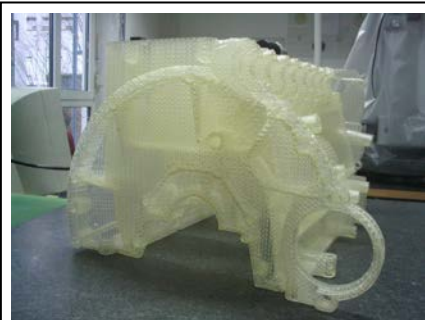


## Аддитивные технологии в опытном литейном производстве. Технологии литья металлов и пластмасс с использованием синтез-моделей и синтез-форм

(Д. т. н. Михаил Зленко, НИИМашТех ОНТИ СПбГПУ; инж. Забеднов П. В., ФГУП «Внештехника»)

**ВВЕДЕНИЕ.** При разработке и создании новой промышленной продукции особое значение имеет скорость прохождения этапов НИОКР, которая в свою очередь существенно зависит от технологических возможностей опытного производства. В частности это касается изготовления литейных деталей, которые часто являются самой трудоемкой и дорогостоящей частью общего проекта. При создании новой продукции, особенно на этапе ОКР в опытном производстве, для которого характерны вариантные исследования, необходимость частых изменений конструкции и, как следствие, постоянной коррекции технологической оснастки для изготовления опытных образцов, проблема быстрого изготовления литейных деталей становится ключевой. В опытном производстве преимущественными остаются традиционные методы изготовления литейной оснастки (в основном деревянные модели) вручную или с использованием механообрабатывающего оборудования, реже ЧПУ. Это связано с тем, что на этапе ОКР в условиях неопределенности результата, когда конструкция изделия еще не отработана, не утверждена, для изготовления образцов не целесообразно создавать «нормальную» технологическую оснастку под серийное производство. В этих условиях весьма дорогостоящая продукция – литейная оснастка, оказывается, по сути разовой, которая в дальнейшей работе над изделием не используется в связи с естественными и существенными изменениями конструкции изделия в ходе ОКР. Поэтому каждая итерация, каждое приближение конструкции детали к окончательной версии требует зачастую и новой технологической оснастки, поскольку переделка старой оказывается чрезмерно трудоемкой или вообще не возможной. И в этой связи традиционные методы оказываются не только дороги в плане материальных потерь, но и чрезвычайно затратны по времени.

Переход на цифровое описание изделий – **CAD**, и появившиеся вслед за **CAD** (вследствие **CAD**!) аддитивные технологии произвели настоящую революцию в литейном деле, что особенно рельефно проявилось именно в высокотехнологичных отраслях – авиационной и аэрокосмической области, атомной индустрии, медицине и приборостроении, в отраслях, где характерным является мало серийное, зачастую штучное (в месяц, год) производство. Именно здесь уход от традиционных технологий, применение новых методов получения литейных синтез-форм и синтез-моделей за счет технологий послойного синтеза дало возможность радикально сократить время на создание новой продукции. Например, характерная для автомобильного



**Quick-cast** модель и отливка блока цилиндров (чугун)

двигателестроения деталь – блок цилиндров. Для изготовления первого опытного образца традиционными методами требуется не менее 6-ти месяцев, причем основные временные затраты приходится на создание модельной оснастки для литья «в землю».

Использование для этой цели технологии **Quick-Cast** (выращивание литейной модели из фотополимера на **SLA**-машине с последующим литьем по выжигаемой модели) сокращает срок получения первой отливки с полугода до двух недель!

Эта же деталь может быть получена менее точной, но вполне пригодной для данных целей технологией – литьем в выращенные песчаные формы. Согласно этой технологии в изготовлении литейной модели вообще нет необходимости: выращивается «негатив» детали – форма. Форма для литья такой крупной детали, как блок цилиндров, выращивается фрагментами, затем собирается в опоке и производится заливка металла. Весь процесс занимает несколько дней. Значительная часть «обычных» литейных изделий, не имеющих специальных требований по точности литья или внутренней структуры, может быть получена в виде готовой продукции в течение нескольких дней:



Фрагменты песчаной формы

выращивание восковой модели (1 день); формовка+сушка формы (1 день); прокатка формы и собственно литье (1 день); итого: 3-4 дня с учетом подготовительно-заключительного времени. Практически все автомобильные и авиастроительные компании промышленно развитых стран имеют в арсенале своего опытного производства десятки **AF**-машин, обслуживающих задачи НИОКР. Более того, эти машины начинают использоваться, как «обычное» технологическое оборудование в единой технологической цепи и для серийного производства.

## 1. Аддитивные технологии и быстрое прототипирование

**Additive Fabrication (AF)** или **Additive Manufacturing (AM)** – принятые в англоязычной технической лексике термины, обозначающие аддитивный, т. е. «добавлением», метод получения изделия (в противоположность традиционным методам механообработки путем «вычитания» (subtractive), материала из массива заготовки). Они употребляются наряду со словосочетанием **Rapid Prototyping** (или **RP**-технологии) – Быстрое Прототипирование, но имеют более общее значение, точнее отражающее современное положение. Можно сказать, что **Rapid Prototyping** в современном понимании является частью **AF-технологий**, «отвечающей» за собственно прототипирование методами послойного синтеза. **AF**- или **AM**-технологии охватывают все области синтеза изделий, будь то прототип, опытный образец или серийное изделие.

Суть **AF**-технологий, как и **RP**-технологий, состоит в послойном построении, послойном синтезе изделий – моделей, форм, мастер-моделей и т. д. путем фиксации слоев модельного материала и их последовательного соединения между собой различными способами: спеканием, сплавлением, склеиванием, полимеризацией - в зависимости от нюансов конкретной технологии. Идеология аддитивных технологий базируется на цифровых технологиях, в основе которых лежит цифровое описание изделия, его компьютерная модель или т. н. **CAD**-модель. При использовании **AF**-технологий все стадии реализации проекта от идеи до материализации (в любом виде – в промежуточном или в виде готовой продукции) находятся в «дружественной» технологической среде, в единой технологической цепи, где каждая технологическая операция также выполняется в цифровой **CAD/CAM/CAE**-системе. Практически это означает реальный переход к «бумажным» технологиям, когда для изготовления детали традиционной бумажной чертежной документации в принципе не требуется.

В настоящее время на рынке существуют различные **AF**-системы, производящие модели по различным технологиям и из различных материалов. Однако общим для них является послойный принцип построения модели. Особую роль **AF**-технологии играют в модернизации литейного производства, они позволили решать ранее не решаемые задачи, «выращивать» литейные модели и формы, которые невозможно

изготовить традиционными способами. Радикально сократились сроки изготовления модельной оснастки. Развитие технологий вакуумного формования и вакуумного литья по формам и моделям, полученным аддитивными технологиями, дало возможность сократить сроки изготовления пилотных, опытных образцов и в ряде случаев серийной продукции в разы и десятки раз. Последние достижения в области порошковой металлургии позволили существенно расширить возможности аддитивных технологий по непосредственному «выращиванию» функциональных деталей из металлов и получению новых конструкционных материалов с уникальными свойствами (технологии «**spray forming**» и др.).

**AF**-технологии с полным основанием относят к технологиям XXI-го века. Кроме очевидных преимуществ в скорости и, зачастую, в стоимости изготовления изделий, эти технологии имеют важное достоинство с точки зрения охраны окружающей среды и, в частности, эмиссии парниковых газов и «теплого» загрязнения. Аддитивные технологии имеют огромный потенциал в деле снижения энергетических затрат на создание самых разнообразных видов продукции.

«Под давлением» глобального развития трехмерных **CAD/CAM/CAE**-технологий современное литейное, и в первую очередь опытное, производство претерпевает существенную модернизацию, которая имеет целью создать условия для полноценной реализации принципа «безбумажных» технологий в течение всего процесса создания нового изделия – от проектирования и разработки **CAD**-модели, до конечного продукта, быть неотрывной частью цикла проектирования и изготовления прототипов, опытных образцов и малых серий изделий различного назначения с широкой номенклатурой применяемых материалов. И для этой цели «литейщики» оснащаются совершенно новым для них оборудованием, дающим им новые возможности для удовлетворения «капризов» конструкторов, но одновременно требующим от них освоения новых знаний, заставляя и технологов, и конструкторов говорить на одном **3D**-языке, при этом, если не устраняя, то существенно ослабляя извечное противостояние технолога и конструктора.

Современные Центры Аддитивных Технологий часто в своем полном названии содержат (совершенно справедливо) слова «конструкторско-технологический», тем самым подчеркивается единство, а не борьба противоречий, между конструктором и технологом. Эти центры, конечно, в рамках финансовых ограничений, по возможности оснащаются комплексно для решения широкого круга задач. Учитывая специфику российской промышленности, где зачастую в рамках одного предприятия сосредоточено производство огромной номенклатуры изделий из различных материалов, где многие предприятия по разным причинам, но вынуждены содержать свое «натуральное хозяйство», такой подход является вполне рациональным. Опытное литейное производство для получения и металлических, и пластмассовых изделий имеют много общего, а с применением **AF**-технологий становятся еще более близкими и по применяемому оборудованию, и по технологическим приемам, и по обучению и подготовки профессиональных кадров.

## **2. Аддитивные технологии и литейное производство**

Как уже отмечалось, особое значение **AF**-технологии имеют для ускоренного производства литейных деталей. **AF**-машины используются для получения:

- **литейных моделей;**
- **мастер-моделей;**
- **литейных форм и литейной оснастки.**

\* в рамках одной статьи невозможно привести описание всех технологий и всех машин для послойного синтеза. Здесь мы ограничимся лишь теми технологиями, которые имеют наибольший интерес применительно к задачам машиностроения, опуская из рассмотрения довольно обширную тему технологий и машин, предназначенных для решения специальных задач общей медицины, биологии и стоматологии, электронной или ювелирной промышленности.

## 2.1. Изготовление литейных синтез-моделей

**Литейные модели** могут быть получены (выращены) из:

- порошкового полистирола (для последующего литья по выжигаемым моделям);
- фотополимерных композиций, в частности, по технологии **Quick-cast** для последующего литья по выжигаемым моделям или по технологии **MJ (Multi Jet)** для литья по выплавляемым моделям;

### 2.1.1 Синтез-модели из порошкового полистирола

Полистирол широко используется в качестве модельного материала для традиционного литья по выжигаемым моделям. Однако в связи с бурным развитием технологий послойного синтеза приобрел особую популярность в области прототипирования, а также для промышленного изготовления штучной и малосерийной продукции. Полистирольные модели изготавливаются на **AF**-машинах, работающих по технологии **SLS – Selective Laser Sintering** – послойное спекание порошковых материалов. Эту технологию часто применяют тогда, когда необходимо быстро сделать одну или несколько отливок сложной формы относительно больших



**SLS-машина SinterStation Pro и модель колеса турбины**

размеров с умеренными требованиями по точности. Суть технологии заключается в следующем. Модельный материал – полистирольный порошок с размером частиц 50-150 мкм, наносится специальным роликом на рабочую платформу, установленную в герметичной камере с атмосферой инертного газа (азот). Лазерный луч «пробегают» там, где компьютер «видит» в данном сечении **CAD**-модели «тело», как бы заштриховывая сечение детали, как это делает конструктор карандашом на чертеже. Здесь лазерный луч является источником тепла, под воздействием которого происходит спекание частичек полистирола (рабочая температура около 120°C). Затем платформа опускается на 0,1-0,2 мм и новая порция порошка наносится поверх отвержденного, формируется новый слой, который также спекается с предыдущим. Процесс повторяется до полного построения модели, которая в конце процесса оказывается заключенной в массив неспекенного порошка. Модель извлекается из



**Полистирольная модель и отливка головки цилиндра ДВС**

машины и очищается от порошка. Преимуществом данной технологии является отсутствие поддержек – они не нужны, поскольку модель и все ее строящиеся слои во время построения удерживаются массивом порошка. Имеющиеся на рынке машины фирм **3D Systems**

и **EOS** позволяют строить достаточно крупные модели – размерами до 550x550x750 мм (это важно, это позволяет строить крупные модели зацело, без необходимости склейки отдельных фрагментов, что повышает точность отливки и надежность, особенно вакуумного литья). Весьма высокая детализация построения моделей: могут быть построены поверхностные элементы (номера деталей, условные надписи и пр.) с толщиной фрагментов до 0,6 мм, гарантированная толщина стенки модели до 1,5 мм.

