

Карусельный стол с декартовой системой координат, аддитивная технология MoldJet (источник: Tritone Technologies)



«И ВСЕ-ТАКИ ОНА ВЕРТИТСЯ!», ИЛИ ЗАБУДЬТЕ ВСЕ, ЧТО ВЫ ЗНАЛИ О КЛАССИЧЕСКОЙ 3D-ПЕЧАТИ

Д. С. Трубашевский, руководитель подразделения «Аддитивные технологии» ООО «Современное оборудование» (Москва)

В данной статье читателей ждут удивительные примеры с доказательствами успешно функционирующих систем 3D-печати с особой компоновкой, которые можно с уверенностью назвать разработками, вносящими весомый вклад в динамичный мир аддитивного производства (АП), и своего рода предтечами АП будущего. Но почему тогда в названии статьи говорится про классическую 3D-печать? Дело в том, что несколько последних десятилетий позволили первым аддитивным технологиям (АТ) укорениться и стать определенным 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.

ВВЕДЕНИЕ

Ошибочно приписываемая *Галилео Галилею* фраза «*Errur si muove!*» («И все-таки она вертится!»), как и многие красивые легенды без фактов и доказательств, сегодня прочно прижилась в народе. Надеемся, что в будущем она приживется и по отношению к конструкции 3D-принтеров с ротационными столами. Но об этом подробнее в разд. 2 и 3. А сейчас 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. И позвольте начать немного издали, но не с надоевших всем историй пер-

вого 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 в практику 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 эту работу 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 наконец-то доходит очередь до АТ.

Долгий и скрупулезный анализ рынка позволяет сделать неутешительные для менеджмента завода выводы: АТ сегодня не могут полноценно заменить традиционные серийные технологии, но для опытного производства и отработки новых вариантов продукции рискнуть можно. Рискнули, заказали, настроили, испытали... И вот для оправдания затрат звучит следующий нарратив: бионический дизайн – облегчение веса – индивидуализация – компактизация – агрегация... И вполне возможно, что во всем цикле производства своей продукции (чем он короче, тем более ярко выражен эффект) счастливый собственник получит 1–10 % сокращения затрат и времени (в зависимости от объема использования АТ). 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. Идет движение вперед шаг за шагом с инновациями – и завод уже не может отказаться от АТ, поскольку в КД и техпроцессы не мытьем, так катаньем было включено АТ. Вот в этот самый момент и можно говорить о диффузии АТ, 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 АТ немного другого...

1. ЦЕЛЬ – ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Главная цель АТ на современном этапе – значительное повышение производительности серийного выпуска продукции, прежде всего за счет автоматизации. Для высокоразвитых стран АТ – не что иное, как просто бизнес. Даже самый современный 3D-принтер у одного хозя-

ина редко служит более 3–5 лет. За это время он успевает морально (редко физически) устареть и не отражает возможности АТ в текущем моменте. Поэтому, чтобы оставаться в тренде и на 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, чем принято в общемировой практике. Находить такие высокие инвестиции, несмотря на высокое качество продукции, но при отсутствии заметной окупаемости в 3–5 лет, крайне сложно: ведь здесь работают 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 импортных систем в России не самая высокая в мире. Другими словами, у нас долго работают на устаревшем оборудовании, менее точном, удобном и производительном.

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

▼ РИС. 1. Основные укрупненные компоновочные схемы аддитивного оборудования [1]

