

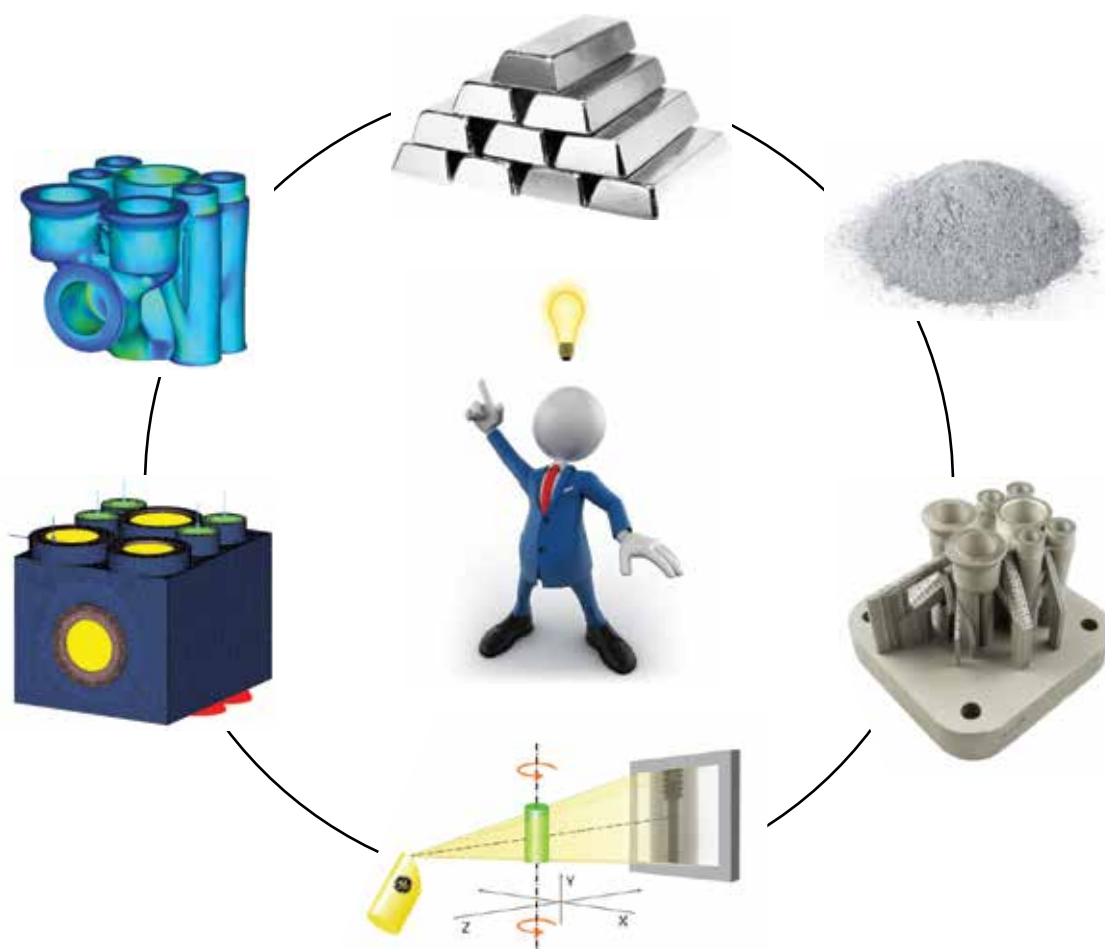
Цифровые технологии производства: печать металлопорошковыми композициями



Текст: **Антон Нисан**

„

Мы живем в эпоху перехода к повсеместной цифровизации. За какой-то десяток лет телевидение стало цифровым, фотоаппараты и видеокамеры — цифровыми, появились новые «умные» гаджеты. Мы генерируем, воспринимаем, обрабатываем, храним информацию в цифровом виде, на цифровых носителях. А что с технологиями производства? Становятся ли они цифровыми, и какие преимущества цифровизация сулит им?



1

Цифровые технологии производства ускоряют ваш путь от идеи к результату

Для ответа на эти вопросы необходимо определить, что именно мы понимаем под цифровыми технологиями производства рис 1. Цифровые технологии производства — это комплекс аддитивных технологий производства (3D-печати), компьютерной томографии, 3D-сканирования, современных методов постобработки, контроля и испытаний продукции, в разработке которой широко применяются системы автоматизированного проектирования и моделирования физических процессов для оптимизации конструкции изделий и процессов их изготовления и полноценного раскрытия преимуществ и возможностей технологий. В данной концепции под продукцией подразумеваются изделия из металлов (точнее стали и сплавов), в основе производства которых применима и целесообразна аддитивная технология селективного лазерного сплавления металлопорошковых композиций.

Разработка изделий во многом уже стала цифровой: внедрены и активно используются системы автоматизированного проектирования, проводятся расчеты

механических нагрузок, тепловые, газо- и гидродинамические расчеты. На основе этих расчетов за несколько итераций оптимизируется конструкция, что значительно снижает количество изготавливаемых прототипов и опытных образцов.

