

3D-печать металлами: краткие ответы на большие вопросы

Виктор Наумов

©2021 iQB Technologies



Виктор Наумов – технический эксперт, ведущий инженер-конструктор по направлению “Аддитивные технологии”. Окончил Высшую школу экономики (факультет прикладной математики, направление “Фундаментальная информатика, информационные технологии и кибернетика”). За пять лет работы в сфере 3D-печати успел протестировать львиную долю профессионального, промышленного и персонального 3D-оборудования, продаваемого на территории РФ. Исповедует свой собственный подход, основанный на тестах и опыте, но при этом сохраняет гибкость, так как прекрасно понимает, что тенденции производства могут меняться.

Интерес специалистов к 3D-печати металлическими порошками – достаточно молодой, но быстро развивающейся технологии – неизменно растет. Она уже зарекомендовала себя как эффективный метод создания передовых продуктов и в дальнейшем, с развитием цифровизации и переходом к Индустрии 4.0, будет играть всё большую роль в производстве. Предлагаемая вниманию читателей статья построена в форме ответов на самые популярные вопросы о 3D-печати, которые задают технические специалисты, ищущие новые пути оптимизации производства и внедрения инноваций.

В каких отраслях рекомендуется применять 3D-принтеры, печатающие металлическими порошками?

Самыми перспективными отраслями для внедрения аддитивных технологий, в том числе 3D-печати металлическими порошками, являются высокотехнологичные, наукоемкие производства, где в приоритете – создание или оптимизация сложных инновационных продуктов: авиакосмическая индустрия, оборонная промышленность, машиностроение, автомобилестроение, энергетика, судостроение, нефтегазовый сектор. Нельзя не упомянуть медицинскую технику и ювелирное дело, поскольку 3D-печать не имеет себе равных в создании индивидуализированных изделий.

Какие задачи решаются с помощью этой технологии?

В основном, 3D-печать металлическими порошками сегодня решает задачи опытного и мелкосерийного производства, прототипирования, НИОКР. Поэтому основными пользователями 3D-оборудования становятся крупные промышленные и исследовательские центры, а также учебные заведения, готовые инвестировать в проекты внедрения новой технологии.

Однако и изготовление конечных серийных изделий из металлов уже активно применяется такими крупными компаниями, как *General Electric*, *Airbus*, *Boeing*, *BMW*, *Michelin*. С появлением супермощных машин типа *SLM NXG XII 600* массовое аддитивное производство становится реальностью не столь отдаленного будущего.

В чём разница между различными процессами 3D-печати металлом?

Принцип работы подавляющего большинства современных 3D-принтеров основан на расплавлении металлических порошков в заранее сформированном слое (*Powder Bed Fusion*), обычно с помощью мощного лазера.

Вы можете часто встретить такие торговые наименования, как **SLM** (*Selective Laser Melting*), **DMLS** (*Direct Metal Laser Sintering*), **DMLM** (*Direct Metal Laser Melting*) и *Laser Cusing*. Однако на самом деле всем этим названиям в современных системах соответствует один и тот же процесс. Серьезные различия заключаются в том, как спроектированы и работают те или иные принтеры. Мы обычно используем термин “селективное лазерное плавление” или *SLM*-технология.



Рис. 1. S-образный кронштейн – элемент исполнительного механизма системы увеличения подъемной силы самолета, напечатанный на установке SLM 280

- Результаты применения SLM-технологии:
- уменьшение массы на 31% и общего времени сборки;
 - объединение трех деталей в одну;
 - снижение коэффициента использования материала с 17 до 1.5;
 - значительное уменьшение времени механической обработки

Зачем моему предприятию 3D-принтер? Разве отливать из металла не проще и дешевле?

Ошибочно думать, что 3D-печать призвана заменить литье или иные классические процессы. Она помогает решить специфические задачи, которые при использовании традиционных технологий окажутся невыполнимыми либо слишком трудоемкими, например:

- изготовление уникальных деталей сложной геометрии – в том числе мельчайших деталей, изделий с внутренними полостями и каналами, тонкими стенками и т.п.;
- уменьшение веса изделий;
- сокращение числа единиц в сборке (рис. 1);
- создание ячеистых структур.

Такие возможности обеспечивает топологическая оптимизация 3D-моделей (рис. 2). Если планируется использовать аддитивные технологии, проектировщики могут создавать практически любую геометрию.