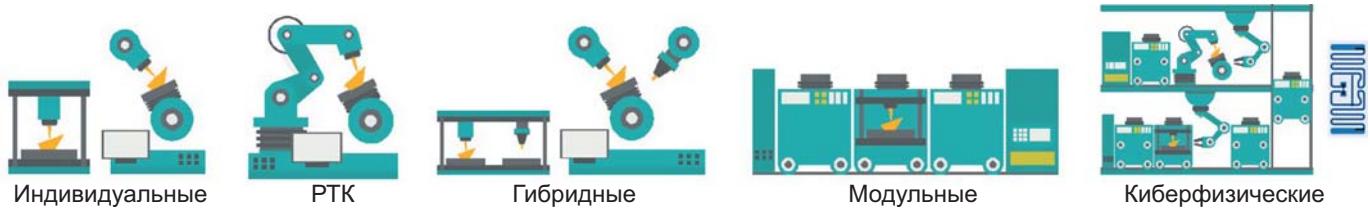


РИС. 2. ▶

Схема 3D-печати по технологии MJM на прямоугольном или квадратном столе, компания dp Polar [2]

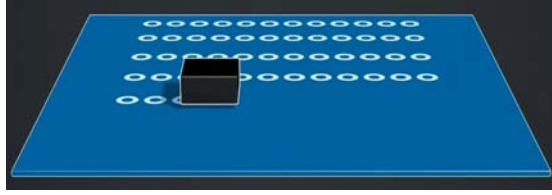


РИС. 3. ▶

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



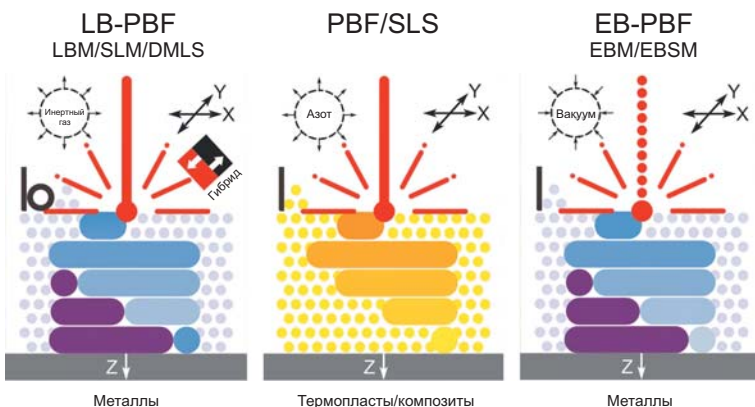
И наконец, если говорить на тему автоматизации серийного АП будущего, то стоит обратить внимание на киберфизические системы (Cyber-physical System) и модульные компоновочные решения как наиболее перспективные в этом смысле (рис. 1) [1].

2. 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 протяжении всего рабочего цикла печати. Это наиболее простая реализация принципа 3D-печати (рис. 2–3) [2, 3].

РИС. 4. ▼

Схемы АП изделий из различных материалов (указаны внизу схем) с использованием лазерной и электронно-лучевой АТ с поступательно движущимися столами [1] (графика: Д. С. Трубащевский)



Но есть и другая, менее распространенная, схема, в соответствии с которой именно рабочий стол, а не головка совершает движения вдоль оси Y или даже вдоль двух осей XY или XZ, а головка движется по оставшейся оси, например оси Z (в обиходе российских «десктоп»-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, т. е. выполняет всю работу по перемещениям вдоль осей X и Y (расшифровку приводимых здесь и в дальнейшем принятых англоязычных сокращений названий технологий 3D-печати см. в статье автора «Additive Minded Talks-2023: инновации в ответ на санкции», опубликованной в журнале «Полимерные материалы» № 3–4 2023 г. – Прим. ред.).

При этом стол перемещается дискретно по оси Z 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 (поворотных) столов в таких технологиях, как:

- металлические (работающие с металлом) DED-P (рис. 5), DED-W (рис. 5–6) (консоли, порталы, робототехнические комплексы (РТК)). При этом съемная платформа построения может иметь различный вид геометрической фигуры при условии соблюдения допустимых отклонений формы плоских поверхностей;
- металлическая LB-PBF (см. 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 (РТК) (см. 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

SLS 3D-принтеры: печать полимерами



ONSINT SM400
«Высокопроизводительный»



ONSINT SM300
«Промышленный»



ONSINT SM200
«Настольный»

SLS (Selective Laser Sintering: послойное лазерное спекание) – технология, позволяющая получить точные **детали сложной геометрической формы** из пластиковых порошков. **Высокая производительность, отсутствие слоистости, отсутствие поддержек**

SLM 3D-принтеры: печать металлами

SLM (Selective Laser Melting) системы ONSINT – эффективное решение для аддитивного производства металлических изделий, позволяющее печатать детали из стали, алюминия и титана в среде инертного газа.