Если разработка уже оцифрована, то производство только активно начинает этот процесс. Понимая актуальность и важность такого начинания, предлагаем вашему вниманию концепцию комплексного внедрения цифровых технологий производства. Концепция включает в себя аддитивные технологии, в частности, 3D-печать металлами и полный цикл постобработки, компьютерной томографии и 3D-сканирование, другие современные технологии контроля и испытаний, компьютерное моделирование и оптимизацию технологических процессов, которая открывает новые возможности в проектировании и производстве и обеспечивает значительные преимущества. Какие именно и для каких областей применений, рассмотрим далее.



Селективное лазерное сплавление — аддитивная технология изготовления (3D-печать) изделий из стали, алюминиевых, титановых, никелевых, кобальтовых и других сплавов, в которой мощный сфокусированный лазер расплавляет частицы порошка, послойно формируя деталь. Суть процесса: ракель наносит на платформу тонкий слой порошка, лазер расплавляет порошок на тех участках, где должна быть деталь (фактически поточечно экспонируется сечение детали каждым конкретным слоем построения), затем платформа опускается на 25–60 мкм, наносится следующий слой порошка и так далее. Процесс происходит в инертной среде для предотвращения окисления, диаметр частиц порошка десятки микрон.

Защитная линза

Бункер с порошком

Ввод инертного газа

Дозирующая система

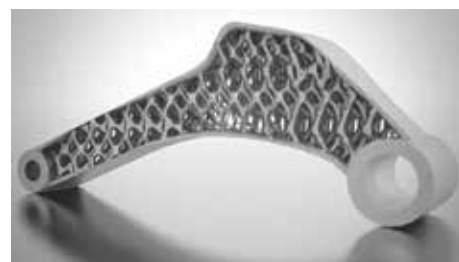
Вывод инертного газа

Отверстие сброса порошка

Преимущества цифровых технологий производства

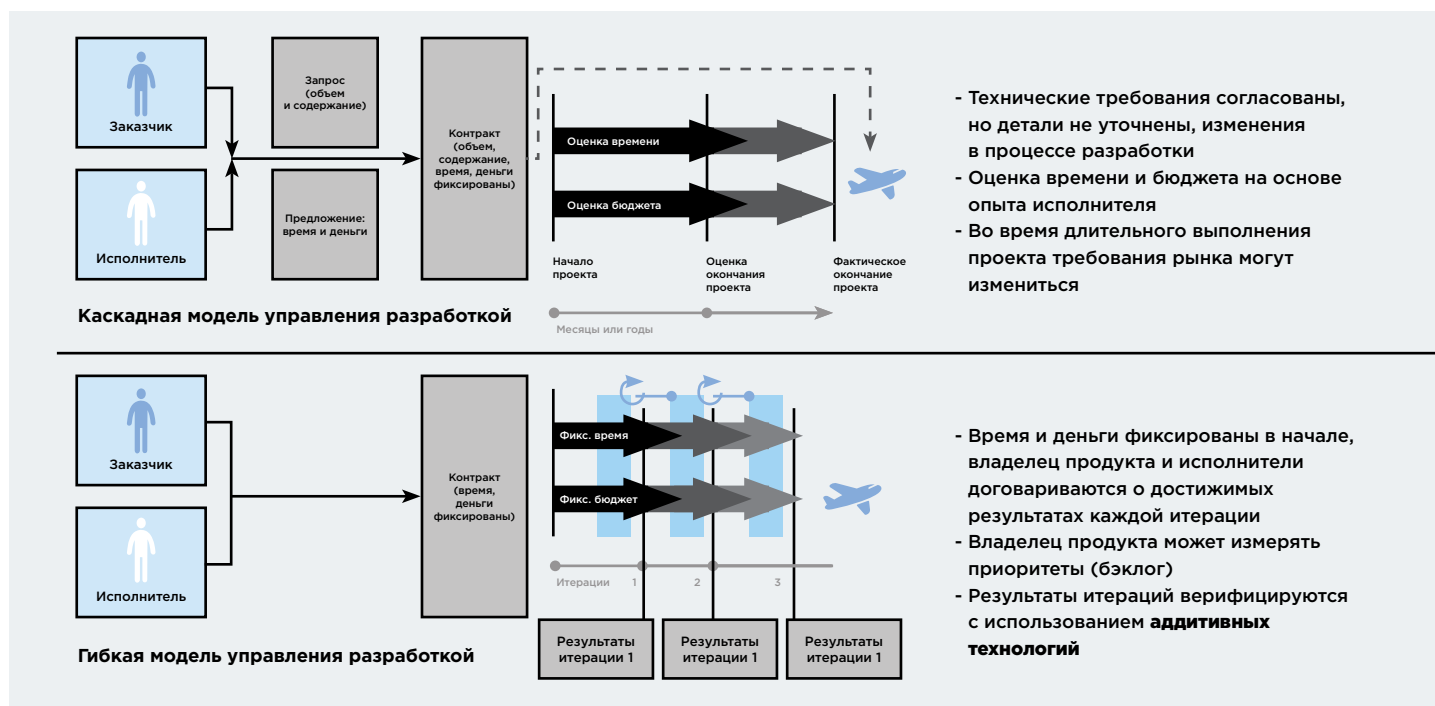
Выделяют следующие основные преимущества внедрения цифровых технологий производства:

- Гибкость проектирования: возможность получения деталей сложной, развитой формы с внутренними каналами, с бионическими элементами и сетчатыми структурами **рис 2**. Объединение нескольких деталей в одну.
- Гибкость производства: не требуется оснастка (литьевые формы, выжигаемые модели), возможна быстрая переналадка на другие типы материалов.
- Уменьшение сроков разработки и выхода на рынок: полная поддержка гибких методик разработки (Agile, Scrum) за счет быстрой верификации результатов проектирования на прототипах и опытных образцах **рис 3**.
- Быстрое прототипирование благодаря коротким производственным циклам.
- Снижение массы, материалоемкости **Т 1**: перепроектирование изделий под аддитивные технологии позволяет уменьшить количество материала в механически малонагруженных участках деталей, а сетчатые и бионические конструкции обладают высокой удельной прочностью.
- Высокий коэффициент использования материалов: не сплавленный порошок просеивается после печати и может десятки раз повторно использоваться без потери как собственных свойств, так и свойств продукции.
- Уменьшение отрицательного воздействия на окружающую среду: снижены отходы и выбросы вредных веществ.



2

Напечатанные кронштейны с сетчатой структурой. Источник: Autodesk, Roland Berger



3

Сравнение каскадной и гибкой (Agile, Scrum) моделей управления разработками. Цифровые технологии производства полностью поддерживают гибкую модель управления разработками. Источник: Roland Berger

Т 1

Иллюстрация снижения массы. Источник: Renishaw

Параметр	Оригинальный коллектор	Итерация 1	Итерация 2
Материал	AlSi10Mg	AlSi10Mg	S316L
Объем, см ³	9600	4650	2040
Масса, кг	25,6	12,3	16,3

Области применения

Еще несколько лет назад технологии печати из металлов и сплавов воспринимались как применимые преимущественно для прототипирования. Во многом такое восприятие было обусловлено малым опытом проектирования, испытаний и эксплуатации изделий, сравнительно небольшим парком установленного оборудования для аддитивного производства, отсутствием стандартов. Но сейчас с уверенностью можно сказать, что колоссальная работа большого количества компаний, исследовательских центров, университетов, направленная на внедрение цифровых технологий в производство конечных изделий, увенчалась успехом, о чем ярко свидетельствуют следующие примеры.

АВИАКОСМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

В 2015 году Федеральное управление гражданской авиации (FAA) США сертифицировало напечатанный из кобальт-хромового сплава корпус датчика температуры для применения в коммерческих двигателях GE. Это первая изготовленная по аддитивным технологиям металлическая деталь, допущенная для эксплуатации на коммерческих авиалиниях. Следующий пример — топливные форсунки турбореактивных двигателей GE LEAP, напечатанные из жаропрочного никелевого сплава. Полноценное использование возможностей аддитивных технологий при перепроектировании форсунки позволило объединить 20 деталей в одну, снизить



4 Примеры применения в авиакосмической промышленности: корпус датчика температуры на входе в компрессор двигателя GE, CoCr сплав **A**, топливные форсунки турбореактивных двигателей GE LEAP, Ni сплав **B**, прототипы лопаток турбины низкого давления для двигателя GE9X, TiAl сплав **C**

массу на 25 %, увеличить срок службы в 5 раз. В начале 2016 года двигатель GE LEAP был сертифицирован FAA, а с лета 2016 эксплуатируется на коммерческих рейсах (Airbus A320neo). Данный пример иллюстрирует свершившийся факт внедрения аддитивных технологий изготовления изделий из сплавов в серийное производство с большими объемами: таких форсунок только в одном двигателе 19 штук, а портфель заказов на двигатели LEAP по состоянию на середину 2017 года составил 12 200 штук на сумму 170 млрд долларов США

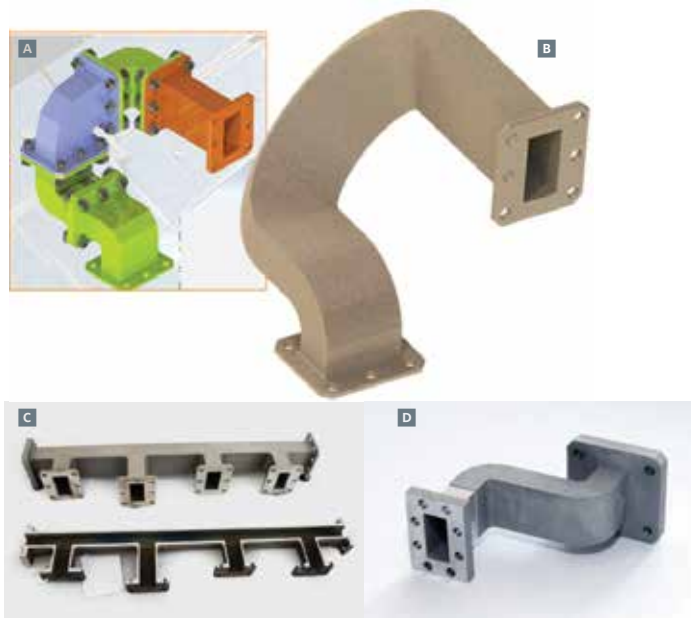
рис 4.

