3d-принтеры кратное увеличение производительности благодаря фирменным разработкам? Постарайтесь ответить на эти вопросы самостоятельно.

И наконец, раз уж мы стали с вами говорить на тему автоматизации серийного аддитивного производства будущего, то стоит обратить внимание на киберфизические (англ. Cyber-physical System) и модульные компоновочные решения как наиболее перспективные в этом смысле (рис. 1) [1].

You will be right: perhaps they are capable. However, let's ask ourselves the question relating to the real-world market innovativeness: is it available in the Russian developments? The most important question is whether the Russian 3D printers demonstrate a multiple performance improvement due to the proprietary developments? Try to answer these questions independently.

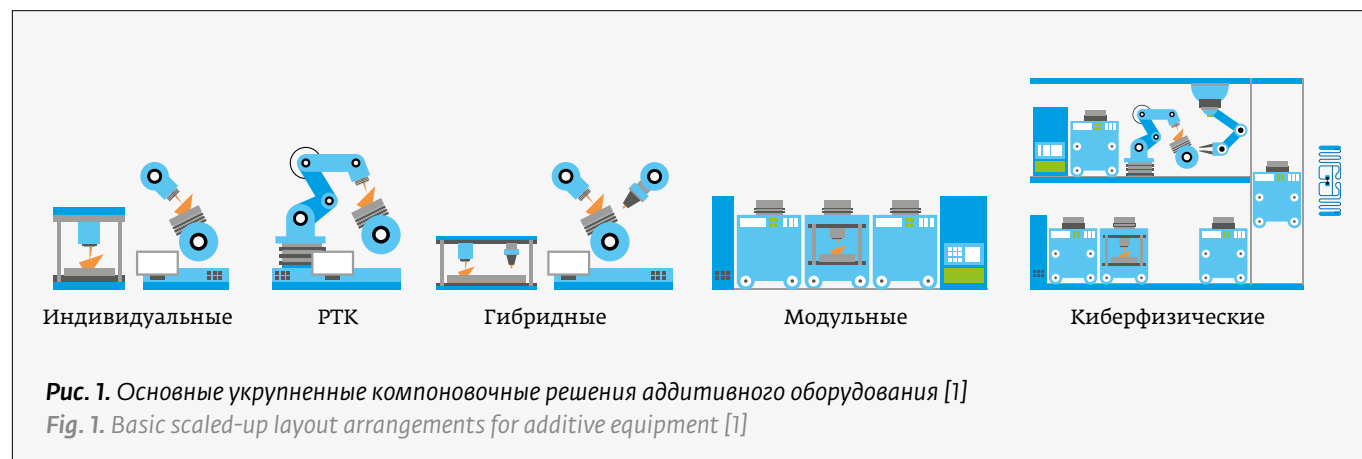
Finally, since we have begun to talk about automation of the future full-scale additive manufacturing, it is worth paying attention to the cyber-physical and modular layout solutions, as the most promising in this sense (Fig. 1) [1].

ABOUT WORKBENCHES AND PLATFORMS

For many people, the perception of professional and industrial 3D printers and printing of plastic, ceramic, sand and metal products is usually based on the image of a cartesian reference system with three linear axes, X, Y, Z, and the relevant square or rectangular workbenches. In this case, we are usually talking about 3d printing with 2.5d axes, namely the full-fledged mechanical work of the head along the X and Y axes. The table usually moves along the vertical Z axis to a predetermined layer height that is often uniform throughout the entire printing cycle. This is the simplest implementation of the 3d printing principle (Fig. 2-3) [2, 3].

However, there is another, less common principle, according to which the work table, and not the head, moves along the Y axis, or even along two XY/XZ axes, and the head moves along the remaining axis, for example, the Z axis (note: the Russian “desktop” additive manufacturers often use the disparaging term “twitch-table” to indicate this principle in their everyday life).