ONSINT AM350



ONSINT AM150



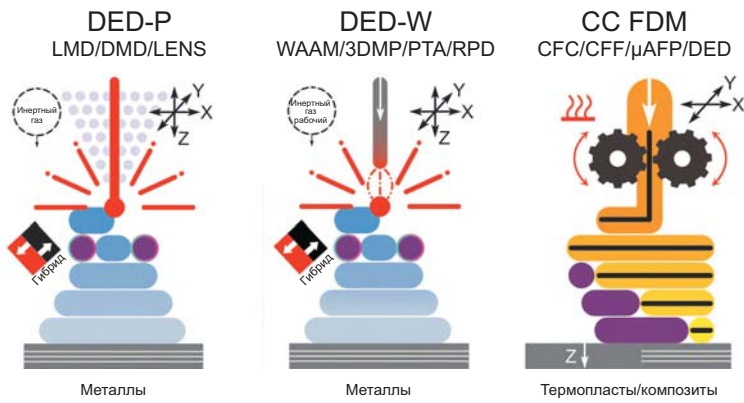


РИС. 5. ▲
Схемы использования в АП круглых вращающихся столов [1]



РИС. 6. ►
Круглый поворотный стол на 3D-принтере Gefertec arc405, технология 3DMP/WAAM, компания Gefertec [4]

система координат, в которой каждая точка на плоскости определяется двумя параметрами – полярным углом и полярным радиусом? Технологии DED-P, DED-W, FDM/CFC могут ее использовать, хотя 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.

3. ПРЕДТЕЧИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА БУДУЩЕГО

Итак, повышение производительности до уровня классических технологий – вряд ли достижимая, но привлекательная цель для любой АТ. Как этого можно достичь в перспективе нескольких десятилетий? Рецепта, скорее всего, вы не найдете. Но никто не мешает нам представить АП будущего или хотя бы его важные составляющие – вид рабочего стола и специфику его работы. Чтобы лучше понять тенденции, давайте начнем с эпохальных разработок в хронологической последовательности и не будем уделять много времени полному описанию техпроцесса, оставив это в качестве домашнего задания любознательному читателю.

Компания Evolve Additive Solutions со своей технологией скоростной печати пластмассами STEP (Selective Thermoplastic Electrophotographic Process) (рис. 7) появилась на рынке сравнительно недавно – в 2017 г. [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 здесь движется линейно вдоль оси X вперед-назад и синхронизирован с вращением множества барабанов. Барабаны, в свою очередь, выполняют множество функций, включая аккуратный перенос каждого слоя будущей детали с пленки на поверхность стола. При описании технологии STEP уместен 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 занимают сами материалы – модельный и вспомогательный. Конечное изделие из технического аморфного или полукристаллического термопласта получается изотропным по всем трем осям с возможностью

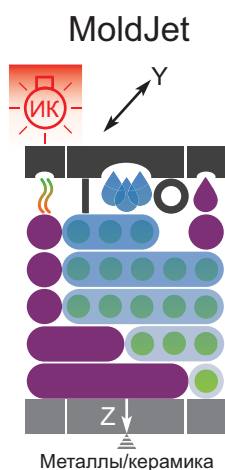
РИС. 7. ►
Конвейерный тип стола с декартовой системой координат, технология STEP, компания Evolve Additive Solutions [6]



полноцветной и мультиматериалами печати. 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, основанная также в 2017 г. [7], разработала уникальную гибридную технологию MoldJet, совмещающую в себе 3D-печать по технологии под общим названием MJM (Multi Jet Modeling) для печати формы из поддержек и традиционной MIM/CIM (Metal/Ceramic Injection Molding) для заливки модельного материала в форму (рис. 8).