Также в настоящее время активно проектируются и испытываются лопатки турбин с внутренними каналами охлаждения, в частности из алюминий-титанового сплава для самого большого разрабатываемого авиационного двигателя в мире GE9X.

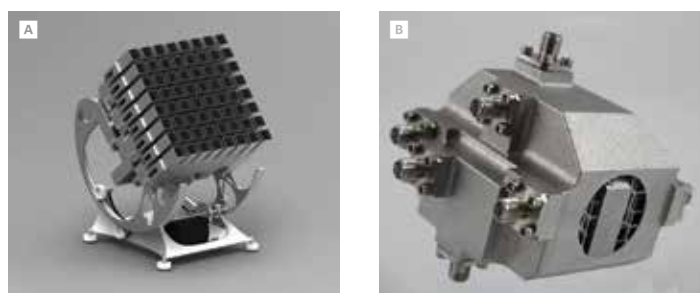
Добрались аддитивные технологии и до космоса: 6 января 2014 года компания SpaceX запустила ракету Falcon 9, в которой в одном из девяти двигателей Merlin 1D корпус главного клапана окислителя был напечатан. Запуск прошел успешно, напечатанная деталь выдержала воздействие жидкого кислорода при криогенных температурах в условиях сильных вибраций.

ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

В области электроники и приборостроения 3D-печать металлами применима для изготовления волноводов, антенн, компараторов, радиаторов. Например, при изготовлении волноводов по аддитивным технологиям существует потенциальная возможность обеспечения следующих преимуществ: уменьшение количества соединений, уплотнений и крепежа, упрощение сборки, уменьшение массы, повышение надежности рис 5, рис 6.



5 Традиционный волновод **A**; волноводы, изготовленные 3D-печатью **B**, **C**, **D**. Источник: Optisys



6 Спутниковая антенна X-диапазона **A**, компаратор K-диапазона **B**. Источник: Optisys



7 Модель и напечатанная вставка в форму с каналами охлаждения. Источник: Renishaw



9 Лопатки газовых турбин. Ni сплав. Источник: Siemens



8 Модель вставки **A**, вставка, напечатанная на 3D-принтере **B**, пресс-форма **C**, скребок для льда **D**. Источник: Renishaw



10 Головка газовой горелки. Источник: Materials Solutions

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Печать металлами уже серийно применяется для изготовления формообразующих вставок в пресс-формы с каналами охлаждения для литья пластмасс, так как в процессе отверждения необходимо отводить большое количество тепла рис 7. Использование каналов охлаждения позволяет добиться сокращения времени охлаждения до трех раз, высокой однородности деталей, снизить уровень брака, уменьшить время цикла до двух раз рис 8.

В энергетическом машиностроении 3D-печать металлами может также применяться для изготовления лопаток газовых турбин и головок газовых горелок рис 9, рис 10.

Печать металлами также применима в транспортном машиностроении: компанией Renault Trucks был перепроектирован перспективный двигатель DTI5 Euro 6, что позволило уменьшить количество деталей с 841 до 641 штуки и уменьшить массу с 525 до 405 кг рис 11. Коромысла и крышки корпусов клапанов уже были напечатаны и испытаны, а кронштейн генератора, кронштейн жгутов проводки, блок цилиндров, головка цилиндров — пока только перепроектированы.



11 Модель двигателя **A**; модель двигателя с деталями, которые предлагается изготавливать по аддитивным технологиям **B**; коромысло, выполненное литьем **C**; напечатанное коромысло **D**. Источник: Renault Trucks



12

Серийно выпускаемый напечатанный глушитель. Источник: Tronrud Engineering

ВПК

Согласно мнениям многих экспертов, аддитивные технологии в ближайшем будущем будут широко использоваться для военных нужд. Помимо общих преимуществ, характерных для всех областей применения, ожидается, что военные приложения 3D-печати также упростят логистику, радикально уменьшат склады с запчастями, сократят сроки и стоимость ремонта, перенесут производство и ремонт ближе к зоне ведения боевых действий. К примеру, в 2014–2016 годах ВМС США в экспериментальных целях установили 3D-принтеры на трех кораблях: универсальных десантных кораблях «Эссекс» и «Кирсадж» и авианосце «Гарри С. Труман». Тем временем в Норвегии с 2015 года серийно (больше

1 000 штук в год) печатают глушители для стрелкового оружия, внутренняя втулка которых изготавливается из жаропрочного никелевого сплава, а наружная часть — из титанового сплава **рис 12**.

