

# ЦИФРОВЫЕ ФАБРИКИ ИНДУСТРИИ 4.0

## Осязаемые прототипы нового технологического уклада

Дмитрий ТРУБАШЕВСКИЙ, Владимир ЕЖЕЛЕНКО,  
ООО «Современное оборудование», группа компаний «Солвер»



Рис. 1. Реальные шаги Mercedes Benz по воплощению концепции «Индустрии 4.0»

*В 1955 году в экономике США произошло примечательное событие: затраты на информационные технологии впервые превысили затраты на материальное производство. Уже в 1960-1970-х годах формируется теория постиндустриального, информационного, общества с глубокими технологическими, экономическими, политическими и культурными изменениями общества того времени. Какие же основные факторы способствовали зарождению такой теории?*

### ПРИЧИНЫ ПОЯВЛЕНИЯ ПОСТИНДУСТРИАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ

Совершенствование информационных и производственных технологий, развивающаяся механизация и автоматизация производств – все это способствует сокращению количества персонала, отвечающего за рутинные технологические операции материального производства. Вместе с этим растет потребность в

высококвалифицированных кадрах, способных программировать работу механизмов и информационных систем.

Высокие требования, предъявляемые к квалификации и интеллекту таких сотрудников, стимулируют целый пласт перемен в структуре общества и, что важно, в образовательной сфере. Все большее влияние на экономику начинают оказывать не материальные средства производства для массового выпус-

ка товаров, а высокоинтеллектуальная разработка сложных устройств и изготовление специальной и уникальной продукции небольшими партиями.

Современные производства с легкостью справляются с тиражированием продукции практически любого уровня сложности, а вот с обеспечением все возрастающего спроса на производство инновационных продуктов, а также товаров и услуг индивидуального назначения пока есть проблемы.

Общественное и экономическое развитие сегодня подошло к зарождению элементов промышленности будущего, для которой основную ценность будет представлять ин-



Рис. 2. Два варианта петли для кожухов двигателей Airbus A380. На переднем плане – бионический вариант, изготовленный методом металлической 3D-печати

теллект систем, механизмов, товаров и услуг, способный самостоятельно принимать решения в зависимости от многочисленных факторов взаимодействия со средой и человеком.

Концепция назревающей четвертой промышленной революции, или, как ее называют, «Индустрия 4.0», получила свое начало в 2011 году благодаря политикам, бизнесменам, ученым и промышленникам Германии и была провозглашена главной составляющей развития страны в области высоких технологий. Цель, которую ставили перед собой разработчики этой концепции, – повышение конкурентоспособности страны в промышленности посредством тесной интеграции киберфизических систем на предприятиях и за их пределами. В результате воплощения этой концепции, по мнению разработчиков, должно происходить взаимодействие между производственными мощностями и произведенными ими товарами без непосредственного участия человека, причем с самоадаптацией под новые запросы потребителей. Взаимодействие должно быть настолько глубоким и автоматизированным, что у каждого потребителя товаров или услуг появится возможность практически напрямую контролировать производство своего заказа. Впоследствии концепция получила свое развитие в США, Китае и других странах.

Сегодня определены девять драйверов, оказывающих основное влияние на развитие концепции «Индустрии 4.0». В их числе:

- самоуправляемые роботы;
- аддитивное производство;
- дополненная реальность;
- компьютерная имитация оборудования, материалов и технологий;
- горизонтальная и вертикальная системная интеграция;
- промышленный «Интернет вещей»;
- «Туманные» вычисления;
- информационная безопасность;
- «Большие данные» и аналитика.

Можно заметить, что многие из драйверов уже сегодня активно используются при создании продуктов и услуг. Тем не менее, для полного воплощения новой концепции производства требуется их дальнейшее совершенствование и их синергетическое функционирование. Аддитивному производству, как одному из драйверов развития «Индустрии 4.0», также требуются значительные качественные и количественные изменения, но в первую очередь ему необходима интеграция в автоматизированное безлюдное производство.

#### НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сейчас остается все меньше скептиков в том, что касается перспектив развития аддитивного цифро-

го производства. Крупные авиационные, автомобильные, оборонные, приборостроительные предприятия, медицина, включая стоматологию, образование, частный бизнес, всевозможные бизнес-инкубаторы, сервисные бюро уже по достоинству оценили преимущества использования 3D-печати и активно встраивают ее в свои рабочие процессы. Наиболее успешные компании даже приняли у себя внутренние стандарты на использование аддитивных технологий и материалов.

Представьте себе, что при производстве деталей 3D-печатью больше не потребуется длительной разработки технологии, использования многоосевых станков со сложнейшим программированием работы, высококвалифицированного персонала, проектирования и использования оснастки, наличия литейного цеха для заготовок, обязательного контроля заготовок и готовых деталей, сложной логистики и т.п. Аддитивные технологии в совокупности с другими составляющими «Индустрии 4.0» способны значительно сократить сроки логистических операций, тогда как сейчас процессы традиционной механообработки занимают в среднем менее 5% производственного цикла, а 95% приходится на внутриводскую и внешнюю логистику.

Ожидается, что цифровое производство сменит в ближайшие 20 лет некоторые виды массового производства, особенно с высокой конечной стоимостью продукции. Согласно концепции «Индустрии 4.0», производства будущего не будут иметь большую номенклатуру парка оборудования. Они будут строиться на основе гибких производственных ячеек в составе киберфизических систем. Ячейки и системы будут адаптироваться под конкретный заказ путем перепрограммирования, смены производственных модулей, оснастки, инструмента, материалов, перенаправления логистических потоков – и все это будет происходить в максимально короткие сроки. Такие производственные центры будущего будут иметь развитую сеть, строиться буквально полным техническим и технологическим клонированием и приближе-



Рис. 3. Пример цеха с ГПС от Fastems

ны к основным точкам потребления продукции.

Как показывает успешный опыт использования аддитивных технологий в промышленности, зачастую удается сократить технологический процесс производства в несколько раз, при этом сложность изделий может быть повышена с одновременным сокращением количества деталей в сборке, ведь 3D-печать позволяет строить детали без оглядки на конструктивные и технологические ограничения, присущие традиционным подходам. Так, например, принципы бионического проектирования с использованием конечно-элементного анализа (от англ. Finite Element Analysis, FEA) уже сейчас активно используются для облегчения деталей авиационной техники (рис. 2).

Отдельное внимание следует уделить широкому спектру используемых материалов: это композиты, металлы, керамика, термопластики, фотополимеры и многие другие. Со временем каждая технология будет иметь неограниченный перечень материалов, а их композитный состав будет автоматически определяться расчетной программой в зависимости от назначения и условий эксплуатации конечного изделия.

Сегодня большая часть производителей 3D-принтеров и аддитивных систем все еще предлагает отдельные средства производства, не способные встраиваться в техно-

логический поток с использованием киберфизических систем. Другими словами, это один, два или три принтера, обслуживаемых одним оператором. В обязанности оператора входит подготовка принтера к работе, подготовка рабочего органа к печати тем или иным материалом, подготовка и загрузка программы, смена материала, а зачастую и трудоемкая постобработка.

Ограничением массового распространения «металлических» SLS/SLM/EBM-технологий является достаточно высокая стоимость оборудования и зависимость от материалов (переход на другой материал требует полной очистки рабочих органов установки), что не дает возможности быстрой перенастройки на другое изделие. Плюс к этому – последующее слесарное удаление элементов поддержки, термообработка. Тем не менее, производители уже начали решать проблему быстрой смены материала, о чем мы расскажем далее.