Let's not keep away from the LB-PBF/SLM, PBF/SLS, EB-PBF laser and electron beam technologies (Fig. 4), according to which the laser or electron beam, after appropriate preparation, is projected onto the working



О СТОЛАХ И ПЛАТФОРМАХ

Для многих восприятие профессиональных и промышленных 3d-принтеров и печати на них изделий из пластмасс, керамики, песка и металла чаще всего лежит в образе декартовой системы координат с тремя линейными осями X, Y, Z и соответствующими квадратными или прямоугольными столами. В этом случае обычно говорят о 3d-печати в 2,5d осях – полноценной механической работе головки по осям X и Y. Вдоль вертикальной оси Z обычно перемещается уже стол на заранее назначенную высоту слоя, часто одинаковую на всем рабочем цикле печати. Это наиболее простая реализация принципа 3d-печати (рис. 2-3) [2, 3].

Но есть и другая, менее распространенная схема, в которой именно рабочий стол, а не головка совершает движения вдоль оси Y или даже вдоль двух осей XY/XZ, а головка движется по оставшейся оси, например оси Z (Примечание: в обиходе российских «desktop»-аддитивщиков часто для обозначения данной схемы применяется пренебрежительный термин «дрыгостол»).

Не обойдем стороной лазерную и электронно-лучевую технологии LB-PBF/SLM, PBF/SLS, EB-PBF (рис. 4), в которых лазерный или электронный луч после соответствующей подготовки проецируется на рабочую поверхность стола с материалом, то есть выполняет всю работу по перемещениям вдоль осей X и Y.

Стол перемещается также по оси Z дискретно, на величину, равную высоте слоя. Более сложное представление уже предусматривает добавление одной или трех поворотных осей, вращающихся вокруг линейных осей. Такая схема свойственна для систем, наследующих компоновку классического портального или консольного ЧПУ оборудования.

Справедливости ради стоит отметить использование круглых вращающихся столов (поворотных) в таких технологиях, как:

- металлические DED-P (рис. 5), DED-W (рис. 5-6) (консоли, порталы, робототехнические комплексы (РТК)). Обратите внимание, что съемная платформа построения может иметь различный вид гео-

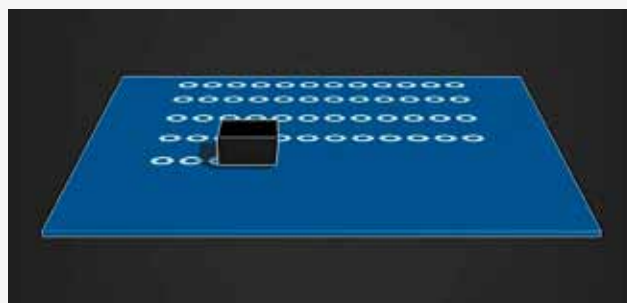


Рис. 2. Схема работы технологии MJM на прямоугольном / квадратном столе, компания dp Polar GmbH [2]

Fig. 2. Flow chart of MJM technology on a rectangular/square table, dp Polar GmbH [2]



Рис. 3. Процесс работы принтера по технологии MJM/PolyJet на ткани, компания Stratasys Inc. [3]

Fig. 3. Working process of MJM/PolyJet printer using fabric, Stratasys Inc. [3]

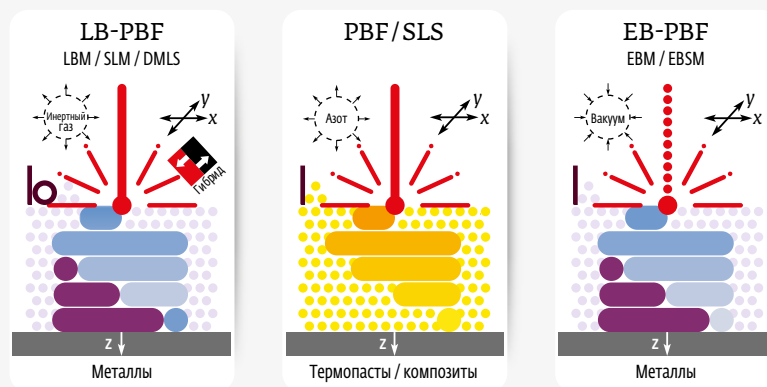


Рис. 4. Схемы использования в АП поступательно движущихся столов [1]