Субтрактивные методы будут и дальше применяться в тех случаях, когда это эффективно с точки зрения стоимости, типа изделий и других требований. Вопрос заключается не в выборе между двумя технологиями, а в том, когда лучше применить аддитивную, а когда субтрактивную.

Иногда при производстве одной детали уместно задействовать оба метода. К примеру, если вы понимаете, что для пресс-формы надо изготовить вставку с конформным охлаждением, поскольку

это сократит цикл литья под давлением и улучшит качество конечных изделий, то используйте для этого 3D-принтер. При этом другие компоненты вы будете производить по классической технологии.

Следует воспринимать 3D-печать как еще один вариант технологии получения изделий – наряду с механической и пластической обработкой, литьем и др. При выборе вариантов производственного процесса взвешивайте тщательно все “за” и “против”.

Какова экономическая эффективность аддитивного производства?

Технология SLM позволяет значительно сократить цикл производства изделия. Если мы считаем только стоимость материалов, аддитивное производство выходит дороже традиционного. Но если учитывать все экономические факторы, начиная с сокращения потребления электроэнергии и кончая уменьшением налоговой нагрузки, 3D-печать помогает сэкономить достаточно серьезные средства.

Кроме того, SLM-технология дает возможность резко снизить коэффициент *Buy-to-Fly*, то есть соотношение между количеством закупленного материала и количеством материала в готовой детали.

Есть ли наглядный пример топологической оптимизации, показывающий выгоду SLM-технологии?

Возьмем две детали (рис. 3), выполняющие одну и ту же функцию с определенными нагрузками и имеющие определенный ресурс. По сути, это одна и та же деталь, но с разной геометрией. Форма первой детали оптимизирована для изготовления стандартными методами металлообработки. Как мы видим, это простая, довольно плоская геометрия, которую легко получить на обычном фрезерном станке.

Форма второй детали более сложная, и её изготовление на станке представляет серьезные трудности. Однако, согласно имеющимся данным, в ней меньше механических напряжений, меньше перемещение под нагрузкой и, самое главное, вес детали уменьшился на 1 кг. Для единичного изделия это

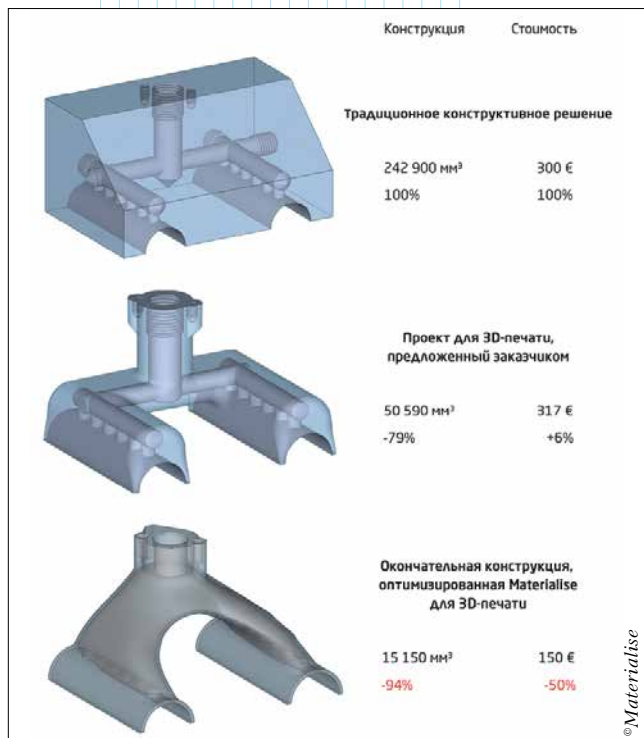


Рис. 2. Компания Materialise оптимизировала конструкцию металлического вакуумного захвата с целью снизить стоимость производства серии



Рис. 3

немного, но если таких деталей выпускают сто тысяч в год, то суммарно можно сэкономить сто тонн металла.

Какие ограничения существуют?

У предприятий, решивших внедрить аддитивную технологию печати металлом в свой производственный цикл, могут возникнуть следующие трудности:

- необходимость в последовательных научных исследованиях (в том числе для изучения свойств металлов);
- ограничения в размерах для объектов, создаваемых на 3D-принтерах;
- большие первоначальные вложения из-за высокой стоимости оборудования и расходных материалов;
- особые требования к помещению и условиям эксплуатации;
- необходимость аттестации оборудования и сертификации изделий;
- сложность в адаптации 3D-решений к существующим технологическим циклам на производстве.