Принципиально технологии литья по восковым и по полистирольным моделям не отличаются. Используются те же формовочные материалы, то же литейное и вспомогательное оборудование. Разве что восковая модель - «выплавляемая», а полистирольная модель – «выжигаемая». Отличия лишь в нюансах формования и термообработки опок. Однако эти нюансы имеют значение. Работа с полистирольными моделями требует внимания при выжигании: выделяется достаточно много газов (горючих), которые требуют нейтрализации, материал частично выгорает в самой форме, есть опасность образования золы и засорения формы, нужно предусмотреть возможность стекания материала из застойных зон, безусловным требованием является использование прокалочных печей с программаторами, причем программа выжигания полистирола существенно отлична от программы вытапливания воска. Но в целом, при определенном навыке и опыте, литье по выжигаемым полистирольным моделям дает очень хороший результат.



Полистирольная модель (после выращивания и инфильтрации) и отливка, чугун

К недостаткам технологии нужно отнести следующее. Процесс спекания порошка – это тепловой процесс со всеми присущими ему недостатками: неравномерность распределения тепла по рабочей камере, по массиву материала, коробление вследствие температурных деформаций. Второе. Порошок полистирола не сплавляется, как например, порошки полиамида или металла, о которых речь пойдет ниже, а именно спекается – структура модели пористая, похожа на структуру пенопласта. Это делается специально для облегчения в дальнейшем удаления материала модели из формы с минимальными внутренними напряжениями при нагревании. Построенная модель, в отличие от, например, восковки, требует весьма аккуратного обращения и при очистке, и при дальнейшей работе в подготовке к формованию. Для придания прочности и удобства работы с ней (сочленения с литниковой системой, формовки) модель пропитывают специальным составом на восковой основе – процесс называется инфильтрацией. Модель помещают в специальную печь и при температуре около 80°C пропитывают указанным составом (на фотографии показаны инфильтрированные модели красного цвета, из машины же извлекаются полистирольные модели снежно-белого цвета).



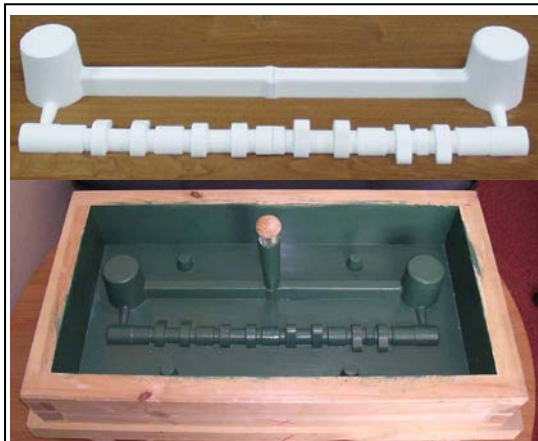
Полистирольные модели и отливки, алюминий

Это также несет в себе опасность деформирования модели и требует определенных навыков персонала. Правда, в последнее время появились полистирольные модельные порошки, не требующие инфильтрации. Это ослабляет, но не устраняет полностью проблему. Кроме того, инфильтрат в виде воска далеко не всегда является вредной необходимостью. Он расплавляется в опоке при выжигании первым, раньше полистирола и когда последний приобретает текучесть,

способствует его выносу из формы, тем самым уменьшая массу «выжигаемой» части полистирола и снижая вероятность образования золы.

Таким образом, когда мы говорим об «умеренных требованиях к точности» при использовании **SLS**-технологии, имеем в виду отмеченные объективные причины, по которым точность изделий, полученных **SLS**-технологий, не может быть выше, чем при использовании других технологий, не связанных с температурными деформациями. Таковой, например, является технология фотополимеризации.

Говоря об **SLS**-технологии, отметим еще одно, не связанное с полистиролом, но «родственное» направление, иногда используемое в литейном деле. Это



**SLS**-модель распределительного вала и формовочный ящик для получения

выращивание литейной формовочной оснастки из порошкового полиамида. Полиамид широко используется для функционального прототипирования, полиамидные модели достаточно прочные и во многих случаях позволяют воспроизвести прототип максимально близко к «боевому» изделию. В ряде случаев оказывается экономически целесообразным применять полиамидные модели в качестве альтернативы деревянным. Модель выращивают, так же как и полистирольную. При этом по возможности делают ее полую с минимально возможной толщиной стенок (с целью минимизации вышеуказанных температурных деформаций!).

Затем модель для придания прочности и жесткости заполняют изнутри эпоксидной смолой. После этого закрепляют в обычном формовочном ящике, красят и далее - по традиционной технологии формования. Пример такой «быстрой» технологической оснастки для формовки распределительного вала ДВС показан на рисунке. Ввиду большой длины модель выращена из двух частей, части склеены, заполнены эпоксидной смолой и закреплены в формовочном ящике; продолжительность операций 2 дня.

### 2.1.2 Синтез-модели из фотополимеров

Суть технологии в использовании специальных светочувствительных смол, которые отверждаются избирательно и послойно в точках или местах, куда по заданной программе подводится луч света. Способы засветки слоя различны (лазер, ультрафиолетовая лампа, видимый свет). Существует две основные технологии создания моделей из фотополимерных композиций: лазерная стереолитография или **SLA**-технология (от **S**teriolithography **L**aser **A**pparatus), или просто стереолитография - отверждение слоя посредством лазера, и «моментальная» засветка слоя – отверждение слоя фотополимера вспышкой ультрафиолетовой лампы или прожектора. Первый способ предполагает последовательное «пробегание» лазерного луча по всей поверхности формируемого слоя там, где в сечении «тело» модели. Согласно второму способу отверждение всего слоя происходит сразу же после или в процессе его формирования за счет излучения от управляемого источника света – видимого или ультрафиолетового. Различие в способах формирования слоев обуславливает и различие в скорости построения модели. Очевидно, что скорость выращивания вторым способом выше. Однако стереолитография была и остается самой точной технологией и применяется там, где требования к чистоте поверхности и точности построения модели являются основными и определяющими. Тем не менее, технологии «засветки» с заданной экспозицией, используемые, например, фирмами **Objet Geometry** и **Envisiontec**, во

многих случаях успешно конкурируют со стереолитографией, оставляя за собой явное преимущество в скорости построения и стоимости моделей. Ряд производственных задач могут быть одинаково успешно решены с помощью **AF**-машин разного уровня. Таким образом, рациональный выбор технологии получения моделей и, следовательно, прототипирующего оборудования зачастую не является очевидным и должен проводиться с учетом конкретных производственных условий и реальных требований к моделям. В тех случаях, когда разнообразие решаемых задач является очевидным, целесообразно иметь две машины: одну для изготовления изделий с повышенными требованиями, вторую – для выполнения «рутинных» задач и тиражирования моделей.

### Лазерная стереолитография

Фирма **3D Systems** – пионер в области практического освоения технологий быстрого прототипирования. В 1986 г. ею впервые была представлена для коммерческого освоения стереолитографическая машина **SLA-250** с размерами зоны построения 250x250x250 мм. Основой в **SLA**-процессе является ультрафиолетовый лазер (твердотельный или **CO<sub>2</sub>**). Лазерный луч здесь является не источником тепла, как в **SLS**-технологии, а источником света. Луч «штрихует» текущее сечение **CAD**-модели и отверждает тонкий слой жидкого полимера в местах своего прохождения. Затем платформа, на которой производится построение, погружается в ванну с фотополимером на величину шага построения и новый жидкий слой наносится на затвердевший слой, и новый контур «обрабатывается» лазером. При выращивании модели, имеющей нависающие элементы, одновременно с основным телом модели (и из того же материала) строятся поддержки в виде тонких столбиков, на которые укладывается первый слой нависающего элемента, когда приходит черед его построения. Процесс повторяется до завершения построения модели. Затем модель извлекается, остатки смолы смываются ацетоном или спиртом, поддержки удаляются. Качество поверхности стереолитографических моделей весьма высокое и часто модель не требует пост-обработки. При необходимости чистота поверхности может быть улучшена, «зафиксированный» фотополимер хорошо обрабатывается, и поверхность модели может быть доведена до зеркальной. В некоторых случаях, если угол между строящейся поверхностью модели и вертикалью меньше 30 градусов, модель может быть построена и без поддержек. И таким образом может быть



**SLA**-модель и отливка изделия «шарик», серебро

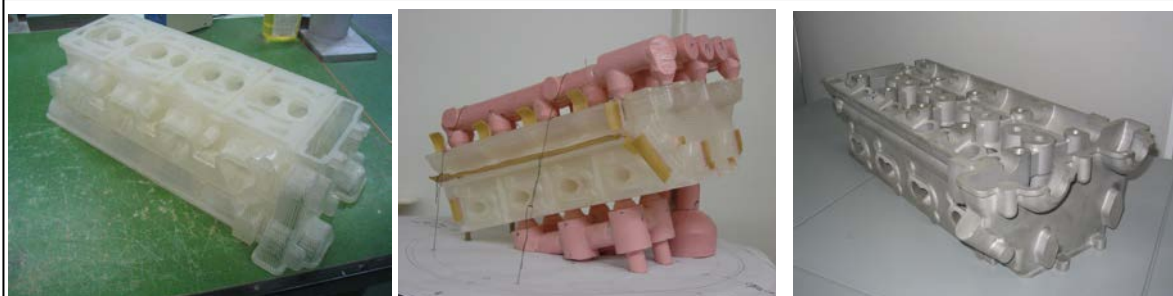
построена модель, для которой не возникает проблемы удаления поддержек из внутренних полостей, что в свою очередь позволяет получать модели, которые в принципе нельзя изготовить никаким из традиционных методов (например, ювелирное изделие на рис.).

Стереолитография широко применяется для:

- выращивания литейных моделей;
- изготовление мастер-моделей (для последующего получения силиконовых форм, восковых моделей и отливок из полиуретановых смол);
- создания дизайн-моделей, макетов и функциональных прототипов;
- изготовления полноразмерных и масштабных моделей для гидродинамических, аэродинамических, прочностных и др. видов исследований.

Но в контексте данной работы отметим первые два направления, которые важны для непосредственного получения литейных деталей. Для целей литейного производства применяют так называемые **Quick-Cast**-модели, т. е. модели для «быстрого литья».

Так называют модели, по которым по аналогии с восковыми моделями могут быть быстро получены металлические отливки. Иными словами это модели для литья по тем же технологиям, что и восковые и полистирольные модели. Но есть важный нюанс. Модели **Quick-Cast** имеют сотовую структуру массива стенок: внешние и внутренние поверхности стенок выполняют сплошными, а само тело стенки формируют в виде набора сот. Это имеет большое преимущество: во-первых, существенно, на 70% снижается общая масса модели, а, следовательно, меньше



**Quick-cast** модель, она же с литниковой системой и отливка головки цилиндров (Al)

материала нужно будет выжигать при подготовке формы к заливке металлом. Во-вторых, в процессе выжигания любой модельный материал расширяется и оказывает давление на стенки формы, при этом форма с тонкостенными элементами может быть разрушена. Сотовая же структура позволяет модели при расширении «складываться» внутрь, не напрягая и не деформируя стенки формы. Это важнейшее преимущество **Quick-Cast**-технологии.