Fig. 4. Schemes of using translational tables in AM [1]

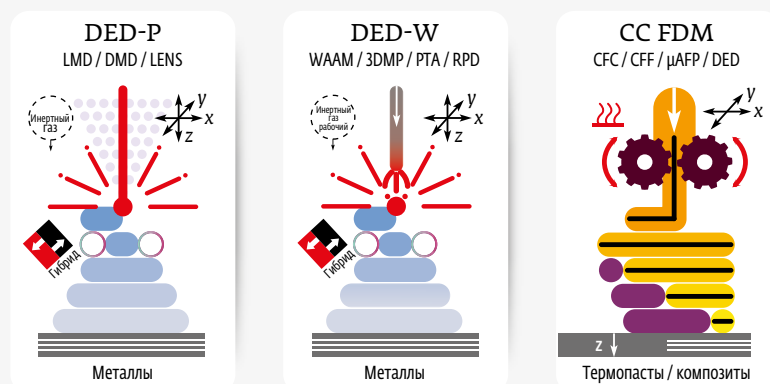


Рис. 5. Схемы использования в АП круглых вращающихся столов [1]

Fig. 5. Schemes of using round turntables in AM [1]

метрической фигуры при условии соблюдения допустимых отклонений формы плоских поверхностей;

- металлическая LB-PBF (рис. 4) и пластиковая SLS с круглыми колодцами (обычно это более доступные по стоимости решения, но не предлагающие столы с большими габаритами);
- пластмассовая и композитная FDM/CFC (ПТК) (рис. 5).

Такие столы сводят к минимуму износ и вибрацию всех компонентов оборудования, что положительно влияет на надежность системы и качество получаемых изделий.

Тем не менее все эти круглые столы чаще всего используются лишь для удешевления и удобства использования нескольких осей в ограниченных габаритах станка. А как же полярная система координат, в которой каждая точка на плоскости определяется двумя числами – полярным углом и полярным радиусом? Технологии DED-P, DED-W, FDM/CFC могут ее использовать, хоть полярная система и не совсем удобна в работе для инженера. Остановит ли это безумного до идей ученого или разработчика?

Ну что ж, кажется, теперь мы готовы поговорить о самом главном.

ПРЕДТЕЧИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА БУДУЩЕГО

Итак, повышение производительности до уровня классических технологий – едва достижимая, но привлекательная цель для любой АТ. Как этого можно достичь в перспективе нескольких десятилетий? Рецепта вы, скорей всего, не найдете. Но никто не мешает нам представить АП будущего,

surface of the table with the material, that is, it performs all movements along the X and Y axes.

The table also moves discretely along the Z axis, by a value equal to the layer height. A more comprehensive layout already implies the addition of one or three rotary axes that rotate around the linear axes. Such a layout is typical for the systems applying the classic portal or console CNC equipment.

It is fair to note the usage of round rotary tables (turntables) in the technologies, such as:

- metal DED-P (Fig. 5), DED-W (Fig. 5-6) (consoles, portals, robotic systems (RS)). Please note that the

removable construction platform may have various shapes of geometric figures, subject to the allowable deviations of the flat surface shapes;



Рис. 6. Круглый поворотный стол на 3d-принтере Gefertec arc405, технология 3DMP/WAAM, компания Gefertec GmbH [4]

Fig. 6. Round turntable on a Gefertec arc405 3d printer, 3DMP/WAAM technology, Gefertec GmbH [4]



Рис. 7. Конвейерный тип стола с декартовой системой координат, технология STEP, компания Evolve Additive Solutions [6]
Fig. 7. Conveyor-type table with cartesian reference system, STEP technology, Evolve Additive Solutions [6]

или хотя бы один из его важных составляющих компонентов – вид рабочего стола и специфику его работы.