Каковы максимальные габариты печатаемых изделий?

Исторически сложившимся отраслевым стандартом для 3D-принтеров на базе селективного лазерного плавления является платформа размером 250 × 250 мм с высотой построения 250÷300 мм.

На сегодня самые большие камеры построения имеют аддитивные установки *SLM Solutions*. У системы *SLM 800* размеры камеры 500 × 280 × 850 мм, у новейшей машины *SLM NXG XII 600* – 600 × 600 × 600 мм (рис. 4).

Какова минимальная толщина стенки?

Диаметр пучка лазера в аддитивной установке печати металлами составляет 70÷80 микрон.

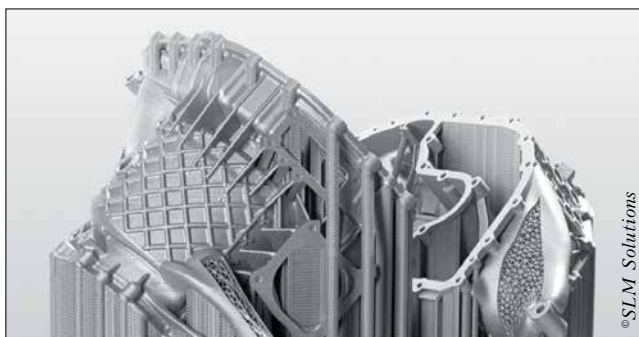


Рис. 4. Одно из первых изделий, созданных с помощью 3D-принтера SLM NXG XII 600: металлический корпус силового агрегата E-Drive для спорткара Porsche

*Размеры: 590 × 560 × 367 мм
Вес: 15,5 кг
Материал: AlSi10Mg
Время изготовления: 21 час*

Можно напечатать стенку детали за два прохода лазера, так что минимальная толщина будет всего лишь 140÷150 микрон.

Сколько по времени выращивается модель? От чего зависит скорость печати?

Построение металлического изделия требует от нескольких часов до нескольких суток. К примеру, модель высотой 3÷4 см будет печататься от двух до восьми часов, в зависимости от её площади и высоты. Тестовая печать на принтере с камерой построения 280 × 280 × 360 мм занимает примерно сутки.

Производительность аддитивных установок зависит от разных факторов:

- Количество и мощность лазеров. Чем больше лазеров, тем выше скорость работы и больше количество производимых деталей (мощность лазера – 400, 700 или 1000 W);
- Распределение порошка. Металлический порошок, в зависимости от конструкции системы, может распределяться в двух направлениях или только в одном. Подача порошка в двух направлениях обеспечит значительную экономию времени производства;
- Подача порошка может быть непрерывной или периодической. В случае использования системы с периодической подачей может потребоваться остановка 3D-принтера для дозаправки во время выполнения построения, что замедляет процесс;
- Возможность настроить рабочие параметры системы для увеличения скорости.

Какие виды металлов применяются в аддитивном производстве?

Металлические порошки представляют собой мелкодисперсные сферические гранулы. Свойства получаемой продукции в значительной степени зависят от свойств используемого в принтерах металлического порошка – степени чистоты, текучести и объемной плотности.

Современные аддитивные технологии предполагают применение порядка двадцати протестированных и готовых к эксплуатации материалов. В



Рис. 5. Благодаря индивидуальному протезу тазобедренного сустава, созданного с помощью 3D-печати из титанового порошка, пациент смог вернуться к нормальной жизни

их числе – инструментальные, нержавеющей, жароупорные сплавы, алюминиевые и титановые сплавы, медицинские кобальт-хром и титан.

Поскольку металлов очень много, и каждый из них обладает определенными свойствами, материал в каждом случае подбирают исходя из технологических задач. К примеру, если в технологической цепочке необходимо задействовать титановый сплав, то технолог сможет выбрать один из множества титановых сплавов – с теми свойствами, которые нужны для производства конкретного изделия (рис. 5).

Как производятся металлические порошки?