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, состоящей из 4–6 платформ, попеременно заезжающих под соответствующее устройство на очередной технологической операции (печать, первичная термообработка, контроль) (см. фото у заголовка статьи). Заявляется производительность от 220 до 1600 см³/ч для систем Dim и Dominant соответственно [7, 8]. Здесь опять наблюдается вращение как оптимальный способ компактизации, ускорения и автоматизации



▲ РИС. 8. Схема уникальной гибридной технологии MoldJet (графика: Д. С. Трубашевский)

ПРОФИЛИ ПОД ДЕРЕВО ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНА

Экструзионные линии
PE Timber Profile Extrusion Line



Трубная

ЭКСТРУЗИОННАЯ ЛИНИЯ
PIPE Extrusion Line



КОМПАУНДИРОВАНИЕ

Экструзионные линии
Compounding Extrusion Line



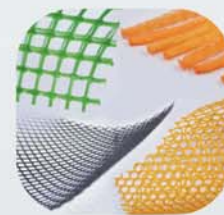
МЕДИЦИНСКИЕ ТРУБКИ

Экструзионные линии
Medical Tube Extrusion Line



СЕТКИ

Экструзионные линии
Net Extrusion Line



3D принтер

для экструзии
цементной смесью
Cement Extrusion
3D Printer



Свяжитесь с нами

Телефон +7-985-9918547
russia@mail.everplast.net
everstar@mail.everplast.net

серийного производства [9]. К сожалению, процесс не является по-настоящему непрерывным, как в случае с фотополимерными смолами (поговорим об этом чуть позже), а дискретен по своей сути.

В 2021 г. компания Stratasys преподнесла сразу несколько сюрпризов в виде серии роторных 3D-принтеров – J5 DentaJet, J5 MediJet, J35 Pro, J55 Prime с потрясающей конструкторской концепцией и полярной системой координат (рис. 9) [10]. Представлен-

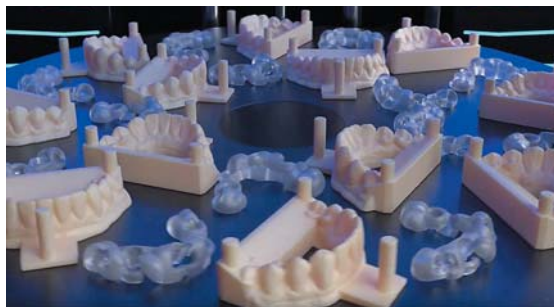


РИС. 9. ▶ Роторный стол с полярной системой координат 3D-принтера J5 DentaJet, компания Stratasys [10]



РИС. 10. ▶ Процедура замены секции 3D-принтера AMpolar с полярной системой координат, компания dp Polar [14]



РИС. 11. ▶ Визуализация замены секции роторного стола технологии HSR, которая может осуществляться как человеком, так и РТК, компания dp Polar [14]



РИС. 12. ▶ Напечатанные компоненты электронных устройств, компания Nano Dimension [15]

ные 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 ограничения являются низкие эксплуатационные характеристики получаемых изделий из фотополимеров, а также недостаточно высокий уровень автоматизации.

Да прости 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-расследования. Немецкая компания dp Polar [2] применяет технологию ротационной печати в полярных координатах High-Speed Rotative AM (HSR) с помощью пьезоэлектрических струйных печатающих головок Хаар 1003 английского производителя Хаар [11]. Конечно же, такие головки предназначены для технологии струйного нанесения фотополимеров MJM (подобная технология используется у 3D Systems – MultiJet Printing [12] и у Stratasys – PolyJet [13]).