МЕДИЦИНА

В медицине преимущества и возможности цифровых технологий наиболее полно раскрываются в области протезирования. При помощи лазерного внутриротового сканера врач получает цифровой «снимок» (т.е. 3D-модель) ротовой полости или ее отдельных фрагментов. На основе полученного цифрового слепка проектируются 3D-модели мостовидных протезов или одиночных коронок, которые затем печатаются из сплава кобальта и хрома, после чего покрываются слоем керамики **рис 13**. Печать зубных протезов и коронок была внедрена в медицинскую практику более 10 лет назад и получила широкое распространение: в настоящее время по такой технологии производится более 10 млн изделий в год. Конечно, аддитивные технологии применяются и для изготовления других видов имплантатов, примеры некоторых из них показаны на **рис 14**, а также хирургических шаблонов для проведения операций.



13

Внутриротовой лазерный сканер **А**, зубная коронка, напечатанная из сплава кобальт-хром **В**; покрытая керамикой коронка в разрезе **С**. Источник: Renishaw, CBC Dental Lab, iTero



14

Протезы: челюстная кость собаки, титановый сплав **А**; вертлужный компонент **В** и ножка **С** эндопротеза тазобедренного сустава; спинальный имплантат, титановый сплав **Д**; эндопротез коленного сустава **Е**. Источник: Renishaw, TiDA, Fraunhofer IWA

ЗАПАСНЫЕ ЧАСТИ, СНЯТЫЕ С ПРОИЗВОДСТВА, УНИКАЛЬНЫЕ ДЕТАЛИ

С каждым годом техники в мире становится все больше, а при ее ремонте специалисты часто сталкиваются с невозможностью выполнения ремонта из-за отсутствия запасных частей для морально устаревших, но физически вполне работоспособных устройств. С другой стороны, производителей техники тоже можно понять — поддерживать склад запасных частей не всегда экономически целесообразно. В этой ситуации печать запасных частей — разумное решение, снижающее затраты как производителя, так и потребителя оборудования **рис 15**.

Одна из движущих сил развития человечества — безумное стремление сделать что-то впервые в мире, «установить рекорд»: проехать быстрее, взлететь выше, нырнуть глубже. На современном этапе развития науки и техники установление этих достижений требует всё более совершенных, творческих, специализированных решений на пределе возможности технологий и материалов. При этом тиражировать эти решения не предполагается: речь, как правило, идет об изготовлении уникальных изделий или ограниченной партии. Аддитивные технологии привносят в эту область новые возможности, заметно расширяя границы проектирования и вдохновляя на реализацию задуманного и постоянное развитие **рис 16**.

Схема процесса

Схема процесса предлагаемого комплексного решения, укрупненно состоящая из следующих блоков: разработка, входной контроль материалов, печать и постобработка, контроль и испытания изделий и образцов, приведена на **рис 17**, а планировка — на **рис 18**.

Разработка. Исходя из ТЗ на проектируемую систему, формулируются требования к разрабатываемому изделию. Задается компоновочный объем, разрабатывается 3D-модель, проводится ее оптимизация на основе прочностных (а также при необходимости тепловых, гидро- и газодинамических) расчетов и технологических возможностей, моделирование процесса печати.

Входной контроль материалов. Изготовление ответственных изделий требует полной уверенности в постоянстве качества металлопорошковых композиций, что обеспечивается полноценным входным контролем материалов, включая контроль химического, фазового, фракционного составов, морфологии, насыпной плотности и сыпучести.

Печать и постобработка. После печати неиспользуемый порошок просеивается и используется повторно. Детали очищаются от порошка и при необходимости снятия напряжений до отделения от платформы подвергаются отжигу. Для снятия деталей с платформы ис-