Технологии SLA/MJM/DLP/PolyJet обычно сложно использовать для конечных изделий ввиду особых свойств материалов. Использование технологий с песчано-полимерными, керамическими и гипсовыми смесями имеет достаточно ограниченные сферы применения. Технология FDM и подобные ей (например, APF) используют термопластики промышленного класса и представляются наиболее выигрышны-

ми по совокупности свойств (в тех случаях, когда для будущих изделий может быть использован пластик, а не металл): стоимость оборудования, свойства и скорость замены материалов, способность автоматизированного удаления материала поддержки. К недостаткам технологии FDM можно отнести слоистую структуру поверхности. Поэтому изготовленные по этой технологии детали сразу использовать без их доработки удастся не всегда. Конечно, есть и другие новые технологии, использующие аддитивный способ изготовления деталей, но многие из них пока не являются по-настоящему отлаженными коммерческими продуктами.

### НАСКОЛЬКО РЕАЛЬНО ОРГАНИЗОВАТЬ «ЦИФРОВУЮ ФАБРИКУ»?

Давайте поразмышляем о дальнейшем совершенствовании аддитивных технологий до уровня полноценного встраивания в «Индустрию 4.0». Есть ли уже сейчас реальные примеры хотя бы на уровне концепции?

В качестве отправной точки реализации концепта цифровых аддитивных систем можно принять используемые на протяжении последних 30-40 лет гибкие производственные системы (ГПС), например, компании Fastems или сборочные производства любой ведущей автомобильной компании.



Рис. 4. Участок цифрового производства Concept Laser

Новая экономика организуется вокруг информационных сетей с горизонтальной и вертикальной интеграцией. Она основана на постоянном взаимодействии между узлами – локализованными производствами, называемыми FabLab (от англ. Fabrication Laboratory), – сертифицированными лабораториями, в которых «под одной крышей» собрано разнообразное основное и вспомогательное оборудование, позволяющее быстро «печатать» детали для компаний, ориентирующихся на инновации, а также выполнять индивидуальные заказы для частных лиц. Возможности таких лабораторий позволяют использовать различные технологии и материалы, но называть их полноценными ГПС пока рано.

Уровень автоматизации, к которому человечество пришло в 1980-х годах, потребовал роста числа управленческих решений на одно производственное действие в 10 000 раз! В то же время внедрение принципов автоматизации и роботизации продвинуло промышленность с тех пор не более чем в 100 раз. Потенциально повышение уровня вычислительной техники позволяет ожидать гораздо большего – для этого достаточно вспомнить, насколько далеко с уровня 1980-х годов продвинулась вычислительная техника.

Понять, сформировать, интегрировать различные технологические

решения в единый производственный организм, который бы работал без участия человека, – вот та проблема, которую уже решают некоторые производители-интеграторы аддитивных технологий.

#### АДДИТИВНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА – ПРООБРАЗЫ ЦИФРОВЫХ ФАБРИК БУДУЩЕГО

##### Concept Laser

На проходившей в прошлом году во Франкфурте-на-Майне выставке Formnext компания Concept Laser с технологией SLM представила новую архитектуру оборудования и производства. Уникальная разработка подтверждает твердую нацеленность компании на воплощение концепции «Аддитивной фабрики будущего» («AM Factory of Tomorrow»), призванной вывести аддитивное производство на более высокий уровень качества, гибкости и эффективности (рис. 4). Принципиально новый подход к проектированию компонентов процесса открывает широкие перспективы для модульной интеграции производственных технологий на предприятиях. Это означает, что промышленное производство будет быстрее и рентабельнее. Уже в конце этого года Concept Laser представит свои первые коммерческие установки.

Как правило, производители металлических аддитивных систем предлагают решения без возможно-

сти интеграции своего оборудования в общий производственный процесс. Новая архитектура оборудования Concept Laser предусматривает продуманную автоматизацию основных технологических операций: подготовку оборудования к печати, печать и постобработку. По словам Флориана Бекманна (Florian Betschmann), возглавляющего отдел исследований и разработок компании Concept Laser, «по существу, речь идет о разделении систем аддитивного производства на любое число свободно комбинируемых модулей для независимой подготовки оборудования к печати, печати изделия, обработки напечатанного изделия. Параллельные процессы загрузки порошка и выгрузки готовых изделий повышают эффективное время печати, тем самым существенно сокращая «простои» машин, ранее функционировавших автономно. Здесь кроется огромный потенциал повышения эффективности производственной цепочки. Для промышленного серийного производства этот принципиально новый подход, резко отличающийся от привычных «количественных» концепций оборудования, означает возможность сделать очередной шаг вперед».