Чтобы лучше понять тенденции, давайте начнем с эпохальных разработок в хронологической последовательности. Мы не будем уделять много времени полному описанию техпроцесса, оставим это в качестве домашнего задания любознательному читателю.

Evolve Additive Solutions со своей технологией скоростной печати пластмассами STEP (англ. Selective Thermoplastic Electrophotographic Process) (рис. 7) появилась в 2017 году [5]. Сегодня АП как никогда близко к завоеванию значимой части рынка классического производства. Но произойти это должно только при увеличении скорости производства в десятки, а лучше в сотни раз. И вот как раз разработка Evolve Additive Solutions приближает нас к этому моменту.

Стол, правда, здесь движется линейно вдоль оси X вперед-назад и синхронизирован с вращением множества барабанов. Барабаны, в свою очередь, выполняют множественные функции, включая аккуратный перенос каждого слоя будущей детали с пленки на поверхность стола. При описании технологии STEP я всегда привожу пример с традиционной типографией, в которой печатные машины путем оттиска передают изображение на рулонный материал основы с использованием трафарета и формы посредством электрофотографии.

Здесь действует почти тот же принцип, только место трафарета занимает сам модельный и вспомогательный материал. Конечное изделие из технического аморфного или полукристаллического термопласта получается изотропным по всем трем осям с возможностью полноцветной печати

- metal LB-PBF (Fig. 4) and plastic SLS with round building chambers (usually these are more affordable solutions that do not offer the tables with large dimensions);
- plastic and composite FDM/CFC (RS) (Fig. 5).

Such tables (except of round building chambers for LB-PBF) minimize wear and vibration of all components of the equipment that positively affects the system reliability and quality of the resulting products.

However, all these round tables are most often used only for cheapening and ease of use of several axes in the small-scale machine. What about the polar coordinate system in which each point in the plane is determined by two numbers, namely the polar angle and the polar vector? The DED-P, DED-W, FDM/CFC technologies can use it, although the polar system is not very convenient for an engineer. Will it stop a scientist or a developer who is eager to elaborate ideas?

Well, it seems that now we are ready to talk about the most important thing.

FORERUNNERS OF THE FUTURE ADDITIVE MANUFACTURING

Thus, performance improvement to the level of conventional technologies is a barely achievable, but worthwhile goal for any AT. How can this be achieved over the course of several decades? You probably won't find any useful formula. However, no one bothers us to imagine the future AM, or at least one of its important components, namely the type of workbench and specifics of its operation.

To better understand the trends, let's start with the milestone developments in chronological order. We will not put a lot of time into a complete description of the technical process, we will give it as a homework to the inquisitive reader.

и печати мультиматериалами. Стоимость одной детали и качество поверхности сопоставимы с традиционным производством. Захватывает дух от всего этого, правда? Такие системы очень сложны в копировании (реверс-инжиниринге) и могут применяться исключительно в промышленных масштабах. Это почти то, что нам нужно: чрезвычайно быстро, относительно компактно, с возможностью печати действительно массивных деталей, учитывая большую длину стола. И что немаловажно, эта технология может быть защищена рядом нетривиальных патентов.

Компания Tritone Technologies основана в 2017 году [7]. Сердцем ее является уникальная гибридная технология MoldJet, совмещающая в себе 3d-печать по технологии под общим названием MJM (англ. Multi Jet Modeling), MBJ/BJT (англ. Metal Binder Jetting/Binder Jetting Technology) (рис. 8), и традиционной MIM/CIM (англ. Metal/Ceramic Injection Molding).