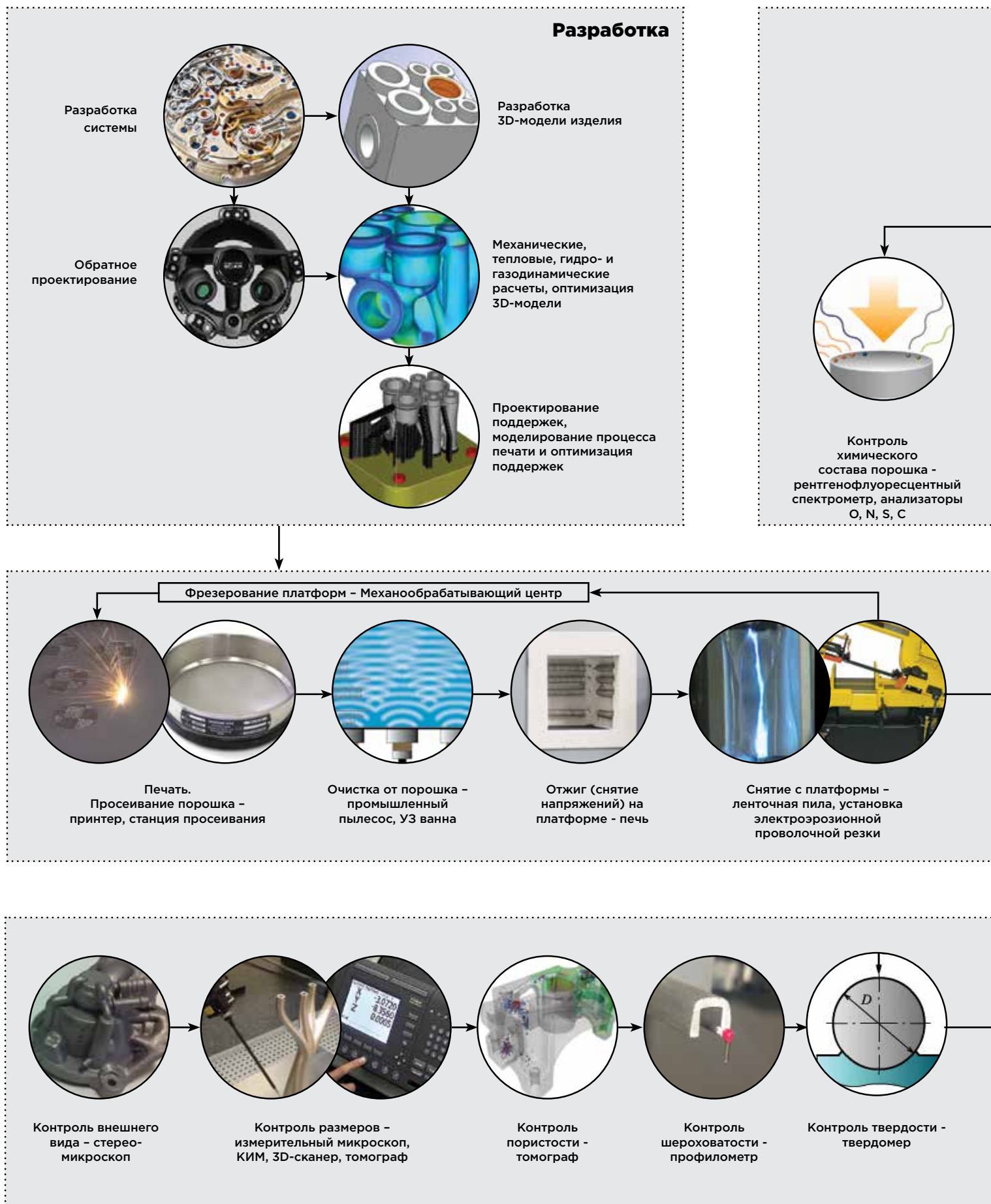
15 Оригинальный изношенный импеллер насоса системы пожаротушения атомной электростанции в Кршко, Словения **A**; напечатанный импеллер **B**. Источник: Siemens



16 Носовой обтекатель **A** самого быстрого сверхзвукового автомобиля Bloodhound SSC **B**, компоненты гидравлической системы **C** гоночной яхты Landrover BAR **D**. Источник: Renishaw

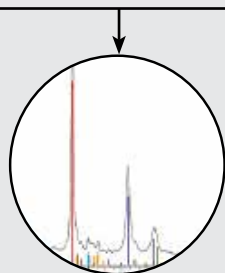
пользуется установка электроэрозионной проволоочной резки или ленточная пила. При повышенных требованиях к прочностным характеристикам изделий они могут обрабатываться высокой температурой и давлением (газостатированию), устраняющими внутренние дефекты, такие как поры и трещины. Затем детали подвергаются механической (сверление/рассверливание отверстий, нарезание резьбы) и финишной термообработке (например, старению, азотированию) для придания необходимых свойств.

Контроль и испытания изделий и тестовых образцов. В общем случае на этом этапе может выполняться контроль внешнего вида и геометрических размеров изделий, плотности и пористости, твердости, шероховатости, химического и фазового состава, а также механические и климатические испытания в объеме, определяемом требованиями по стойкости изделий к внешним воздействующим факторам.

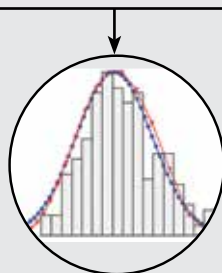


Входной контроль материалов

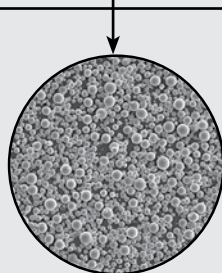
Металлопорошковая композиция (порошок)



Контроль фазового состава - рентгеновский дифрактометр



Контроль фракционного состава - лазерный анализатор размера частиц



Контроль морфологии - электронный микроскоп

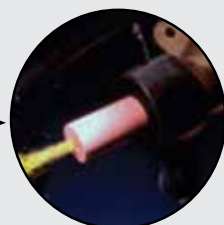


Контроль насыпной плотности - волюметр Скотта

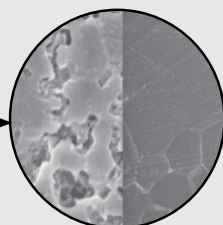


Контроль сыпучести - прибор Холла

Печать и постобработка



Пескоструйная обработка



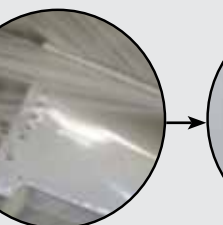
Горячее изостатическое прессование (HIP) - газостат