Здесь же отметим, что в отдельных случаях **SLA**-модели, так же, как и **SLS**-модели, могут быть использованы не как литейные модели, а в качестве оснастки, формовочной модели, для литья «в землю». В этом случае, конечно, в конструкции модели должны быть предусмотрены литейные уклоны и радиусы для выхода модели



**CAD**-модель, **SLA**-модель и отливка передней крышки ДВС «в землю»

из формы без повреждений последней. Однако этот способ формовки используется редко из-за недостаточной прочности **SLA**-модели.

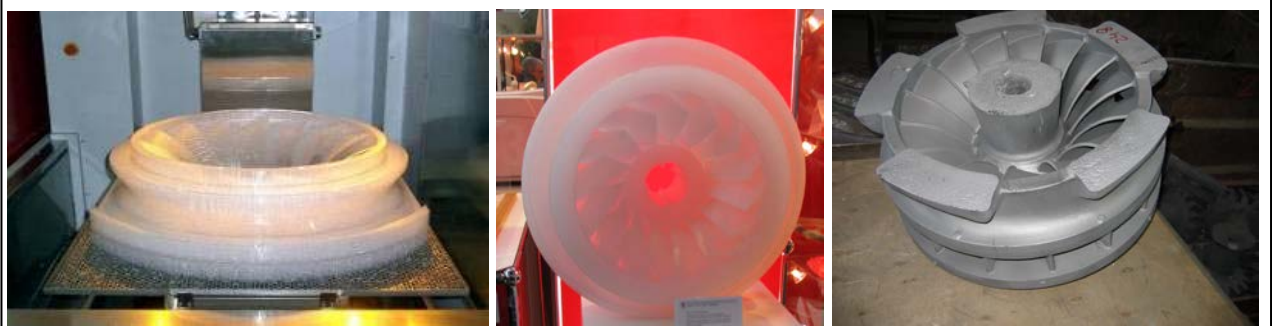
Само по себе получение точной качественной модели – дело дорогостоящее, потеря же и модели, и формы, и отливки становится и еще более дорогостоящим и драматичным, особенно когда дело касается ответственных, сложных деталей. Поэтому **SLA**-машины очень быстро нашли свое применение в тех узлах технологий, которые являлись критическими с точки зрения надежного получения сложных литейных изделий, в первую очередь в авиационной, военной и космической отраслях, а также в автостроении.

Второе, не по значимости, а в порядке упоминания, преимущество – это точность построения модели. Построение модели происходит в обычных условиях при комнатной температуре. Отсутствуют упомянутые выше факторы термического напряжения и деформаций. Очень малый диаметр пятна лазерного луча, 0,1-0,05 мм позволяет четко «прорабатывать» тонкие, филигранные фрагменты модели, что сделало стереолитографию весьма популярной технологией в ювелирной промышленности.

В России имеется достаточно большой опыт применения технологии **Quick-Cast** в авиационной промышленности («Салют», «Сухой», УМПО, «Рыбинские моторы»), в энергетическом машиностроении («ТМЗ» - Тушинский машиностроительный завод),

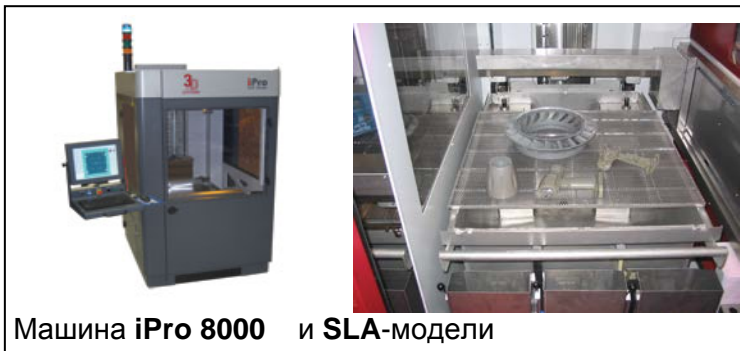


некоторый опыт имеется и в научных организациях автомобильного профиля. В частности, в «НАМИ» по этой технологии впервые в России были получены отливки таких сложных деталей, как головка и блок цилиндров автомобильного двигателя (см. выше). Однако для других отраслей эта технология остается практически неосвоенной.



SLA-модель и отливка рабочего колеса турбоагрегата (ОАО «ТМЗ»)

Основным производителем SLA-машин является американская компания **3D Systems**, которая выпускает широкую гамму машин с разными размерами зоны



Машина iPro 8000 и SLA-модели

построения, от 250x250x250 мм до 1500x570x500 мм.. С техническими характеристиками машин можно ознакомиться на сайте компании [www.3dsystems.com](http://www.3dsystems.com).

Здесь приведены основные данные только по одной машине **iPro 8000**, которая достаточно активно используется в мировой промышленности для целей литейного производства.

#### Основные параметры SLA- машины iPro 8000

Размер рабочей зоны, мм	Шаг построения, мм	Max. вес модели, кг	Габаритные размеры, мм	Вес, кг
650x750x550	0,05...0,15	75	2220x1260x2280	1590

Стоимость, как первоначальная, так и владения, пожалуй, единственный недостаток этой технологии. В связи с наличием лазера эти установки относительно дороги, требуют регулярного технического обслуживания. Поэтому, особенно в последнее время, когда появилось множество 3D-принтеров, они используются для построения особо ответственных изделий с повышенными требованиями к точности и чистоте поверхности, в первую очередь для изготовления **Quick-Cast**- и мастер-моделей. А для других целей, например, дизайн-макетов используют более дешевые технологии. Стоимость расходных материалов относительно высокая – 200...300 €, но сопоставима со стоимостью модельных материалов других фирм. Время построения модели зависит от загрузки рабочей платформы, а также от шага построения, но в среднем 4-7 мм в час по высоте модели. Машина может строить модели с толщиной стенки 0,1...0,2 мм.

#### Технология DLP

Разработчиком данной технологии является международная компания **Envisiontec**, которую можно отнести к новичкам **AF**-рынка, свои первые машины она выпустила в 2003 г. В машинах **Envisiontec** семейства **Perfactory** применяется оригинальная технология **DLP - Digital Light Procession**. Суть ее заключается в формировании так называемой «маски» каждого текущего сечения модели, проецируемой на рабочую

платформу через специальную систему зеркал очень малого размера с помощью прожектора с высокой яркостью света. Формирование и засветка видимым светом каждого слоя происходит относительно быстро – 3...5 секунд. Таким образом, если в **SLA**-машинах применяется «точечный» принцип засветки, то в машинах **Envisiontec** – «поверхностный», т. е. осуществляется засветка всей поверхности слоя. Этим объясняется весьма высокая скорость построения моделей – в среднем 25 мм в час по высоте при толщине слоя построения 0,05 мм. Материал поддержек – тот же, что и основной материал – акриловый фотополимер.

Модели **Envisiontec** используются так же, как и **SLA**-модели – в качестве мастер-моделей и выжигаемых литейных моделей.



Модели **Envisiontec** и отливки деталей ДВС, алюминий

Качество моделей весьма высокое, однако уступает **SLA**-моделям по точности. В основном это связано с применением не малоусадочных эпоксидных фотополимеров, как у машин **3D Systems**, а акриловых, имеющих существенно больший, почти на порядок – 0,6%, коэффициент усадки при полимеризации. Тем не менее, преимуществами являются достаточно высокая точность и чистота поверхности, прочность, удобство в обращении при весьма умеренной (по сравнению со стереолитографией) стоимости. Несомненным преимуществом технологии **Envisiontec** является высокая скорость построения моделей и, следовательно, производительность **RP**-машины.

В последнее время в «НАМИ» были проведены эксперименты, которые показали в целом хорошую выжигаемость моделей, малую зольность. Были получены кондиционные отливки автомобильных деталей как вакуумным литьем алюминия в гипсовые формы, так и атмосферным литьем чугуна в маршалитовые формы. Есть все основания считать технологию **DLP** весьма перспективной и эффективной для целей литейного производства и не только для НИР и ОКР. Время (с учетом подготовительно-заключительных операций)

построения деталей, приведенных на рисунке – впускной трубы высотой 32 мм и ресивера высотой 100 мм составляет 1,5 и 5 часов соответственно. Тогда как на сопоставимой по размерам **SLA**-машине **Viper (3D Systems.)** такие модели строились бы не менее 5,5-ти и 16-ти часов.



Perfactory EXEDE

Для промышленного применения представляют интерес машины серий **Extrim** и **EXEDE**. Эти машины позиционируются, как **AF**-машины для промышленного серийного производства мастер-моделей и моделей для литья металла по выжигаемым моделям, а также как высокопроизводительные машины для сервис-бюро, специализирующихся на оказании услуг в области аддитивных технологий. Машина **Extrim** имеет один цифровой прожектор с разрешением 1400x1050 пикселей, **EXEDE** - два прожектора. Эффективная рабочая зона построения и толщина слоя построения регулируются сменой линз оптической системы.

Особенностью машин серий **Extrim** и **EXEDE** является то, что в отличие от других технологий, здесь используется не

дискретное, пошаговое, а непрерывное движение платформы вниз с малой скоростью. Поэтому на моделях нет ярко выраженных ступенек, характерных для других способов построения. Модели требуют пост-обработки – удаления поддержек и в ряде случаев, как и стереолитография – дополимеризации.

#### Основные характеристики машин Envisiontec семейства Perfactory

	Размеры зоны построения, мм	Толщина слоя построения, мм	Габаритные Размеры, мм	Вес, кг
<b>Standart</b>	120x90x230	0,025...0,150	480x730x1350	70
<b>Zoom</b>	190x142x230			
<b>Standart UV</b>	175x131x230			
<b>Extrim</b>	320x240x430	0,025...0,150	810x730x2200	480
<b>EXEDE</b>	457x431x508	0,025...0,150	810x840x2200	520

Широкий выбор материалов для мастер-моделей, выжигаемых моделей, моделей для вакуум-формовки (выдерживающих до 150°C), концептуального моделирования делает эти машины особенно привлекательной в тех случаях, когда требуется изготавливать большое количество и большую номенклатуру моделей в широком спектре назначения.

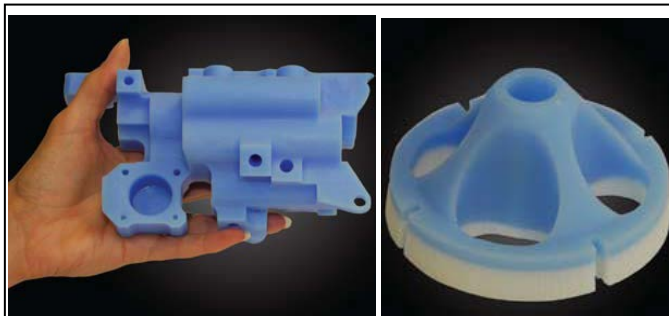
#### Технология MJM (Multi Jet Modeling) получения восковых синтез-моделей

Модели строятся на 3D-принтерах с использованием специального модельного



ProJet CP 3000

материала, в состав которого входит светочувствительная смола – фотополимер на акриловой основе, и литейный воск (более 50% по массе). Фотополимер является связующим элементом. Материал посредством многоструйной головки послойно наносится на рабочую платформу, отверждение каждого слоя производится за счет облучения ультрафиолетовой лампой. Принтеры **ProJet CP 3000** и **ProJet CPX 3000** специально разработаны для выращивания восковых моделей для точного литья металлов в гипсо-керамические и оболочковые формы. Принтеры имеют два режима построения модели – «стандартный» с разрешением (xyz) 328x328x700



Литейные модели ProJet 3000CXP

точек на дюйм и размерами зоны построения 298x185x203 мм, и «высокоточный» (XHD - Xtreme High Definition) с разрешением 656x656x1600 точек на дюйм на уменьшенной до 127x178x152 мм зоне построения.