Это технологическое решение позволяет создавать с помощью пьезоэлектрической струйной головки послойно литейную форму из материала поддержки и тут же заполнять ее полости модельным материалом из металлополимерной (MIM) или керамополимерной (CIM) композиции. И такая инновационность в изобретении израильских разработчиков не единственная. Весь процесс происходит на карусели (рис. 9), состоящей из 4–6 платформ, попеременно заезжающих под устройство технологической операции (печать, первичная термообработка, контроль). Заявляется производительность от 220 см³ до 1600 см³ для систем Dim и Dominant соответственно [8, 9]. Здесь мы опять

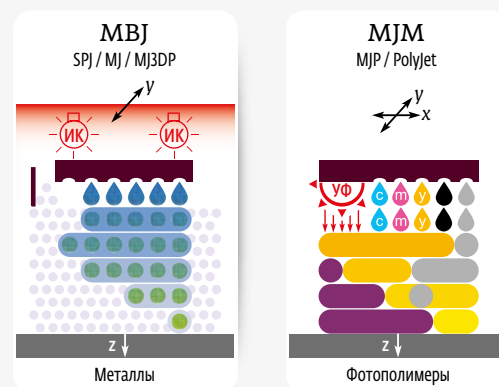


Рис. 8. Схема уникальной гибридной технологии на основе схем технологий MJM и MJB [1]

Fig. 8. MoldJet unique hybrid technology layout based on schemes of MJM and MJB technologies [1]

Evolve Additive Solutions with its STEP (Selective Thermoplastic Electrophotographic Process) technology (Fig. 7) became well-known in 2017 [5]. At present, AM is closer than ever to conquering a significant part of the traditional production market. However, this should happen only with an increase in the production rate by tens, and preferably hundreds of times. The development of Evolve Additive Solutions brings us closer to this moment.

However, in this case, the table moves linearly along the X axis back and forth and is synchronized with the rotation of multiple reels. The reels, in turn, perform multiple functions, including the neat transfer of each layer of the future part from the film to the work-



Рис. 9. Карусельный стол с декартовой системой координат технологии MoldJet (источник Tritone Technologies [10])

Fig. 9. Rotating wheel with cartesian reference system of MoldJet technology (source: Tritone Technologies [10])

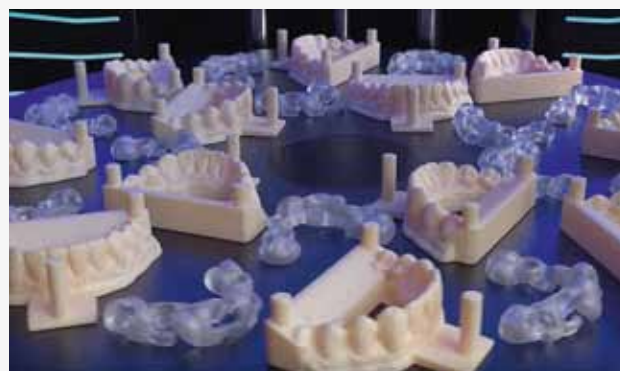


Рис. 10. Поторный стол с полярной системой координат 3d-принтера J5 DentaJet, компания Stratasys, Inc [11]

Fig. 10. Rotary table with polar coordinate system of J5 DentaJet 3d printer, Stratasys, Inc. [11]

наблюдаем вращение как логичный способ компактизации, ускорения и автоматизации серийного производства. Жаль, что процесс не является по-настоящему непрерывным, как в случае с фотополимерными смолами (поговорим об этом чуть позже), а дискретен по своей сути.

В 2021 году Stratasys, Inc преподносит сразу несколько сюрпризов в виде потрясающей концепции роторных (рис. 10) 3d-принтеров J5 DentaJet, J5 MediJet, J35 Pro, J55 Prime с полярной системой координат [11]. Представленные принтеры хороши во всем: потрясающий дизайн от дизайнеров BMW, унаследованный от FDM семейства F123, высокая производительность, мультиматериальность, надежность, компактность. В общем, все, что ждет самый требовательный потребитель от офисной цветной 3d-печати. Казалось бы – вот она концепция мечты принтера будущего! Однако ограничениями являются низкие эксплуатационные характеристики получаемых изделий из фотополимеров, а также недостаточно высокий уровень автоматизации.