Инженеры Concept Laser смогли распараллелить процесс подготовки и саму печать «на уровне оборудования». Аддитивное производство в понимании Concept Laser уже

может выходить на режим 24/7. Установки интегрируются с традиционными станками с ЧПУ для «гибридного» производства, а также для последующей постобработки.

В основе новой производственной архитектуры лежит модульное разделение функций подготовки, производства, демонтажа, постобработки и хранения деталей (рис. 5). В зависимости от задач, размеров помещения можно комбинировать модули таким образом, чтобы обеспечить максимальную производительность работы со всем спектром доступных на сегодняшний день порошковых металлов с одновременным снижением производственных затрат. Имитационное моделирование производственных сценариев подтвердило, что площади, занимаемые оборудованием, работающим только по традиционным технологиям, реально сократить на 85%. А использование в установках нескольких лазеров увеличивает общую производительность системы. «Благодаря одновременному использованию до четырех лазеров значительно выросла скорость построения деталей. Мы также увеличили габариты области построения. На примере нашей концепции мы хотим показать, как принципы Четвертой промышленной революции способны изменить аддитивное производство и приблизить будущее. Здесь кроется огромный потенциал по повышению эффективности предприятий и оптимизации технологий под задачи серийного производства», — поясняет Ф. Бекманн.

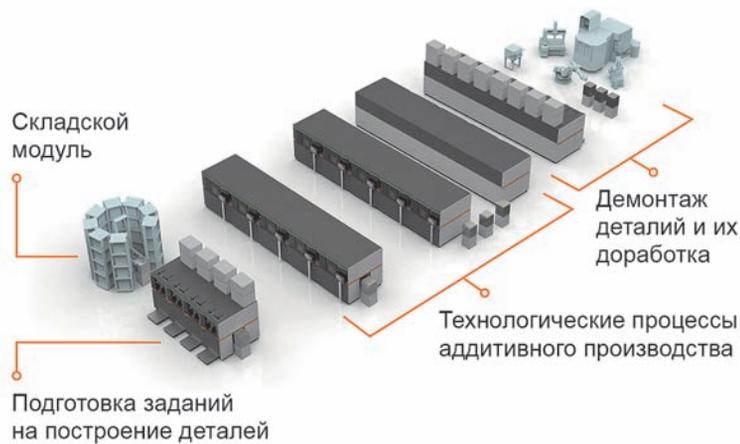


Рис. 5. Пример компоновки цеха цифрового производства Concept Laser

### Additive Industries

MetalFAB1 — настоящий промышленный «комбайн» от голландской компании Additive Industries. Он состоит из «металлического» 3D-принтера, печи для снятия с детали структурных напряжений, автоматизированной сменной платформы для построения, хранения и выдачи готовых деталей (рис. 6).

Количество модулей может достигать одиннадцати или более в зависимости от задач заказчиков. В совокупности с одновременной работой нескольких лазеров, модульной структурой, Additive Industries предлагает настоящий аддитивный мини-завод полного цикла для удовлетворения запросов наиболее требовательных заказчиков из авиационной, космической, медицинской, автомобильной промыш-

ленности, а также для инструментального производства. По оценке производителя, MetalFAB1 в 10 раз превосходит средний уровень подобных систем на рынке по повторяемости, производительности и гибкости.

### XJET

Новая технология металлической 3D-печати от израильской компании XJET способна перевернуть представление о многофакторности процесса аддитивного производства деталей из металла.

Наночастицы порошка в технологии от XJET помещаются в жидкий композитный раствор. По аналогии с процессом PolyJet (о котором мы уже не раз писали на страницах «Умпро») струйные головки выпрыскивают этот раствор, формируя деталь по заранее рассчитанной программе. Высокая скорость процесса, его безопасность, быстрая и простая загрузка материала картриджами, а также возможность автоматизации операций по удалению материала поддержки позволяет встраивать XJET в цифровые фабрики будущего.