Особенностью данной технологии является наличие так называемых поддерживающих структур –



Оболочковая форма и отливка корпуса турбины (чугун), полученные по восковой синтез-модели

поддержек. Эти поддержки строятся для удержания нависающих элементов модели в процессе построения. В качестве материала для поддержек используется восковой полимер с низкой температурой плавления, который после построения

модели удаляется струей горячей воды. Модельный материал **VisiJet® CPX200** и материал поддержек **VisiJet® S200** содержится в виде баллонов-картриджей по 0,38 и 0,4 кг, соответственно. В принтер может быть установлено до 10 картриджей обоих видов.

В «стандартном» режиме толщина слоя построения 36 мкм, «высокоточном» режиме - 16 мкм. Точность построения (в зависимости от конфигурации, ориентации и размеров модели) 0,025-0,05 мм на длине один дюйм. Принтер позволяет надежно строить модели с толщиной стенок до 1 мм, в отдельных случаях до 0,8 мм. Крупные модели могут быть построены частями и затем склеены.

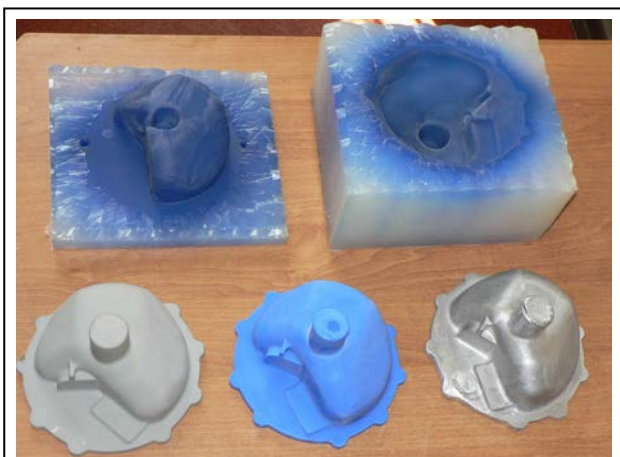
Недостатком технологии является относительно высокая стоимость расходных материалов – более 300\$/кг. Тем не менее, эта технология имеет и неоспоримые преимущества – скорость получения модели и, не менее важное, высокое качество модельного материала с точки зрения собственно технологии литья по выплавляемым моделям (формовки, вытапливания модели).

## 2.2 От синтез-мастер-модели к отливке

### Литье полиуретановых смол в силиконовые формы

Второе интенсивно развивающееся направление использования фотополимеров в литейном деле – это изготовление высокоточных мастер-моделей, как для последующего получения через силиконовые формы восковых моделей, так и для литья полиуретанов. Использование силиконовых форм оказывается чрезвычайно эффективным при штучном и малосерийном производстве восковок. При этом достигается высокое качество восковок.

Мастер-модели обычно выращивают на **SLA**- или **DPL**-установках, поскольку эти машины обеспечивают наилучшую чистоту поверхности и высокую точность построения модели. Достаточно высокое качество, чтобы быть использованными в качестве мастер-моделей, имеют и модели, полученные на **3D** принтерах типа **ProJet** и **Objet**.



Силиконовая форма (вверху), мастер-модель (внизу слева), восковая модель (в середине), металлическая отливка (справа)

Мастер-модели используют для получения так называемых «быстрых форм», в частности, силиконовых форм, в которые затем производится литье полиуретановых смол или воска для последующего литья металлов. Технологии литья в эластичные формы получили широкое распространение в мировой практике. В качестве материала форм используют различные силиконы, как материал, обладающий малым коэффициентом усадки и относительно высокой прочностью и стойкостью. (Здесь «силикон» – это смесь двух исходно жидких компонентов **A** и **B**, которые при смешении в определенной пропорции

полимеризуются и образуют однородную относительно твердую массу). Эластичные формы получают путем заливки мастер-модели силиконом в вакууме. Мастер-модель располагают в обычно деревянной опоке, опоку помещают в вакуумную литейную машину, где предварительно в специальной емкости производят смешение компонентов **A** и **B**, затем силикон выливают в опоку. Вакуум применяют с целью удаления воздуха из жидких компонентов и обеспечения высокого качества формы и отливок. После заливки в течение 20 -40 мин. силикон полимеризуется. В комплект поставки оборудования для вакуумного литья, как правило, входит собственно вакуумная машина (одно- или двухкамерная) и два термошкафа: один для хранения

расходных материалов при температуре около 35°C, второй, – для выдержки форм, в котором поддерживается температура около 70°C; он используется для предварительной термоподготовки силиконовой формы и литейных материалов непосредственно перед заливкой. После заливки полиуретановой смолы форма возвращается в эту печь, где происходит полимеризация смолы в оптимальных условиях. Поэтому размер второго термошкафа должен соответствовать размерам вакуумной камеры машины. Используя специальные технологические приемы, форму разрезают на две или несколько частей, в зависимости от конфигурации модели, затем модель извлекают из формы.



Литейная машина **MTT**

Обычно стойкости формы – 50 -100 циклов, что вполне достаточно для изготовления отливок опытной серии деталей. Эти технологии оказались весьма эффективными для производства опытно-промышленных партий и малосерийной продукции,

<b>MTT 4/04</b>	
Габаритные размеры, мм	1930x1510x900
Макс. размеры формы, мм	750x900x750
Объем заливки, дм <sup>3</sup> / кг	2,2/2,0 или 5,5/6,0

характерной для авиационной, медицинской и приборостроительной отраслей. Широкий спектр как силиконов, так и полиуретановых смол позволяет изготавливать отливки с ударо- и

темпостойкими свойствами, различной жесткости в разнообразной цветовой гамме. Современные предприятия, изготавливающие отливки по выплавляемым моделям, обычно имеет в составе технологического оборудования **AF**-машину для выращивания мастер-моделей и машину для вакуумного литья в силиконовые формы.

### Литье металлов

Для изготовления металлических отливок в условиях НИИ и опытного производства широкое применение имеют системы вакуумного литья цветных металлов. Ключевым звеном в таких системах, естественно, является литейная машина.



Вакуумная машина **MPA 1000 (MTT Technologies)** с объемом тигля 10 л для литья цветных металлов

Обычно, учитывая условия опытного производства, это компактные машины с объемом тигля 3-20 л. Как правило, система вакуумного литья включает:

- машину для вакуумного литья;
- прокалочную печь для вытапливания восковых и выжигания полистирольных моделей и прокалики опок;
- каталитический конвертер (для нейтрализации газов от прокалочных печей);
- вакуумный миксер для приготовления и заливки формовочной смеси);
- размывочную машину;

В литейных машинах используют графитовый или керамический тигель и обычно в них предусмотрен режим «поддавливания» металла аргоном после заливки (до 2 бар). Температура расплава до 1200°C. Типовыми литейными цветными металлами являются: латуни, медь, бронзы, алюминиевые и бериллиевые сплавы, драгметаллы, в отдельных случаях магниевые сплавы. Заливка формовочной смеси и литье металлов производится в вакууме, что обеспечивает хорошее качество формовки, радикально снижает вероятность образования газовых пор и рыхлот в отливке. При



Литейная машина

Прокалочная печь

Вакуумный миксер

Размывочная машина

использовании соответствующих формовочных смесей и соблюдении технологических требований данное оборудование обеспечивает высокое качество поверхности отливок, на уровне **Rz 20-40**.

В последние годы на рынке появились достаточно надежные и качественные машины лабораторного типа для вакуумного литья сталей и титана (например, **ALD**, **ProfiCast**, **TopCast**). Ряд компаний (**MK-Technology**, **MTT-Technologies**, **ProfiCast** и др.) традиционно работают в содружестве с фирмами-производителями **AF**-оборудования и в параметрах своей продукции учитывают соответствующие нюансы. Оборудование, позволяет существенно повысить производительность и улучшить

Машина **SGA 3500**

условия труда, при этом обеспечивая максимально эффективную работу с модельными материалами, используемыми в **AF**-технологиях.

В частности, фирма **ProfiCast** производит вакуумную машину **SGA 3500** с индукционным нагревом для литья конструкционных и нержавеющей сталей. Машина выполнена по схеме с опрокидывающимся (поворотным) тиглем объемом 3,5 л. Оборудована тактильным дисплеем, программатором, системой адаптации для точной установки параметров нагрева для плавки различных видов стали. Закладка брусков стали в тигель производится через открытую верхнюю крышку, а установка опоки с формой – через боковую дверцу вакуумной камеры, расположенной под тиглем. Высота опоки до 500 мм. Макс. температура заливки 1750°C. Металл может быть слит в одну или поочередно в несколько форм.

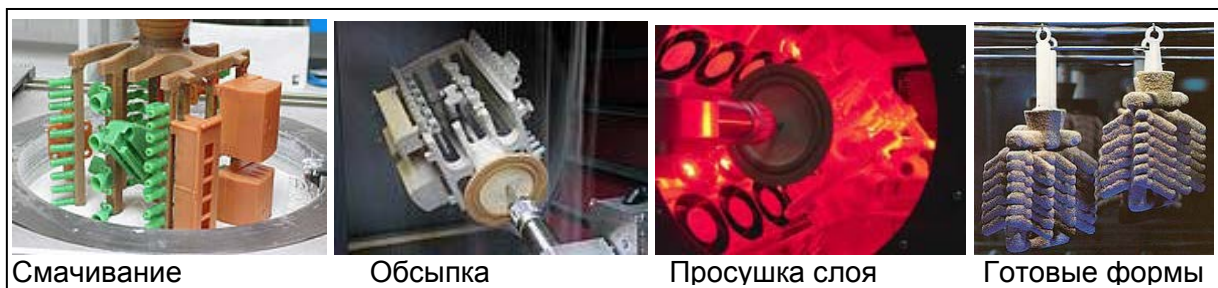
**Cyclon**

Машина “**Cyclon**” фирмы **MK-Technology** предназначена для получения маршалитовых, электро-корундовых и т. д. форм, используемых при литье по выплавляемым моделям. Восковые или полистирольные модели окунают в формовочную суспензию, которая смачивает модель и формирует тонкий слой жидкости на поверхности модели. Затем модель обсыпают порошкообразным термостойким материалом и просушивают. Процесс повторяется несколько раз и, в конечном счете, модель оказывается заключенной в огнеупорном «коконе» - оболочке, которую затем устанавливают в

прокалочную печь и из которой вытапливают или выжигают модель, получая таким образом форму для последующей заливки в нее металла.

Машина “**Cyclon**” выполняет все эти операции в автоматическом режиме. При создания оболочковой формы используется суспензия на водной основе. К преимуществам машины относятся: сокращение времени создания оболочковой

формы в 10-20 раз по сравнению с ручным способом формовки; уменьшение расхода формовочных материалов на 25%; улучшение газопроницаемости формы; увеличение прочности оболочки. Максимальный размер форм 500x500x500 мм, вес до 15 кг. Габариты машины 4600x1450x3750 мм.



Для ускорения процесса приготовления оболочковых форм используется специальная сушильная машина – **Booster (MK-Technology)**, которая может быть легко интегрировано в существующую технологическую линию. **Booster** позволяет получать пригодные для заливки металла формы в течение одного рабочего дня. Максимальный размер оболочковой формы 800x800x1000 мм, габаритные размеры машины 1900x3500x1850 мм, масса 1600 кг.

Автоклав **МКА (MK-Technology)**, предназначен для быстрого удаления воска из оболочковых форм. Суть



технологии заключается в быстром нагреве воска с помощью водяного пара с температурой 158-175°C и давлением 6-8 атм. Нагрев происходит так быстро, что воск не успевает расшириться и повредить оболочковую форму.

Длительность рабочего цикла 12-20 мин.

### 3. Технологии синтеза песчаных литейных форм

**Литейные формы** – это отдельный и большой раздел **AF**-технологий. В последние годы динамичное развитие получило направление непосредственного выращивания песчаных форм для литья металлов, а также выращивание металлических изделий, в частности, пресс-форм для литья пластмасс. Здесь, как нигде, в полной мере находит практическое воплощение принцип «безбумажных технологий» - производство изделия в принципе не нуждается в сопровождении посредством традиционной бумажной документации в виде чертежей, технологических карт и т. д. Меняется и традиционный подход к кадровому обеспечению работ. Конструктор и технолог работают не последовательно, а параллельно и зачастую конструктор выполняет функцию технолога, создавая параллельно с **CAD**-моделью детали **CAD**-модели технологической оснастки для литья детали.