Существует несколько технологий изготовления сферического порошка. Основным способом является атомизация, а именно:

- ультразвуковой ударно-кинетический метод макрокапельной атомизации и микрокапельной диспергации металлов;
- ультразвуковой капельно-волновой метод ультразвуковой атомизации металлов.

Процесс происходит в атомизере, где металл распыляется в специальной камере.

Какая дисперсность у металлов для 3D-печати?

У каждого металла своя дисперсность. При 3D-печати используются порошки дисперсностью от 4 до 80 микрон. Например, в Европе порошки меньше 8 микрон запрещены, так как они слишком взрывоопасны.

Сравнивалась ли прочность изделий, полученных с помощью 3D-печати и классических технологий?

Прочностные характеристики изделий зависят от самих изделий, точнее от их геометрии, от поставленных задач, нагрузки, условий применения (морская среда, космос и т.д.).

SLM-печать дает возможность добиться прочностных показателей, сопоставимых с традиционными технологиями. Однако примерно в половине случаев изделие, отлитое из металла или же отфрезерованное из идеального блока материала, будет прочнее в сравнении с результатом 3D-печати. Причина заключается в пористости, которую вызывают аддитивные технологии. Но при этом напечатанные объекты становятся более упругими и выдерживают более высокие нагрузки, особенно если мы говорим о таких материалах, как титан, сталь и даже различные сплавы алюминия. Алюминий – достаточно мягкий металл, пористость добавляет ему упругости.

Характеристики соплового аппарата газотурбинного двигателя (ГТД), спроектированного в Самарском университете и изготовленного из порошка сплава *Inconel 738* (рис. 6), приведены в табл. 1.

Чтобы обрести уверенность, необходимо построить 3D-модель конкретного изделия, прочитать всё в комплексе, провести анализ

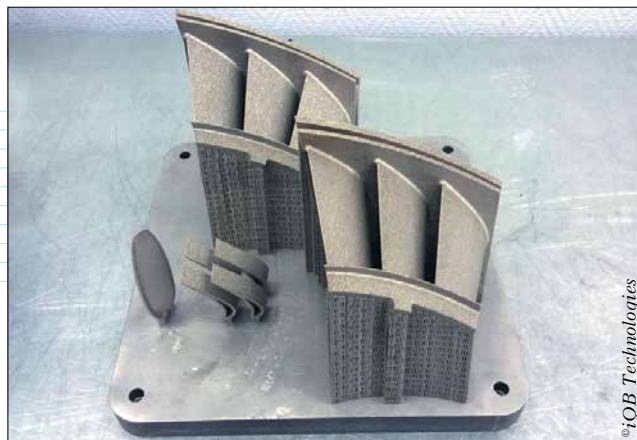


Рис. 6. Проект Самарского университета: сопловый аппарат второй ступени газотурбинного двигателя

и получить предварительные данные по изделию. После этого можно задуматься о возможности его изготовления и тестирования в лаборатории. Такой подход поможет оптимизировать производство и не будет слишком затратным.

Надо отметить, что есть такие технологии, как горячее изостатическое прессование (ГИП), которые позволяют вывести механические свойства изделий на уровень, обеспечиваемый классическими технологиями. На титановых сплавах фактически можно получить 80-90% от прочности даже не литых, а кованных изделий! За счет ГИП удается устранить внутренние дефекты, возникающие из-за неоднородности гранулометрического состава порошка, и достичь практически стопроцентной плотности.

Часто задают вопрос, может ли 3D-печать обеспечить более высокую прочность, чем классические технологии. В некоторых случаях – да. Скажем, за счет поверхностного легирования порошков можно получить структуры, действительно обладающие повышенными механическими свойствами. Это могут быть, к примеру, *суперинварные сплавы* (ферромагнитный сплав железа с никелем и кобальтом, отличающийся необыкновенно малым и стабильным значением температурного коэффициента линейного расширения в интервале температур от -60°C до +60°C). То есть, существуют технологии,

Табл. 1. Характеристики соплового аппарата ГТД из порошка *Inconel 738*

Образец	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Отн. удлинение, %
Исходный	1030	600	3.7
После термообработки	1430	820	8.5

которые могут обеспечить уникальные свойства, в том числе механические и теплофизические.

Можно ли предсказать механические свойства получаемых материалов – предел текучести, размер зерна, пористость?

3D-печать металлическими порошками обеспечивает очень высокую повторяемость.