Да простит меня дорогой читатель, но последний «фрукт» для нашего натюрморта несколько не соответствует ранее принятой хронологической последовательности моего повествования. Сделано это было намеренно для расстановки всех точек над «i» в конце данного обзора-исследования. Немецкая компания dp Polar GmbH [2] применяет технологию ротационной печати в полярных координатах High-Speed Rotative AM (HSR) с помощью пьезоэлектрических струйных печатающих голо-

bench surface. When describing the STEP technology, I always give the example of traditional printing process, according to which the printing machines deliver the image to a rolled base material by impression using a stencil, a mould and electrophotography.

Almost the same principle is applied in this case, but the place of stencil is filled by the build and auxiliary material. The final product made of technical amorphous or semi-crystalline thermoplastic is isotropic along all three axes with the possible full-color printing and multi-material printing. The cost per part and the surface quality are comparable to the traditional production results. It's very breathtaking, isn't it? Such systems are very difficult-to-copy (reverse-engineering) and can only be used on an industrial scale. This is almost exactly what we need: extremely fast and relatively small-footprint solution with the ability to print really massive parts, given the large table dimensions. It is significant that this technology can be protected by a number of uncommon patents.

Tritone Technologies was founded in 2017 [7]. Its heart is the unique MoldJet hybrid technology that combines 3D printing technology described by an umbrella term of MJM (Multi Jet Modeling), MJB/BJT (Metal Binder Jetting/Binder Jetting Technology) (Fig. 8), and traditional MIM/CIM (Metal/Ceramic Injection Molding).

This technological solution allows to make a layer-by-layer casting mold from the support material using a piezoelectric jet head and immediately fill its cavities with a build material made of a metalopolymer (MIM) or ceramic-polymer (CIM) composition. There is no only



Рис. 11. Процедура замены секции 3d-принтера AMpolar с полярной системой координат, компания dp Polar GmbH [15]

Fig. 11. Replacement procedure for the AMpolar 3D printer section with a polar coordinate system, dp Polar GmbH [15]



Рис. 12. Визуализация замены секции роторного стола технологии HSR, которая может осуществляться как человеком, так и ПТК, компания dp Polar GmbH [15]

Fig. 12. Visualization of the HSR rotary table section replacement to be performed both by a person and by the robotic system, dp Polar GmbH [15]

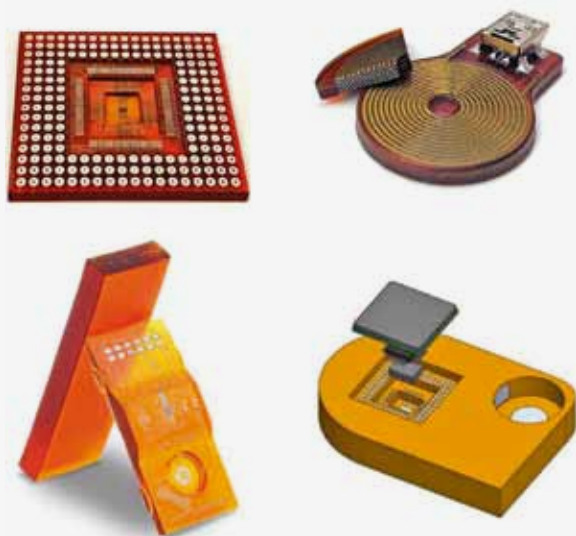


Рис. 13. Напечатанные компоненты электронных устройств АМЕ, компания (Nano Dimension Ltd [16])

Fig. 13. Printed electronic components, АМЕ (Nano Dimension Ltd [16])