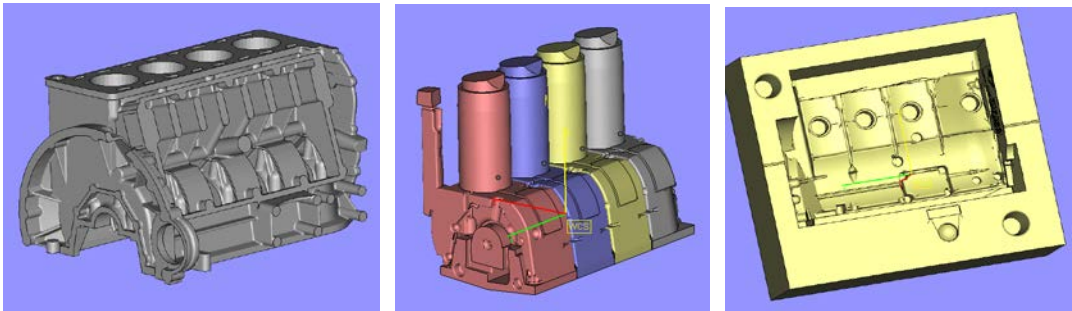
Для производства песчаных литейных форм используется две **AF**-технологии:

- послойное спекание плакированного песка лазерным лучом (фирма **EOS**);
- послойное нанесение связующего состава или **Inkjet**-технология ( **ProMetal**).

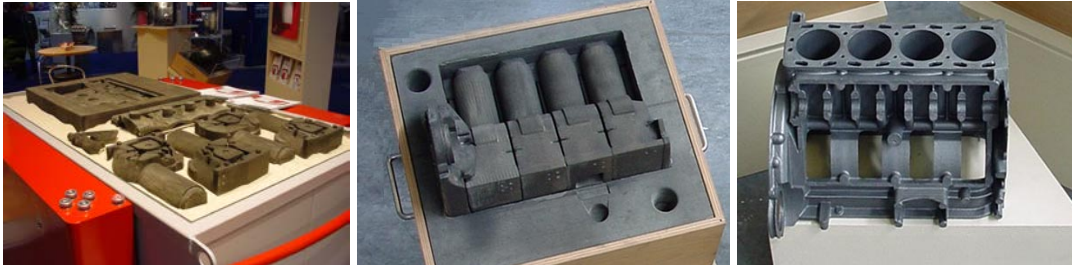
Первая технология – это разновидность упомянутой выше **SLS**-технологии, с той лишь разницей, что в качестве модельного материала используется литейный (силикатный или циркониевый) предварительно плакированный полимером песок. После спекания получается так называемая «грин-модель» (в смысле – «сырая»), которая требует весьма аккуратного обращения при очистке. Для облегчения этого процесса, очищенные места сразу же обрабатывают пламенем газовой горелки,

закрепляя их таким образом. После очистки фрагменты формы помещают в прокаточную печь и окончательно (при температуре 300-350 °С) отверждают массив формы.

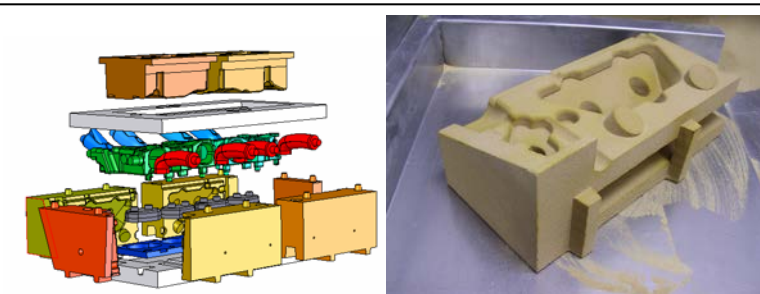
Вторая технология похожа на **MJM**-технологию с той разницей, что на рабочую платформу впрыскивается не строительный материал, а связующий состав. Строительный же материал (литейный песок) подается и разравнивается на рабочей платформе послойно с шагом 0,2-0,4 мм аналогично **SLS**-системам. В этом случае дополнительной термообработки формы не требуется.



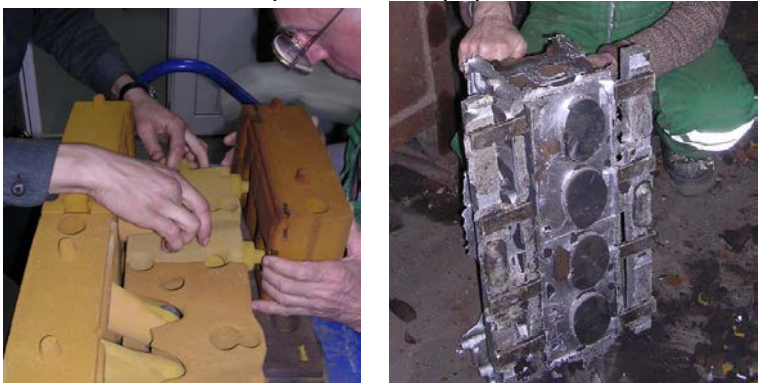
CAD-модели блока цилиндров и фрагментов песчаной формы



Выращенные фрагменты формы (**ProMetal**), форма в сборе и отливка блока (чугун)



CAD-модели Выращивание формы на **SLS**-машине



Сборка формы

Отливка (алюминий)

Независимо от метода построения собственно формы, алгоритм действий конструктора-технолога практически одинаков. Коротко последовательность операций выглядит следующим образом. Создается **CAD**-модель изделия (см. рис.); назначаются припуска на обрабатываемые поверхности; согласно рекомендациям технолога проектируется литниковая система, которая сочленяется с основной **CAD**-моделью, получают технологическую **CAD**-модель, масштабируют в соответствии в коэффициентом усадки литейного материала; создается модель (будущего) песчаного

блока – обычно в виде параллелепипеда, куда заключена технологическая **CAD**-модель; этот блок разрезается на несколько частей в зависимости от размеров рабочей камеры **AF**-машины; создаются негативы – «отпечатки» технологической модели в песчаном блоке или его фрагментах; таким же образом методом вычитания



создаются модели стержней; в завершение процесса проектирования создаются **stl**-файлы формы. Далее - дело техники, а именно технологической **AF**-машины, которая строит фрагменты формы. После завершения построения фрагменты песчаной форма с известными предосторожностями собирают: стыкуют, герметизируют швы, устанавливают холодильники и т. д. Затем – собственно заливка металла.

Коротко о машинах, синтезирующих песчаные формы. Машины **ProMetal** отличаются высокой производительностью и предназначены для целей НИОКР и промышленного использования в производстве не только штучной, но серийной продукции. Самая большая из них **ProMetal S-MAX** имеет рабочую зону построения 1500x750x700 мм, контейнер емкостью 800 л, шаг построения 0,2-0,4 мм и скорость построения моделей 12...28 мм/ч по высоте, на формирование слоя необходимо около 40 с. Для выработки всего объема при непрерывной работе машины требуется два дня. Машина чувствительна к качеству песка – размер частиц не должен превышать 140 мкм.



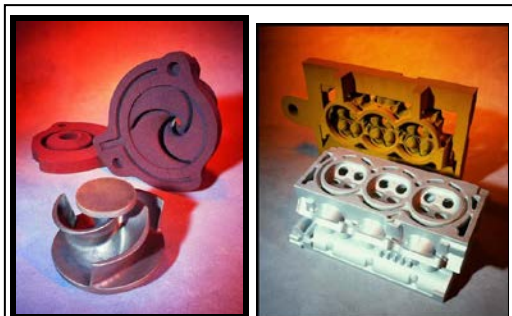
**Основные характеристики машин ProMetal**

	<b>S-print</b>	<b>S15</b>	<b>S-Max</b>
Размеры зоны построения, мм	750x380x400	1500x750x700	1800x1000x700
Толщина слоя построения, мм	0,2...0,4	0,2...0,4	0,28-0,5
Скорость построения, мм/ч	12...28	14...20	12...25
Производительность, см <sup>3</sup> /ч	7500	15 000	59400...108000
Габаритные размеры, мм	2820x2440x2160	3113x3354x2164	7000x3586x2860
Вес, кг (основн. модуль)	2500	3500	6500

Основным преимуществом машины является возможность строить за одно целое относительно габаритные формы и стержни. Производительность машины также является существенным преимуществом, в особенности для условий промышленного применения. Стоимость машины весьма значительна, превышает 1 млн. евро.



В машине **EOS S 700** используется **SLS**-технология. Она не столь быстрая, но более «деликатная», может строить филигранные фрагменты формы размерами до 1 мм. Рабочая зона построения 720x380x380 мм, шаг построения 0,2 мм, точность построения 0,3 мм (на длине 720 мм). Габаритные размеры 1420x1400x2150 мм. Для увеличения скорости работы в машине используется система с двумя лазерами. Машина отверждает до 2500 см<sup>3</sup> песка в час (для сравнения: **ProMetal** - 7500 см<sup>3</sup>/ч). Несмотря на определенные недостатки, связанные с большей трудоемкостью получения моделей и меньшей производительностью машины, она обладает несомненным преимуществом по точности построения моделей и чистоте поверхности. На ней могут быть изготовлены формы и стержни,

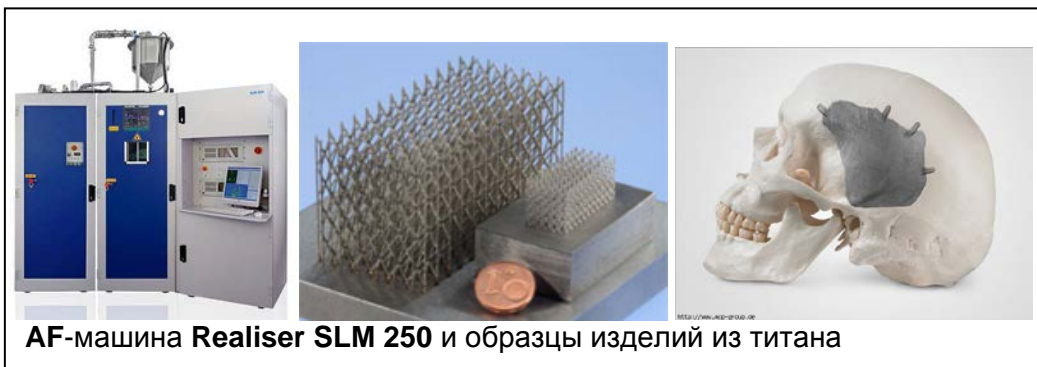


Песчаные формы и отливки (EOS)

по сложности недоступные другим технологиям. Эти машины применяются там, где существуют заведомо повышенные требования к точности литья и чистоте поверхности отливок. Существенным преимуществом является и то, что расходным материалом является недорогой литейный песок, плакирование которого не представляет трудностей и может быть произведено непосредственно на месте установки машины.

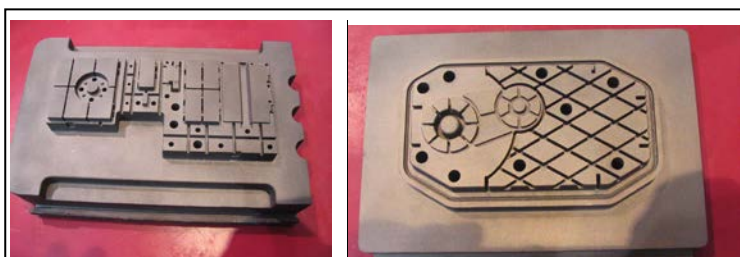
#### 4. Технологии синтеза металлических изделий и форм для литья металлов и пластмасс

Важное место в **AF**-технологиях занимают технологии непосредственного выращивания деталей, в частности, пресс-форм из металла. В англоязычной литературе эти технологии получили название **Direct Manufacturing** или **Direct Metal Fabrication**. Суть технологии заключается в последовательном «склеивании», спекании или сваривании слоев порошкового металла.