Вот что говорит **Антон Агаповичев**, старший преподаватель кафедры технологий производства двигателей Самарского университета: “Опыт работы показывает, что преемственность механических свойств есть. Определив оптимальный режим, мы печатаем стандартные цилиндрические образцы для подтверждения этих свойств. В дальнейшем, когда начинаем изготавливать детали, вместе с одной из деталей мы специально изготавливаем образцы-свидетели, на которых эти механические свойства постоянно подтверждаем. Сейчас ведутся научные работы по предсказанию механических свойств, но они касаются больше проектирования самих металлов”.

Однако предсказать с помощью расчетного программного обеспечения предел текучести, пористость и другие механические характеристики пока что невозможно. Наоборот, заранее устанавливаются определенные свойства для каждого материала, которые и используются в дальнейшем для моделирования процесса 3D-печати. Это обратный процесс – нам необходимо знать свойства материалов для того, чтобы спрогнозировать различные дефекты.

Как выполняется подготовка модели к 3D-печати? Какое ПО лучше всего использовать?

Чтобы изготовить деталь на 3D-принтере, прежде всего требуется получить STL-файл. Для этого мы конвертируем твердотельную 3D-модель детали в полигональную, а затем выполняем операции исправления, улучшения, редактирования, подготовки платформы, *нестинга*, генерации поддержек, а также измерений и анализа.

Следующие этапы – *слайсинг* (разделение на слои) и создание управляющей программы для 3D-принтера.

Этапы работы от конвертирования в формат STL до слайсинга выполняются с помощью специализированного программного обеспечения.

Встроенное ПО принтеров предназначено только для подготовки УП и не может выполнять анализ, исправлять ошибки, оптимально располагать детали, создавать поддержки и т.д.

Наиболее гибкое и комплексное программное решение предлагает компания *Materialise*, разработавшая для профессионалов 3D-печати программный продукт **Magics**. Он позволяет с высокой скоростью и точностью создавать отдельные слои компонентов на основании трехмерных данных, получаемых из САПР или в результате 3D-сканирования. Решение покрывает полный цикл аддитивного производства – от импорта данных (в STL и другие форматы) и анализа качества до подготовки платформы и постобработки (рис. 7).

Имеется ли принципиальное отличие между Magics и такими программами, как Amphyon, Simufact, 3D Expert и им подобными?

Amphyon, *Simufact*, а также аналогичный российский софт – узконаправленные программные продукты. Они предлагают модули для решения отдельных задач (симуляция, топологическая оптимизация), тогда как *Materialise Magics* – комплексное решение “под ключ” для аддитивного производства.

В отношении *3D Expert* от *3D Systems*, можно сказать, что это софт очень специфичный, заточенный преимущественно под принтеры этой компании. Решение от *Materialise*, напротив, сотрудничает со всеми крупнейшими производителями 3D-оборудования, и у *Magics* есть огромная библиотека аддитивных установок. Пользователь может выбрать нужный принтер и затем “подтягивать” все настройки по платформе, построению и т.д. Если говорить непосредственно о симуляции, то надо отметить, что в соответствующем модуле *3D Expert* нет возможности выполнять анализ после отделения изделия от поддержек.

Как настраиваются рабочие параметры 3D-принтера?

Многие ошибочно считают, что 3D-принтер должен производить качественную деталь по нажатию кнопки “Пуск”. Специалист, работающий на аддитивной машине, в идеале должен быть одновременно и конструктором и, в большей степени, технологом – тем, кто разбирается в физике происходящих