Заканчивая рассказ о производителях металлических аддитивных принтеров и их решениях, хотелось бы упомянуть о некоторых потенциальных и практически состоявшихся событиях в отрасли аддитивных производств. Самое важное из них — ближайшие планы американской корпорации General Electric по приобретению двух компаний, извест-



Рис. 6. Многофункциональный производственный центр MetalFAB1



Рис. 7. Новый металлический 3D-принтер XJET

ных своими промышленными 3D-принтерами: шведской Arcam Group AB и немецкой SLM Solutions Group AG. Сделка может состояться уже в октября этого года, ее стоимость составит 1,4 млрд долларов. Уже сейчас в корпорации успешно функционирует автоматизированная производственная линия по 3D-печати форсунок для двигателей LEAP-1A.

Есть и другие примеры тесного сотрудничества крупнейших корпораций с производителями аддитивного оборудования. Английский Rolls-Royce имеет тесные связи с компанией Renishaw – производителем SLM-установок. В США же самая крупная аэрокосмическая и оборонная компания Lockheed Martin ведет плотную работу с компаниями Sciaky Inc., Norsk Titanium, а также с Sandia National Laboratories, где ранее были заложены основы технологии металлической 3D-печати Optomec.

Такие шаги говорят о планомерной консолидации крупнейших промышленных корпораций с разработчиками и поставщиками оборудования для аддитивных технологий с целью создания производств будущего с технологиями полного цикла.

#### ARBURG

Компания ARBURG известна, прежде всего, своим широким модельным рядом термопластавтоматов (ТПА). Тем не менее, осознавая важность и перспективность аддитивных технологий, их место в «Ин-

дустрии 4.0» ARBURG с недавнего времени подключилась к направлению аддитивного производства, выпустив 3D-принтер Freeformer, работающий по оригинальной технологии ARBURG Plastic Freeforming (APF). В целях компании – разработать «умный завод», который будет характеризоваться высоким уровнем гибкости, эффективности и использования ресурсов (рис. 8).

Freeformer может работать с гранулированным термопластиком, благодаря чему открываются широкие возможности по использованию для производства деталей множества видов пластмасс. Еще один плюс системы – возможность использования в одной модели нескольких материалов. Правда, на данный момент технология не мо-

жет похвастаться производством сложных деталей, с которыми легко справляется технология FDM.

Тем не менее в Германии считают технологию APF способной в будущем составить серьезную конкуренцию нынешним лидерам аддитивной отрасли. В линию «умного завода» по выпуску кастомизированной продукции, в понимании ARBURG, помимо ТПА должны быть интегрированы роботизированные системы (с 7-осевым роботом) и такие периферийные устройства, как 3D-принтеры. В результате после ТПА деталь перемещается роботом в принтер для нанесения на изделие индивидуальной маркировки кодов DM (Data Matrix) и другой пользовательской информации. Это гарантирует, что детали будут идентифицированы в любое время с помощью сканера, а цеховая логистика будет полностью контролироваться компьютерной системой предприятия. Клиенты же получают уникальное изделие, например, с индивидуальным именем пользователя, логотипом компании, а также прочими элементами, улучшающими эргономику и подчеркивающими индивидуальность.

#### Stratasys

На выставке IMTS (International Manufacturing Technology Show), прошедшей в сентябре в Чикаго, компания Stratasys анонсировала стратегию развития своих продуктов, ориентированных на промышлен-



Рис. 8. Функционирующий прототип «умный завода» ARBURG

ленный сектор. Были продемонстрированы два концепта на основе многоосевых робототехнических комплексов Kuka с головками, печатающими по технологии послойного наплавления полимерной нити (FDM). Новые продукты компании обладают увеличенной скоростью экструзии, более качественной печатью, возможностью быстрой смены материалов, а также способностью изготавливать детали почти любой длины.