AF-машина Realiser SLM 250 и образцы изделий из титана

Применяют две технологии формирования модели при построении – лазерную (спекание, сплавление) и технологию **Inkjet**, согласно которой слой фиксируется с



Синтезированные металлические вставки для литья деталей из пластмассы (3D Systems)



Машина EOS EOSINT M-270 и образцы выращенных металлических изделий

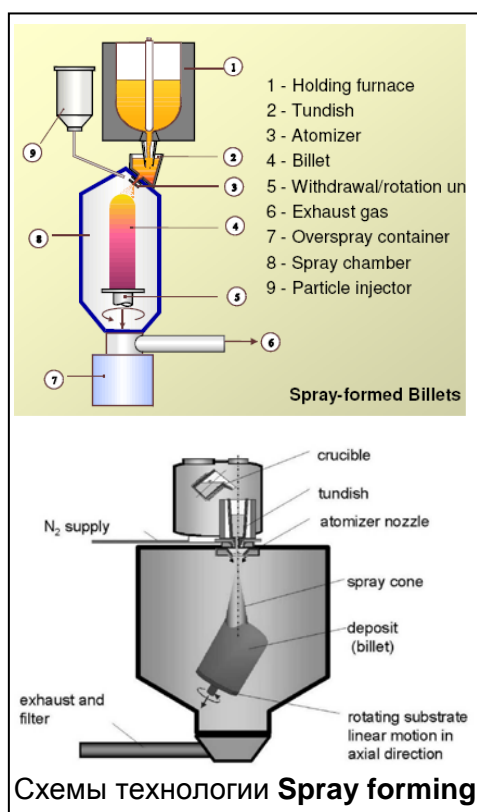
помощью специального состава, впрыскиваемого на поверхность порошкового металла через многоструйную подвижную головку (по типу 3D-принтера). Иногда, как например фирма **3D Systems**, сначала посредством лазерного спекания получают так называемую «грин-модель», которую затем пропитывают (инфильтруют) расплавленной бронзой. Но в последнее время с развитием лазерной техники все большее распространение получают технологии (**EOS, Arcam, MTT Technologies, ConceptLaser, Realizer** и др.) непосредственного сплавления слоев порошкового металла без

последующей инфильтрации Номенклатура применяемых материалов весьма широкая: конструкционные и инструментальные стали, титан-алюминиевые композиции, кобальт-хром, инконель, драгметаллы. Совершенствование лазерных

технологий, использование нано-технологий для получения мелкодисперсных порошковых композиций металлов позволило выращивать полностью функциональные металлические детали с механическими свойствами литых деталей, изготовленных традиционными методами. Более того, **AF**-технологии позволили изготавливать детали с конфигурацией, которую в принципе невозможно выполнить традиционными методами, например, неразъемные пресс-формы с внутренними каналами охлаждения. Для целей литейного производства эта технология представляет несомненный интерес, в частности, для изготовления литейной оснастки – форм, как для получения восковых моделей в серийном производстве или отливок из пластмасс, так и для непосредственного литья металлов (кокили, формообразующие литейной оснастки).

## 5. Аддитивные технологии, литейное производство и порошковая металлургия

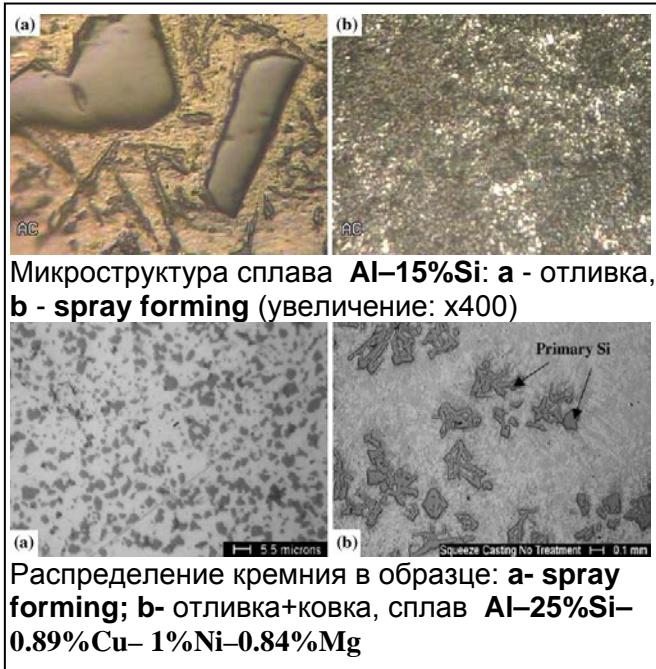
В данном разделе речь пойдет о новых технологиях с еще неустоявшейся терминологией, находящихся на стыке разных традиционных технологий, и которые невозможно отнести к какой-либо из них. Имеется в виду, в частности, так называемая технология **Spray forming**. Она объединяет в себя и литейные знания, поскольку имеет место плавка металла, и технологии распыливания металла, а это сфера знаний порошковой металлургии, и знания по металлографии, а это вопросы общего металловедения, при этом в конечном итоге мы получаем то же, что и при литье в изложницу – заготовку, но это не просто заготовка: она также получается посредством послойного синтеза, что и роднит технологию **spray forming** с **AF**-технологиями.



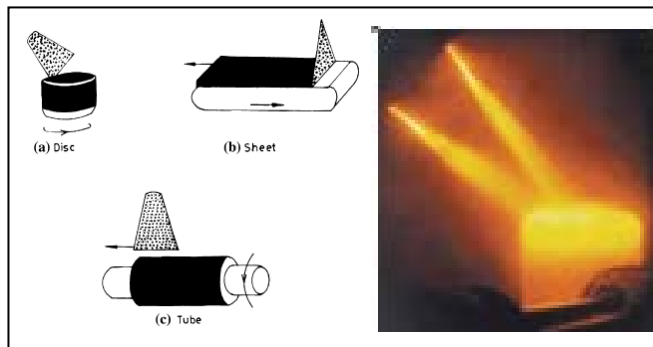
**Spray forming** - относительно новая технология

получения заготовок из конструкционных и специальных сплавов посредством распыления (атомизации) металла, предложена в 1970 году проф. **Singer (Swansea University, Великобритания)**. Суть технологии заключается в послойном напылении металла на подложку и «выращивании» болванки (заготовки) для последующей механообработки. Металл расплавляется в плавильной камере и затем посредством специального сопла распыляется потоком инертного газа, частички металла (размером 10-100 мкм) осаждаются на подложку, формируя таким образом массив болванки. В отличие от литой заготовки, полученной простым сливом металла в изложницу, болванки, изготовленная методом **spray forming**, имеет высокую однородность микро- и макроструктуры материала. Технология «**Spray forming**» разработана в первую очередь для изготовления ответственных деталей аэрокосмического назначения из специальных сплавов с повышенными требованиями. Однако она нашла коммерческое применение и в серийном производстве, в частности, для изготовления гильз цилиндров из сплава **AL-Si** для двигателей автомобилей Мерседес.

Данная технология успешно применяется для получения заготовок из сплавов, склонных к ликвации при кристаллизации, в частности, медь-содержащих сплавов, использующихся для производства суперпроводников (**CuSn**), высокопрочных инструментов (**CuMnNi, CuAlFe**) для нефтедобывающей и горнорудной промышленности.



изостатического прессования (**HIP**) и последующей обработки давлением - прокатки иликовки.



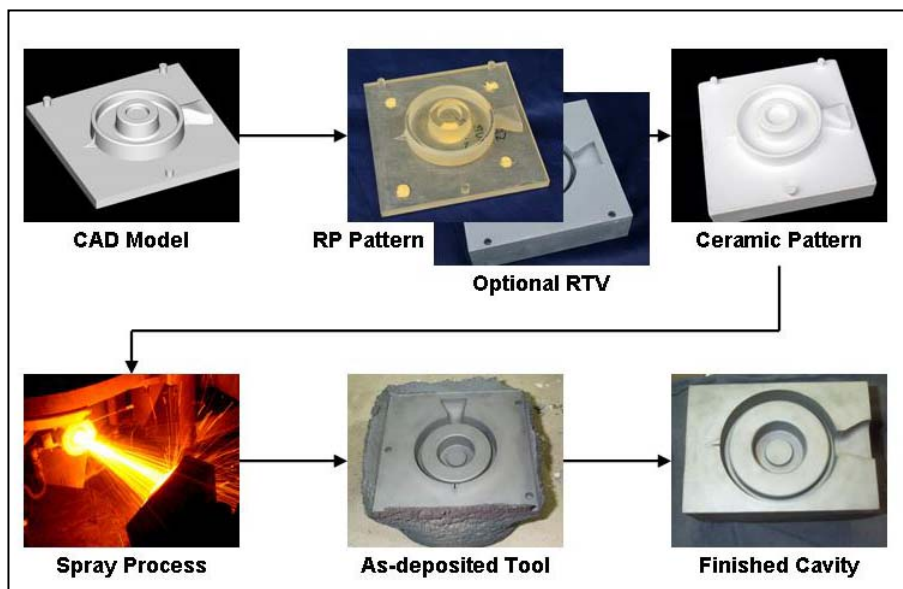
Равномерность распределения ингредиентов по массиву заготовки и равномерность микроструктуры являются главными преимуществами данной технологии. К недостаткам следует отнести относительно высокие потери материала – до 20%, при атомизации и осаждении металла на подложку и относительную сложность управления процессом, требующим высоких профессиональных навыков персонала. К особенностям процесса следует отнести наличие микропор в структуре материала, появление которых связано с захватом молекул газа при атомизации и осаждении частичек металла и с «неплотным» спеканием частиц друг с другом при кристаллизации. Пористость металла устраняют посредством горячего

платформа с подложкой, на которой «выращивается» заготовка может совершать возвратно-поступательное движение – тогда получается заготовка в виде ленты, или вращательное движение относительно оси потока распыливаемого металла – для получения цилиндрической заготовки в виде болванки, или вращательное движение относительно оси, перпендикулярной оси потока – для получения заготовки типа «кольцо» или «труба».

Технология **spay forming** открывает широкие возможности для создания так называемых градиентных материалов (с переменными по сечению физико-химическими свойствами), которые могут быть получены путем послойного нанесения различных материалов через два (или более) распылительных сопла.

В связи с развитием и повышением технического уровня прототипирующих машин может представлять интерес практическое применение технологии **Spray forming** для получения изделия путем напыления металла на керамическую модель (реплику). Суть технологии в следующем. По **CAD**-модели на прототипирующей машине, например **SLA**-установке, выращивается стереолитографическая мастер-модель. По ней изготавливается силиконовая или **RIM**-форма, в форму заливают жидкую керамику и получают керамическую модель-реплику, которую затем устанавливают в **Sprayforming**-машину, где на керамическую модель послойно напыляют расплавленный металл. Таким образом получают «слепок» с керамической реплики. После механической обработки (удаления облоя и обработки в размер по посадочным поверхностям) получают конечное изделие. Наиболее интересна эта технология для получения пресс-форм и технологической оснастки вообще.