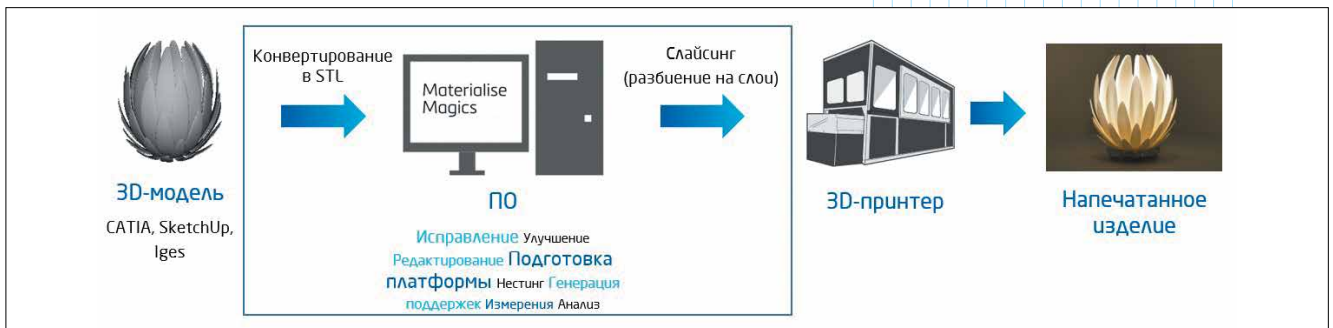


Рис. 7. Применение ПО Materialise Magics в цикле аддитивного производства

процессов и влиянии тех или иных параметров на качество получаемой детали. Таких параметров очень много – более полутора сотен.

Для каждого материала и каждой аддитивной установки требуется настроить множество параметров – мощность лазера, скорость сканирования, ширина полосы, параметры фокусировки. Это исключительно сложный процесс, требующий высокого профессионализма, опыта и творческого подхода.

Однако каждому пользователю, по мере повышения уровня квалификации, всё же потребуются производить некоторые настройки базовых параметров, которые являются необходимыми для получения оптимальных результатов печати. К ним относятся, например, скорость построения, качество поверхности, пористость, некоторые физико-химические свойства металлов.

Проводится ли обучение работе с аддитивными установками?

Если вы планируете приобрести 3D-принтер, компания *iQB Technologies* подберет необходимую конфигурацию под ваши задачи. Мы выполняем установку и настройку оборудования и проводим необходимое обучение по использованию как принтера, так и программного обеспечения. Как было сказано выше, настройка непосредственно параметров печати целиком зависит от квалификации оператора.

Какие требования предъявляются к эксплуатации 3D-принтеров?

К помещениям и условиям эксплуатации такого оборудования предъявляются особо строгие требования. Мелкодисперсные порошки несут опасность при вдыхании, поэтому операторы должны работать в защитной спецодежде и обеспечивать герметичность при эксплуатации машины.

SLM-системы не требуют стерильных условий, но им нужна относительно чистая рабочая среда для предотвращения загрязнения лазерной оптики. Офисные помещения не подходят в качестве места эксплуатации, поскольку будет присутствовать

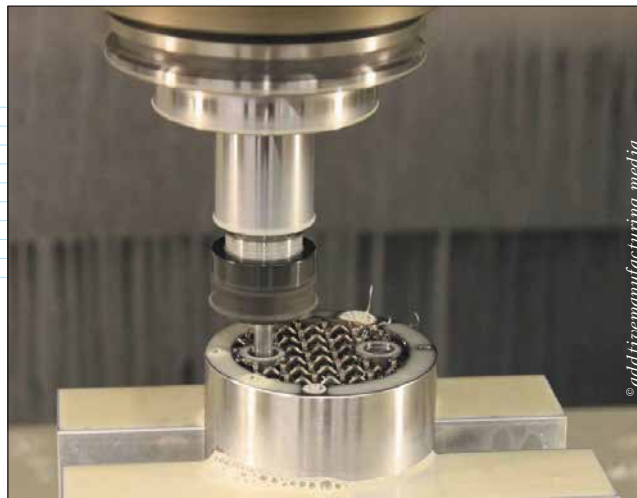


Рис. 9. Постобработка

порошок – а это значит, что находящиеся поблизости люди должны носить средства индивидуальной защиты, когда машина открыта. По этой же причине помещение, в котором используется система, должно быть заперто, когда дверцы машины открыты.

Стандартные требования к работе с металлическим 3D-принтером:

- трехфазное напряжение 380V, рабочий режим потребления – 7 kW, в пике – до 12 kW;
- подвод инертного газа к машине (3÷5 баллонов);
- система кондиционирования в помещении (температура в диапазоне от +18°C до +23°C), оптимально – в режиме осушения воздуха;
- компрессор, либо линия с подводом сжатого воздуха (4 атмосферы);
- техническая вода для промывки фильтров и изделий.

Необходима ли механическая постобработка изделиям, созданным по SLM-технологии?

Процесс селективного лазерного плавления нельзя отнести к высокоточным, да и качество поверхности напечатанных деталей сопоставимо с литьем по выжигаемым и выплавляемым моделям. Поэтому элементы конструкции деталей с более высокими требованиями по шероховатости и плоскостности поверхности необходимо подвергать последующей чистовой механической обработке.