Рис. 14. Компонент носимой электроники, полностью напечатанный на 3d-принтере, способный принимать форму тела человека или животного (Hansjörg Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering at Harvard University [17])

Fig. 14. A completely 3D printed wearable electronics component capable of taking the shape of a human or animal body (Hansjörg Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering at Harvard University [17])

вок Хаар 1003 английского производителя Хаар [12]. Конечно же, такие головки предназначены для технологии струйного нанесения фотополимеров MJM (подобная технология используется у 3d Systems, Inc – MultiJet Printing [13] и у Stratasys, Inc – PolyJet [14]).

Еще с 2019 года dp Polar заявила о себе как о компании, целью которой является покорение промышленного кастомизированного производства с помощью АТ. Заявляется скорость около 10 л/час с потенциальным объемом построения в будущем за один цикл, равным 700 л. Автоматизация решена здесь очень элегантным образом. Одна из восьми секций роторного стола в любой момент времени может быть заменена вручную или с помощью РТК на совершенно пустую или специально подготовленную для печати какого-либо функционального слоя или элемента (рис. 11–12). Далее секция может передаваться на следующую технологическую операцию, например растворения материала поддержки.

Компания dp Polar GmbH уже говорит о возможности использования ее систем AMpolar для мультиматериальной печати, включая 3d-печать электронных компонентов АМЕ (англ. Additive Manufactured Electronics) (рис. 13) на любых поверхностях и многослойных структурах токопроводящими чернилами и диэлектриками, включая

one such innovation in the invention of Israeli developers. The entire process takes place on a carousel (Fig. 9), consisting of 4–6 platforms that are alternately moved under the process device (printing, primary heat treatment, control). The declared efficiency is 220 cm³ – 1600 cm³ for the Dim and Dominant systems, respectively [8, 9]. In this case we see rotation as a logical method of compaction, acceleration and automation of full-scale production. It is unfortunate that the process is not truly continuous, as in the case with photopolymer resins (we will talk about it a little bit later), but is inherently discrete.

In 2021, Stratasys, Inc. presents several surprises at once in the form of an amazing concept of rotary J5 DentaJet, J5 MediJet, J35 Pro, J55 Prime 3D printers (Fig. 10) with a polar coordinate system [11]. The presented printers are good at everything: stunning design from the BMW designers, inherited from the F123 family FDM; high capacity; multi-materiality; reliability; portability. In general, it has all properties that are expected by the most demanding consumer from the office color 3D printing. One would think that this is the dream concept of the future printer! However, the limitations are the low performance parameters of the resulting products made of photopolymers, as well as an insufficiently high level of automation.

Forgive me, dear reader, but the last “fruit” for our still life does not correspond to the previously accepted



носимую электронику (англ. Wearable Electronics) (рис. 14). Именно эта концепция, по моему мнению, может лежать в основе разработки принтера будущего.

ВЫВОДЫ

Сегодня мы становимся свидетелями не прототипов и демонстраторов, а достойных серийных 3d-принтеров, предтеч будущего АП, совмещающих в себе мультиматериальную и многокомпонентную печать (пластмассы, электроника, металлы, керамика) за один технологический цикл, например с помощью пьезоэлектрических головок. При чем автоматизация логично и успешно решена или будет решена с помощью РТК. Такое безлюдное производство вполне может занять свое место в цифровых «фабриках будущего», освобождая человека от рутинного труда.

Воспользуются ли такими решениями разработчики систем для серийного аддитивного производства? Как они будут решать вопросы автоматизации? Пожалуй, у нас остается два варианта: покорно ждать ответы на свои вопросы или вступить в ряды разработчиков, с самого начала нацеливаясь на решения для комплексной автоматизации аддитивного производства.