Компания **RSP Tooling (RSP - Rapid Solidification Process, [www.rsptooling.com](http://www.rsptooling.com), США)** является разработчиком нового способа изготовления инструментальной оснастки с использованием технологии **Spray forming**. Машина **RSP** представляет собой сочетание плавильной машины и атомайзера (устройства для распыливания). Металл (различные сплавы широкого спектра) плавится в тигле в инертной атмосфере и под давлением направляется к распылительному соплу, где посредством струи азота происходит мелкодисперсное дробление жидкого металла и быстрое отверждение частиц. Около 70% частиц «долетают» до керамической модели уже в твердом состоянии, остальные 30 – в полужидкой фазе. Оставшегося тепла достаточно, чтобы



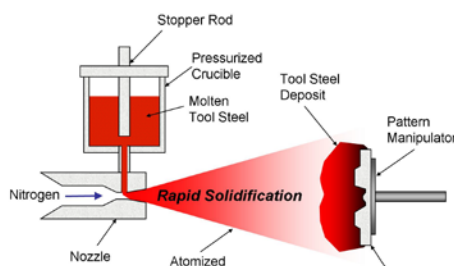
связать (сварить) между собой все частицы.

Исследования показали, что металл имеет более однородную и мелкозернистую структуру с менее выраженной сегрегацией, чем при литье. Частицы металла налипают на керамическую модель, формируя тело «слепка». Платформа, на которой закреплена керамическая модель, имеет

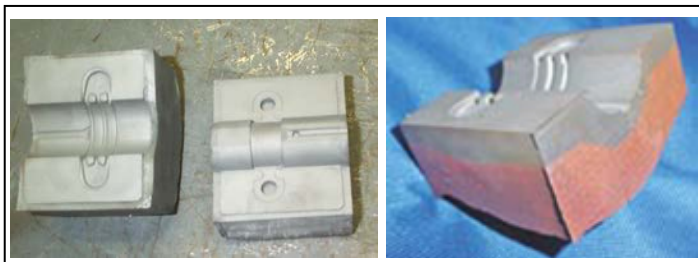
возможность перемещения в пространстве рабочей камеры машины и оператор, поворачивая платформу, обеспечивает равномерное нанесение металла. После завершения процесса и остывания в течение полутора-двух часов керамическая модель извлекается из металлического «слепка» и производятся стандартные технологические операции: механо- и термообработка.



RSP-машина



Машина **RSP** может изготавливать детали с максимальными размерами 180x180x100 мм. Продолжительность рабочего цикла 3-4 часа. Таким образом, в течение одного рабочего дня может быть изготовлено 2-4 изделия. Одним из преимуществ данной технологии является



возможность получения биметаллических композиций. Например, рабочая часть кокиля формируется из специальной стали, а тело из обычной недорогой стали или цветного металла с повышенной интенсивностью теплоотдачи. Данная технология пока не вышла на уровень

коммерческого применения, но представляет несомненный интерес.

Сплавы **Al-Zn-Cu-Mg** традиционно относятся к высокопрочным материалам, однако дальнейшее улучшение их прочностных характеристик сдерживается макросегрегацией, возникающей в заготовке, получаемой литьем. Технология **spray forming** ослабляет эти проблемы. Сплав **7XXX**, полученный новым способом, показал более высокую ударную вязкость и усталостную прочность, чем кованный алюминий. Одним из ограничений в применении сплавов **Al-Li** является анизотропия у деталей, изготавливаемых из литых заготовок. Сплав, полученный по технологии **spray forming** с увеличенным содержанием лития, имеет улучшенную изотропию, экспериментально показано отсутствие проблем с растрескиванием отливки и макросегрегацией, которые



Примеры деталей авиадвигателя, полученные с использованием технологии «**Spray forming**»

имеют место при получении заготовки литьем. Получен сплав с содержанием лития 4% по весу, имеющий плотность 2,4 г/куб. см и с удельной жесткостью на 30% выше, чем у обычных алюминиевых сплавов. Были также получены сплавы **Al-Cu-Mg-X** с улучшенными по сравнению с литейными сплавами прочностными свойствами и износными характеристиками при повышенных температурах.

Одним из самых важных достоинств данной технологии является возможность создания новых материалов с уникальными свойствами, а также разнообразных покрытий. Получены композиционные материалы (**MMC, metal matrix composite**), в которых матричная основа усилена керамикой до 15% по объему, и которые показали повышенную жесткость и сопротивление износу. Эти материалы изготовлены путем вдувания частиц керамики в распыленный поток металла в процессе осаждения металла по технологии **spray forming**. Получен уникальный материал **Al-Si** с

содержанием кремния 70% по весу, такой сплав невозможно получить методами литья из-за катастрофического охрупчивания вследствие выпадения крупных зерен кремния при кристаллизации и засорения оксидами. Вариацией соотношения кремния и алюминия могут быть получены сплавы с заданным коэффициентом термического расширения (постоянным в широком диапазоне температур), которые имеют большие перспективы применения в микроволновых устройствах и пленочных радиаторах, используемых в телекоммуникационных системах, аэрокосмической и оборонной промышленности.



Установка «**Spray forming**» Оксфордского университета, (до 80 кг по **Al**)

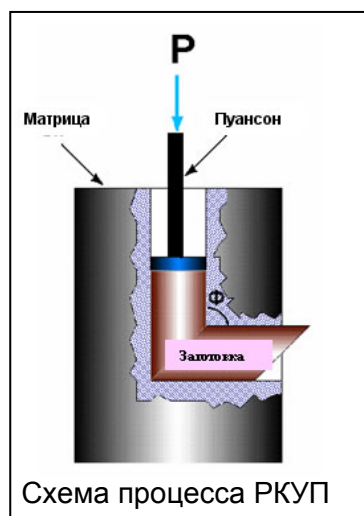
Европейскими лидерами в освоении технологий «**Spray forming**» являются компании **Sandvik Osprey** (Великобритания, [www.smt.sandvik.com](http://www.smt.sandvik.com)), которая также занимает передовые позиции по выпуску порошковых металлов и оборудования для их производства, и немецкая фирма **ALD**, специализирующаяся на выпуске литейного оборудования, вакуумных печей и технологического оборудования для термообработки и порошковой металлургии.

В США ведущие позиции в этой области занимают **General Electric, Teledyne Allvac** ([www.allvac.com](http://www.allvac.com)), а также

компания **Sprayform Technologies International** – совместное предприятие **Pratt & Whitney** и **Howmet**, разработавшая технологию получения пре-форм (заготовок) турбинных дисков диаметром до 1400 мм.

Фундаментальные исследования и разработки по практическому использованию возможностей технологии **Spray forming** активно ведут также: **U.S. Navy Labs**, **Pennsylvania State University**, **University of California at Irvine** (США), **Applied Research Labs**, **Advanced Institute of Science and Technology** (Ю. Корея), **National Cheng Kung University** (Тайвань), **IPEN** (Бразилия), **Oxford University Centre for Advanced Materials and Composites** (Великобритания), **Inner Mongolia Metals Institute** (Китай), **Bremen University** (Германия), **Katholieke Universiteit Leuven** (Бельгия).

В Европе на трех заводах по технологии **spray forming** производится более 3000 т/г заэвтектического сплава **Al-Si**. Компания **Spray Steel** производит до 4000 т/г заготовок из сталей различного назначения, из которых, в частности, фирма **BÖHLER-UDDEHOLM AG** (Австрия) изготавливает металлорежущий инструмент.



Большие перспективы данная технология имеет для создания новых конструкционных наноструктурных материалов, в частности, для дальнейшего развития отечественной технологии ИПД – интенсивной пластической деформации. Известно, что ИПД методом, например, равноканального углового прессования – РКУП, уже сейчас позволяет получать массивные наноструктурные заготовки размерами до Ø85 и длиной до 300 мм, пригодные для использования в машиностроении. При реализации РКУП заготовка неоднократно продавливается в специальной оснастке через два пересекающихся под углом 90 градусов канала с одинаковыми поперечными сечениями (при комнатной или повышенной температурах, в зависимости от деформируемого материала). «Наноструктурность» материала получают за счет деформации сдвигом. Наноструктурные материалы, вследствие

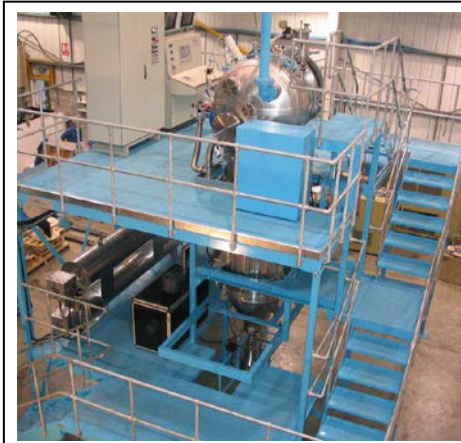
очень малого размера зерен, содержат в структуре большое количество границ зерен, которые играют определяющую роль в формировании их необычных физических и механических свойств. При «традиционных» методах упрочнения – прокатке, волочении, ковке повышение прочности материала, как правило, сопровождается уменьшением его пластичности. Наноструктурированные за счет ИПД материалы имеют высокую прочность и уникальную пластичность. Для формирования наноструктур методом ИПД весьма важными являются не только число проходов, но и однородность исходного массива, равномерность распределения веществ, составляющих сплав, по объему исходного материала. Технология **spray forming** позволяет получить хорошо подготовленный для ИПД материал.

Интересным и перспективным направлением использования наноматериалов является подшихтовка ультрадисперсных порошков в распыливаемый расплав основного, матричного металла. Такой метод дает возможность создания уникальных сплавов с **равномерным** включением в объемную структуру металла наночастиц различных материалов – металлов, включая редкоземельные, оксидов и пр.

Здесь же приведем некоторые данные об оборудовании – атомайзерах, с помощью которого могут быть реализованы проекты с использованием технологии **spray forming**.

Процесс распыливания металла (и получения порошка) – атомизация (от англ. **atomization** - распыление) различен в зависимости от исходного металла. Обычно атомайзер содержит плавильную камеру, где в условиях вакуума или инертной среды производят расплав металла, и распылительную камеру, где струю расплавленного металла, вытекающую из плавильной камеры, разбивают на мелкие капли с помощью высокоскоростного потока аргона, воздуха или водяного пара в зависимости от

исходного металла и требований к форме частичек порошка. Конструкция машин позволяет получать металл в слитках (слив в изложницу), либо в виде порошка, либо в виде **spray forming**–заготовки. Слитки получают для последующей обработки давлением (прокат,ковка) и проведения необходимых исследований. Владение такой техникой, кроме возможности проводить широкий круг научно-исследовательских работ в области создания перспективных технологий и материалов, снимает зависимость исследователей от поставщиков металлических порошков, позволяет создавать в требуемом количестве «свои» порошки для решения конкретных задач, а также обеспечивать расходными материалами **AF**-машины для послойного синтеза.



**Hermiga 100/10 VI**

Плавильно-распылительная машина **Hermiga 100/10 VI (Phoenix Scientific Industries Ltd., Великобритания)** – атомайзер, лабораторно-исследовательская машина с донным сливом и с газовым (аргон) распылителем для получения порошков спецсталей, титановых сплавов и заготовок методом **spray forming**. Машина используется главным образом в целях НИОКР в НИИ и университетах для проведения исследований в области металлургии, для получения небольших слитков металлов и их сплавов для дальнейших физико-химических исследований, отработки технологии литья и механообработки материалов и т. д., а также для получения небольших партий порошковых металлов для целей общих задач порошковой металлургии.

Машина имеет относительно небольшие размеры - 2100x3200x2400 мм, вес 2500 кг, что важно при инсталляции в стесненных лабораторных условиях, типичных для университетов и НИИ. Машина может также выполнять функцию «поставщика» расходных (строительных) материалов для аддитивных машин, для выращивания изделий (в частности, литейных форм) из металлических порошков. Получаемый порошок имеет сферическую геометрию частиц. Скорость охлаждения при атомизации от  $10^3$  до  $10^6$  К/с. Модель **Hermiga 100/10 VI** имеет легкоъемный тигель емкостью 10,0 кг по стали. Дисперсность порошка варьируется от 10 до 100 мкм. Порошок может быть дополнительно разделен на отдельные фракции с помощью стандартных вибросит. Широкий спектр расплавляемых металлов, включая пиррофорные сплавы и сплавы редкоземельных металлов. При получении алюминиевых порошков с целью снижения опасности взрыва предусмотрено регулируемое пассивирование. Как опция – атомизация в воде для получения металлических гранул. В линейке оборудования фирмы **PSI** имеются также модели **Hermiga 75/5 VI**, **Hermiga 100/25VI** (все с донным сливом), **Hermiga 100/50V21**, **Hermiga 120/100 V21**, **Hermiga 100/200 V21** (все с поворотным тиглем), которые имеют емкость тигля по стали, соответственно, 5, 25, 50, 100 и 200 кг и являются машинами для мало - и среднеосерийного производства металлических заготовок и порошков.