Для этого используются различные станки – фрезерный, полировальный, шлифовальный, возможно также применение электроэрозии и горячего изостатического прессования.

Как проводится термообработка напечатанных изделий? В частности, как решается проблема снятия внутренних напряжений?

Материалы, применяемые в установках с селективным лазерным плавлением, ведут себя так же, как и обычные металлы. Полученные детали



Рис. 8. Настройка оборудования SLM Solutions

(заготовки) можно подвергать термообработке – как для снятия остаточных напряжений (в зависимости от материала, это среднетемпературный отпуск или нормализация), так и для изменения структуры материала, повышения механических свойств – прочности, твердости, пластичности.

Разным металлам требуется разная термообработка, и иногда для этого используются специально подогреваемые платформы. В процессе построения, при плавлении металла, вырабатывается большое количество тепла, которое нужно отводить. Роль радиаторов, отводящих тепло, выполняют поддержки, применяемые при построении изделий. В некоторых случаях сама деталь без поддержек приваривается к рабочему столу как к радиатору.

Характерно, что задача, которая при механической обработке решается на каждом этапе производства, теперь замещается одной операцией в конце производственного процесса. К примеру, проект, требовавший 196 часов мехобработки, выполняется средствами аддитивного производства за 8 часов, плюс 15 минут на дополнительную обработку посадочных мест.

Какое дополнительное оборудование потребуется?

Производство с применением 3D-печати металлическими порошками требует дополнительного оборудования для поддержки процесса печати, включая внешний охладитель и просеиватель порошка.

Охладитель, необходимый для охлаждения лазера и оптики, часто помещают в отдельное помещение, поскольку он производит шум, тепло и влажность. Охлажденная вода подается в установку селективного лазерного плавления, и существуют особые требования к минимальному размеру и максимальной высоте подъема соответствующих труб. Просеиватель служит для обработки нерасплавленного порошка после каждого построения: он отделяет мелкие частицы, которые затем могут быть повторно использованы, от более крупных частиц и загрязняющих примесей, которые обычно утилизируются.

Что касается оборудования для постобработки, в минимальный набор входит следующее (рис. 10):

- 1 Муфельная печь для снятия остаточного напряжения металла;
- 2 Дремель (*Dremel* – торговая марка ручного электро- и пневмоинструмента, ставшая нарицательной), ленточная пила или электроэрозионный станок для удаления поддержек;
- 3 Дробеструйная или пескоструйная камера для постобработки изделия и улучшения качества поверхности.



Рис. 10. Зона постобработки с печью, столом с вытяжкой и дробеструйной камерой

Как осуществляется контроль качества напечатанного изделия? Возможен ли контроль в процессе печати?

Существуют программные продукты (к примеру, у компании *Materialise*), которые могут еще до запуска печати прогнозировать изменения в геометрии во время построения. Но непосредственный контроль геометрии возможен только после завершения печати.

Так как все 3D-принтеры на основе технологии SLM относятся к группе *Bed Deposition*, контролировать геометрию во время печати невозможно, поскольку напечатанная часть изделия всегда находится в слое неспеченного (несплавленного) порошка. Однако в машинах *SLM Solutions* применяется система контроля нанесения слоя порошка в течение всего процесса печати.

Проверка точности и качества изготовления выполняется, в зависимости от требований к точности, стандартными инструментами – от штангенциркуля до 3D-сканера. Для контроля внутренней структуры (пористости, сплошности, плотности материала) применяются компьютерная томография, рентген-контроль. Для выявления трещин на поверхности изделий часто прибегают к методу люминесцентного контроля. Механические свойства подтверждают путем совместного изготовления образцов-свидетелей и их последующих испытаний.

Имеются ли в России специалисты по ремонту и обслуживанию оборудования для 3D-печати?

Наша компания *iQB Technologies* (<https://iqb.ru>) всегда обучает своих инженеров работе на 3D-оборудовании и очень плотно работает с поставщиками – в случае с 3D-печатью это *SLM Solutions* и *Sharebot*.

Компания *SLM Solutions* – немецкая, но у нее в России есть инженеры, которые полностью решают вопросы ремонта, обслуживания и даже очень сложные технические проблемы. 🤖