Точное фрезерование, сверление отверстий, нарезание резьб - механообрабатывающий центр



Финишная механообработка - оборудование для шлифования, полирования, галтовки, гидроабразивной обработки



Финишная термообработка - печи

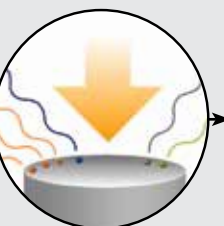
Контроль и испытания изделий и образцов



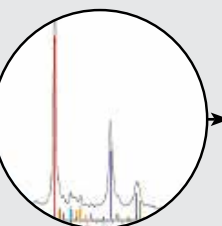
Контроль плотности - плотномер



Комбинированные испытания (климатические и механические)



Контроль химического состава - рентгено-флуоресцентный спектрометр, анализаторы O, N, S, C



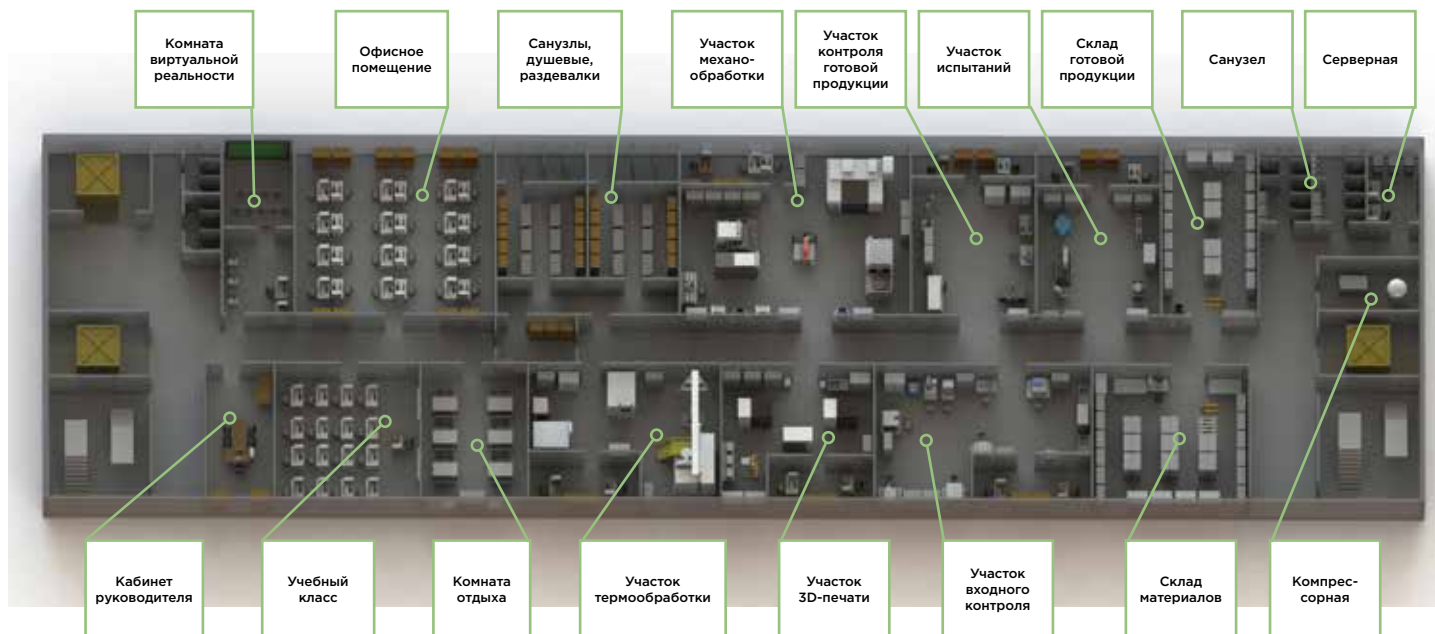
Контроль фазового состава - рентгеновский дифрактометр