Еще с 2019 г. dp Polar заявила о себе как о компании, целью которой является покорение промышленного кастомизированного производства с помощью АТ. Ею заявляется скорость около 10 л/ч 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. 10–11). Далее секция может передаваться на следующую технологическую операцию, например растворения материала поддержки.

Компания dp Polar уже говорит о возможности использования ее систем AMpolar для мультиматериальной печати, включая 3D-печать электронных компонентов АМЕ (Additive Manufactured Electronics) (рис. 12) на любых поверхностях и многослойных структурах токопроводящими чернилами и диэлектриками, включая носимую электронику (Wearable Electronics) (рис. 13). Именно эта концепция 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. Причем 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. ■

Список литературы приведен в конце данной статьи, размещенной на сайте журнала. – Прим. ред.

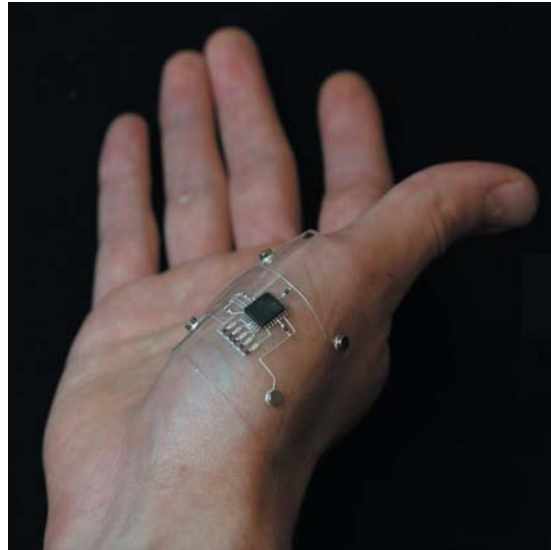


Рис. 13. Компонент носимой электроники, полностью напечатанный на 3D-принтере, способный принимать форму тела человека или животного [16]



Автор статьи приглашает читателей на свой сайт

«Eppur si muove» or Forget Everything You Know about its Classic Version

D. S. Trubashevsky

In this article, readers are waiting for amazing examples with evidence of successfully functioning 3D printing systems with a special layout, which can be confidently called developments that make a significant contribution to the dynamic world of additive manufacturing.



КНИГИ ДЛЯ ПРОФЕССИОНАЛОВ

ВНИМАНИЮ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ПЛАСТМАСС!



Выявление и устранение проблем в экструзии. Систематический подход к решению проблем. 3-е издание

К. Раувендааль, М. П. Норьега

Перевод с англ. (2019, *Troubleshooting the Extrusion Process A Systematic Approach to Solving Plastic Extrusion Problems, 3rd Edition*)

под ред. О. И. Абрамушкиной

2021 г., 328 с., 165×235 мм, тв. пер., полностью цветное издание

В обновленном бестселлере по выявлению и устранению проблем в области экструзии рассмотрены вопросы поиска неисправностей, возникающих в практике экструзионных производств, а также пути их быстрого и эффективного устранения. Описаны основные типы проблем, предложены систематический и методический подходы к их решению для различных типов изделий. Сформулированы значимые предпосылки для эффективного решения: хорошее приборное обеспечение; глубокое понимание процесса экструзии; сбор и анализ данных при проведении процесса; формирование профессиональной команды; информация о состоянии оборудования и о перерабатываемых материалах.

Особенности 3-го издания — это новые примеры проблем; обновленные данные; специальные приложения, в том числе подробные цветные иллюстрации всех дефектов (описание, анализ, решение); связь параметров процесса и оборудования с причинами брака, их влияние на качество изделий. Общий тираж предыдущих изданий превысил 5000 экземпляров.

Издание является признанной настольной книгой технологов, инженеров, наладчиков, специалистов в области экструзии полимеров и будет востребовано студентами специальных курсов.

www.epcprof.ru - заказ online и все книги издательства