Демонстратор с рабочим названием «Infinite-Build 3D» (рис. 9) предназначен для использования в авиационной, космической, автомобильной промышленности, а также в тех производствах, которые нуждаются в крупногабаритных, легких, изделиях из термопластиков с высокой повторяемостью механических свойств. Его особенностью является производство деталей, практически неограниченных по длине. Если раньше заказчику приходилось идти на компромисс при приобретении оборудования для изготовления деталей с габаритами, превышающими камеру построения, а потом осуществлять склейку частей в единое цельное изделие, то с предлагаемым решением эта проблема полностью решается.

Второй аппарат под названием «Robotic Composite 3D» (рис. 10) состоит из промышленного 5-осевого робота-манипулятора Kuka и 3-осевой платформы построения (суммарно восемь осей). С его по-

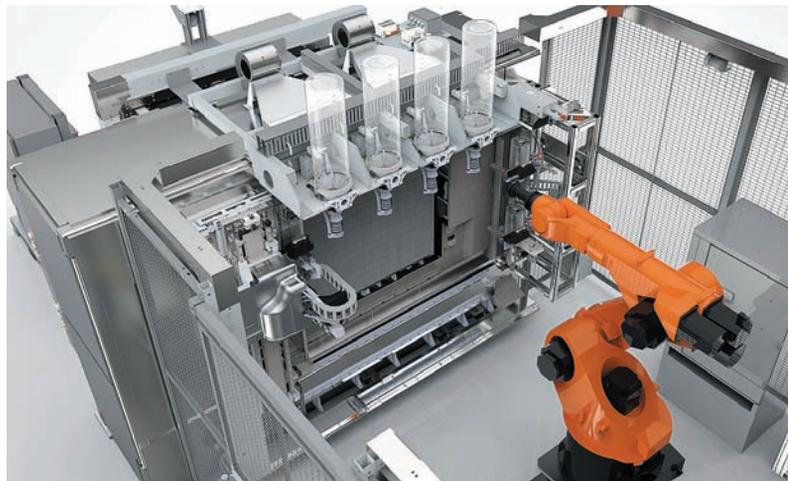


Рис. 9. Демонстратор «Infinite-Build 3D» от Stratasys

мощью можно наносить слои термопластика в любом направлении поворота платформы, что позволяет повысить прочность конечных изделий. По утверждениям представителей компании, здесь также возможно нанесение углеволоконных материалов с получением геометрии, недостижимой у других производственных систем композитной выкладки. Примечательно, что материал поддержки здесь уже не нужен. Компания Stratasys в концепте значительно увеличила размеры изготавливаемых деталей, а также скорость в 10 и более раз по сравнению с ее промышленной установкой Fortus 900 mc.

Стоит отметить непосредственное и активное влияние на подобные проекты корпорации Boeing, опре-

деляющей общие требования к технологиям для производства мелкосерийных кастомизированных деталей, компании Ford Motor, планирующей использование инновационных методов производства на своих предприятиях, а также Siemens, обеспечивающей программную интеграцию решений Stratasys.

Несомненно, Stratasys является показательным примером компании, задающей тренд в области аддитивных технологий будущего и способной завоевать достойное место в «Индустрии 4.0».

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы живем во время значительных перемен в экономике, промышленности, образовании и медицине. Сегодня развитие цифровых технологий задает прототип нашего уже близкого будущего – насыщенного думающими устройствами в цифровых фабриках и за их пределами, способными выполнять рутинные операции самостоятельно без участия человека. Запланированные действия по консолидации крупнейших корпораций с лидерами 3D-печати подтверждают важность и неизбежность лидерства аддитивных технологий по отношению к традиционным подходам. В мире инноваций выигрывают те производственные компании, которые будут иметь гибкое оборудование и технологии, способные мгновенно перестраиваться под новые задачи. Это зарождение нового технологического уклада «Индустрии 4.0». ■



Рис. 10. Демонстратор «Robotic Composite 3D» от Stratasys