Испытания на разрыв - универсальная испытательная машина



Испытания на ударную вязкость - маятниковый копер



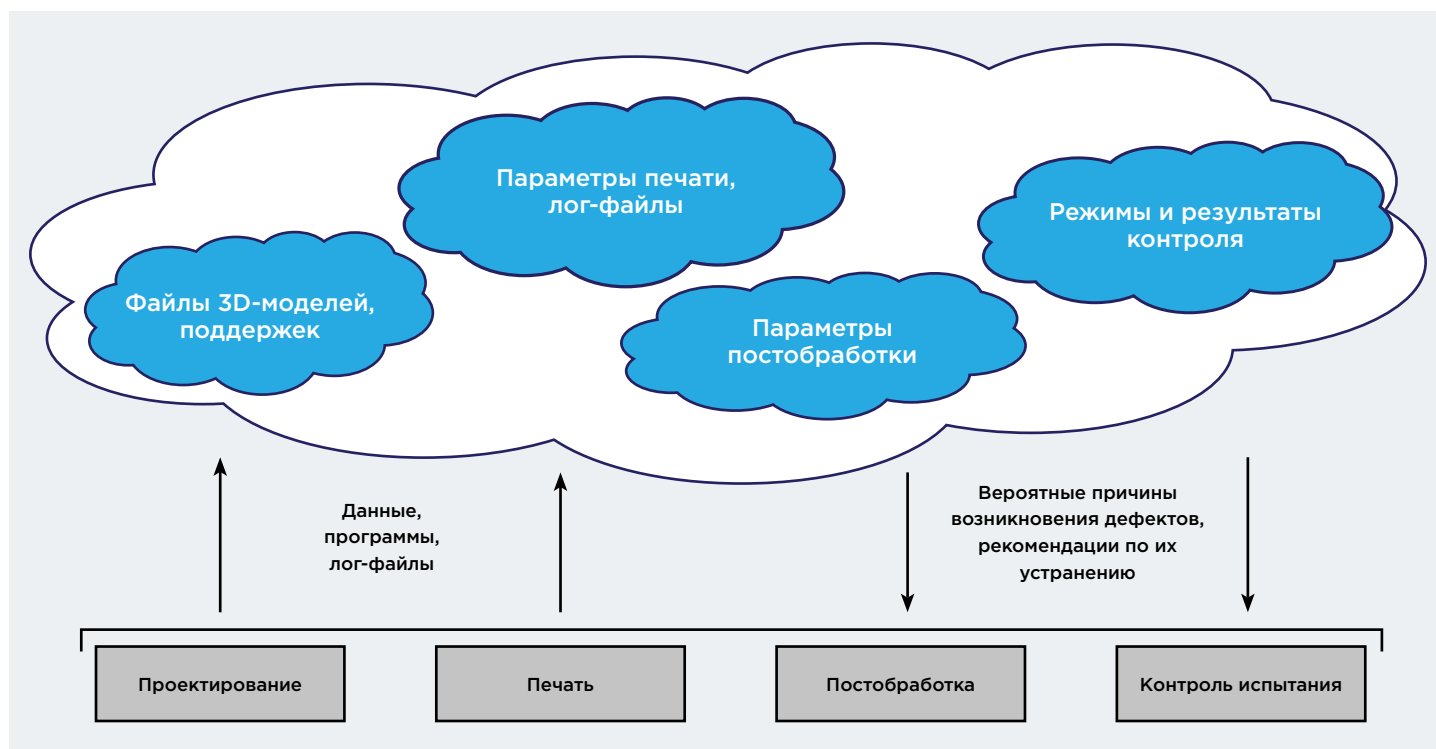
18

Планировка

Интегрированная программно-аппаратная среда

Полноценное внедрение цифрового производства, помимо непосредственно цифровых технологий, потребует создания интегрированной программно-аппаратной среды. С одной стороны, это обеспечит прослеживаемость и хранение файлов моделей со всех итераций проектирования, результатов механических, тепловых,

газо- и гидродинамических расчетов конструкций, программ и лог-файлов оборудования, программ, методик и протоколов испытаний. С другой стороны, экспертная подсистема при возникновении дефектов поможет выявить их вероятные причины и выдаст рекомендуемые корректирующие действия по их устранению.



19

Схема интегрированной аппаратно-программной среды

ЦЕНТР РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Для углубленного освоения цифровых технологий на базе ООО «Остек-СМТ» создан и активно работает центр развития технологий, специализирующийся на цифровых технологиях контроля и аддитивных технологиях производства. Компетенции сотрудников центра в области цифровых технологий и смежных областях:

- многолетний опыт и экспертные знания по компьютерной томографии, моделированию, 3D-сканированию и печати;
- собственные производственные мощности по аддитивным технологиям;
- три системы рентгеновской компьютерной томографии General Electric и вспомогательное оборудование;
- опыт выполнения НИОКР, в том числе связанных с аддитивными технологиями.

ЦТК — профессиональная площадка для отраслевых мероприятий с возможностью проведения прикладных мастер-классов и исследований на современном оборудовании. В частности, на базе центра осуществляется:

- проведение научных исследований для ведущих российских институтов, прикладных исследований по заказу предприятий, а также пробных исследований изделий;
- реализация программ повышения квалификации для специалистов;
- организация специализированных обучений для предприятий.



Рентгеновские компьютерные томографы
v|tome|x c450 и m300



3D-принтер **VX500**

Цифровые технологии производства изделий из металлов уже доказали свою состоятельность, для ряда отраслей промышленности это было проиллюстрировано на примерах в статье. Полноценное внедрение цифровых технологий не ограничивается одним 3D-принтером, а требует организации всей технологической цепочки, включая перепроектирование изделий под аддитивные технологии, входной контроль порошков, постобработку, контроль и испытания изделий. Мы приглашаем вас к «дегустации» цифровых технологий в центре развития технологий ГК Остек и их совместному внедрению на ваших предприятиях. ▢