REFERENCES

1. Trubashevskiy D. S. *Additivnye zarisovki ili resheniya dlya tekhnologii, kto ne hochet prodolzhat' teryat' den'gi.* – Voronezh: Izd. «Umnое proizvodstvo». 2021. ISBN 978-5-600-02999-6. Трубащевский Д. С. *Аддитивные зарисовки или решения для тех, кто не хочет продолжать терять деньги.* – Воронеж: Изд. «Умное производство». 2021. ISBN 978-5-600-02999-6.
2. URL: <https://dppolar.de>
3. URL: <https://www.stratasys.com/en/3d-printers/printer-catalog/3d-printer-tech-style/>
4. URL: <https://www.gefertec.de/>
5. URL: <https://www.evolveadditive.com/our-history/>
6. URL: <https://vimeo.com/392962837>
7. URL: <https://tritoneam.com/about-us/> URL: <https://tritoneam.com/wp-content/uploads/Tritone-Dim-Product-Sheet-1.pdf>
8. URL: <https://tritoneam.com/wp-content/uploads/Tritone-Dominant-Product-Sheet.pdf>
9. URL: <https://youtu.be/PT5MrHKSQHE>
10. URL: <https://youtu.be/bVsTOMzLN5o>
11. URL: <https://www.xaar.com/en/news/2020/xaar-1003-printhead-delivers-for-industrial-3d-printing>
12. URL: <https://www.3dsystems.com/multi-jet-printing>
13. URL: <https://www.stratasys.com/en/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/polyjet-technology/> URL: <https://youtu.be/FHig5EqQnY>
14. URL: <https://www.nano-di.com/>
15. URL: <https://wyss.harvard.edu/news/low-cost-wearables-manufactured-by-hybrid-3d-printing/>

АВТОР

Дмитрий Трубащевский, Директор по продажам, ООО «Современное оборудование», Москва, Россия.
ORCID: 0000-0002-0295-9835

chronological sequence of my story. It has been done intentionally to make meaning perfectly plain at the end of this review. The German company dp Polar GmbH [2] uses the rotational printing technology in polar coordinates titles “High-Speed Rotative AM (HSR)” using the piezoelectric ink-jet print heads Xaar 1003 by Xaar [12]. Of course, such heads are designed for the MJM inkjet photopolymer deposition (a similar technology is used by 3D Systems, Inc. – MultiJet Printing [13] and by Stratasys, Inc. – PolyJet [14]).

Since 2019, dp Polar has purported to be a company aimed to conquer the industrial customized manufacturing using the AT. The declared rate is about 10 l/h with a potential future build volume of 700 l per cycle. Automation is implemented in a very elegant way. One of the eight sections of the rotary table at any time can be replaced manually or by RS with a completely empty one, or with a section specially prepared for printing any functional layer or element (Fig. 11–12). Further, the section can be transferred to the next process stage, for example, for the support material dissolution.

dp Polar GmbH is already talking about the possible usage of its AMpolar systems for multi-material printing, including 3D printing of AME (Additive Manufactured Electronics) electronic components (Fig. 13) on any surfaces and multilayer structures with the conductive inks and dielectrics, including any wearable electronics (Fig. 14). In my opinion, this concept may lie at the root of the future printer development.

CONCLUSIONS

At present, we are witnessing not the prototypes and demonstrators, but the worthy commercial 3D printers, the forerunners of the future AM, combining the multi-material and multi-component printing (plastics, electronics, metals, ceramics) in one process cycle, for example, using the piezoelectric heads. Moreover, automation is logically and successfully implemented or will be implemented using the robotic systems. Such unmanned production may well take its place in the digital “plants of the future”, while relieving a person from routine work.

Will the system developers for full-scale additive manufacturing take advantage of such solutions? How will they solve the automation issues? Perhaps we are left with two options: to obediently wait for the answers to our questions or to join the ranks of developers, from the very beginning zeroing in on the comprehensive automation solutions for additive manufacturing.

AUTHOR

Dmitriy Trubashevskiy, Sales Director, Modern Equipment LLC, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0002-0295-9835