Компания **Atomising Systems Ltd** (Великобритания) специализируется на выпуске оборудования для атомизации металлических и неметаллических материалов различными технологиями:

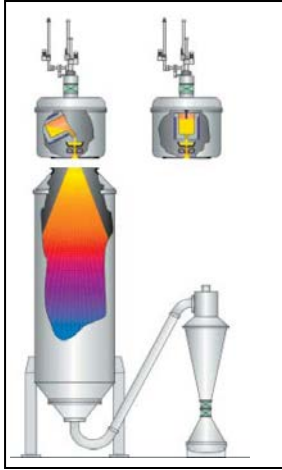
- распыление водой;
- распыление инертным газом;
- ультразвуковое распыление;
- центробежное распыление.

Компания имеет богатый опыт в производстве оборудования, в частности, для получения порошков легкоплавких материалов, из которых изготавливаются разного рода припои для электронной промышленности. В линейке оборудования



имеются как лабораторные атомайзеры, на которых можно получать 1-5 кг порошка в день, так и промышленные установки производительностью более 5 т/день.

**Лабораторный атомайзер ALD VIGA1-B (ALD GmbH, Германия)** для получения порошков стали и сплавов. Машина предназначена для получения небольших количеств порошков различных конструкционных сталей, никелевых сплавов,



кобальта, меди и др. методом **VIGA - vacuum induction melt inert gas atomization**. Имеет тигель объемом около 1,0 л с донным сливом. Стандартная конструкция вакуумной установки



для распыления инертным газом (**VIGA**) включает печь для вакуумного индукционного плавления (**VIM**), где сплавы плавятся, очищаются и проходят дегазацию. Очищенный расплав сливается по предварительно нагретому желобу в газовую форсунку, где металл распыляется струей инертного газа под высоким давлением.

Полученный металлический порошок затвердевает в полете в башне,

расположенной прямо под распылительной форсункой. Смесь порошка и газа транспортируется по трубопроводу в циклонную установку, где крупные и мелкие фракции порошка отделяются от распылительного газа. Металлический порошок собирается в герметичные контейнеры, расположенные под циклонной установкой. Конфигурация машины обычно согласовывается с заказчиком с учетом конкретных условий инсталляции. В качестве опции предусмотрено оснащение атомайзера функцией **spray forming**.

**Лабораторный атомайзер ALD EIGA** имеет также как и машины **PSI** возможность



слива металла в изложницу или получение металлических порошков методом распыления в струе аргона. В установках **EIGA (Electrode induction guide inert gas atomization - индукционная плавка электрода с распылением газом)** прутки после предварительной плавки в форме электродов проходят индукционную плавку и распыляются без использования плавильного тигля. Плавление производится опусканием медленно вращающегося электрода в кольцевой индуктор. Капли металла скапливаются

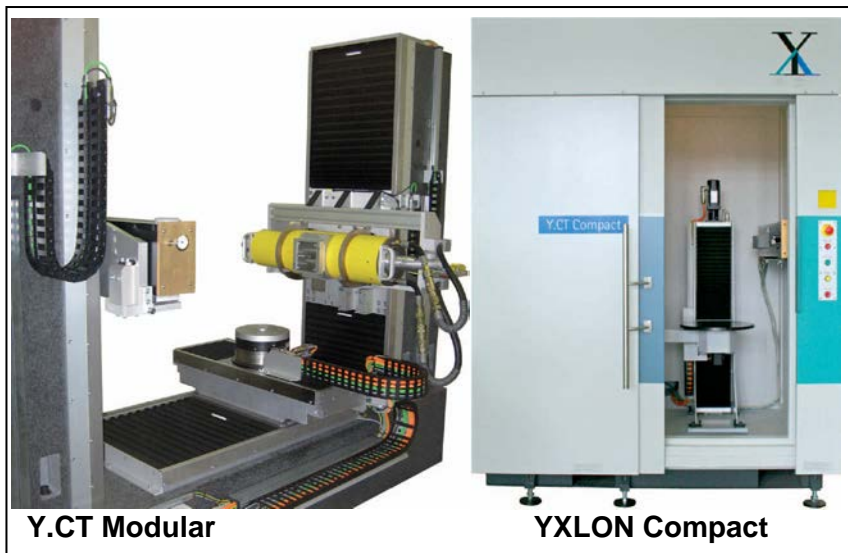
с электрода в систему форсунок и распыляются инертным газом. Типичными материалами, получаемыми по технологии без использования керамики, являются тугоплавкие и активные материалы, например **Ti, TiAl, FeGd, FeTb, Zr и Cr**. Она может также использоваться для многих других материалов. Лабораторный вариант машины **EIGA** имеет тигель до 5 кг по титану, скорость распыливания около 0,5 кг/с. Машина может быть оснащена функцией **spray forming** для «выращивания» болванок диаметром до 50 мм и длиной до 500 мм.

## 6. Компьютерная томография для измерений и неразрушающего контроля литых и металлопорошковых изделий

Для целей НИР, в частности, металлургических исследований, дефектоскопии и широкого круга инженерных задач вообще большой интерес представляют системы

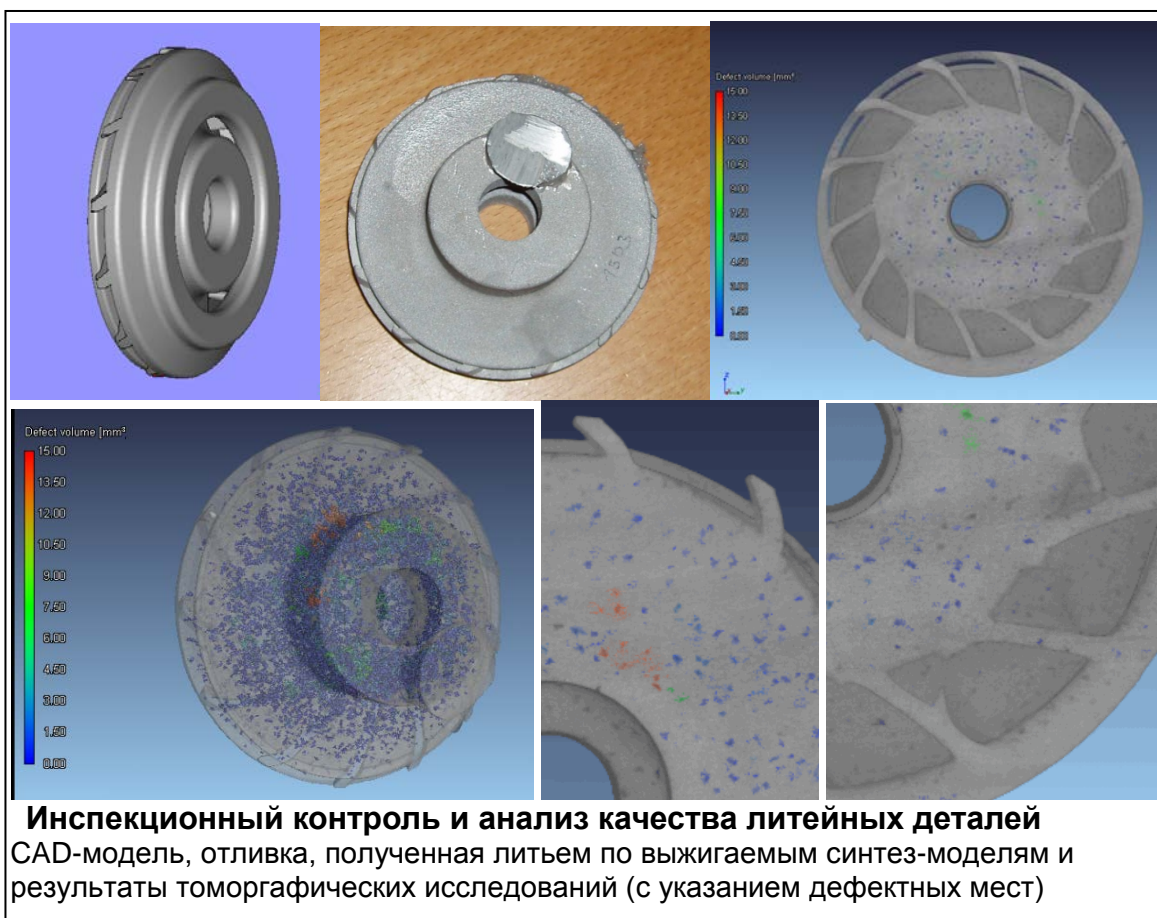
компьютерной томографии, позволяющие «увидеть» внутреннюю структуру изучаемого объекта. В контексте данной работы, делающей акцент на технологическом обеспечении в первую очередь НИОКР посредством аддитивных технологий, томографы представляют особый интерес для отработки технологии литья ответственных изделий с техники позволяет оперативно исследовать проблемные места в отливке, объективно оценить степень их важности, провести варианты исследования литниковой системы, режимов пред- и пост-обработки отливки и таким образом в сжатые сроки отработать бездефектную технологию получения литых изделий. Современные системы компьютерной томографии позволяют идентифицировать объекты (поры, раковины, включения и т. д.) с высоким разрешением, получать по сути трехмерный скан детали.

По томограмме можно получить наглядное изображение и любого сечения объекта, и 3-х мерной модели в целом, которая также может быть сопоставлена с исходной **CAD**-моделью. Важным параметром системы является размер пятна фокуса при фокусировании рентгеновских лучей. Чем меньше его размер, тем выше разрешение системы, тем более четкое и достоверное изображение проецируется на детектор. В современных системах для промышленных задач размер пятна фокуса составляет 200 и менее нанометров (0,2 мкм), что позволяет создавать томографы для достаточно габаритных объектов, таких как блоки и головки цилиндров двигателей, корпусных деталей энергетических машин и т. д.



Компании **YXLON** и **Werth** (Германия) выпускают специальные томографы **YXLON.CT Universal** и **Tomoscope** для целей НИОКР, имеющие в своем составе макро- и микро-фокусные трубки и линейный и плоскопанельный детекторы. Микрофокусные трубки открытого типа с мощностью излучателей 10-225 кэВ/0.01-3.0 мА. Макрофокусные трубки 60 - 450 кэВ/2.0-9.0 мА. Масса

инспектируемой детали до 65 кг, высота – до 650 мм, диаметр – до 635 мм. Томограф имеет гранитное основание и может быть использован в качестве контрольно-измерительной машины. Разрешение до 1 мкм, точность измерений 10 мкм. Томографы позволяют проводить регистрацию и анализ дефектов и внутренней структуры деталей практически из всех конструкционных материалов, включая пластмассовые и композитные. Эти машины чрезвычайно удобны и полезны для отработки технологии литья, а также для входного и выходного контроля особо ответственных отливок и металлопорошковых изделий с повышенными требованиями на герметичность и качество внутренней структуры материала. Известными производителями компьютерных томографов являются также: Nikon (производство в Бельгии), General Electric (подразделение Phoenix), Carl Zeiss, Werth, Matrix Technologies (Германия) Для лабораторных исследований представляют интерес относительно недорогие (80-120 тыс. евро) томографы CTportable (Fraunhofer EZRT), и томографы серии SHR (Shake GmbH) с трубками 50-160 кВ. Наиболее популярным программным продуктом для обработки данных томографирования, контрольных измерений и анализа является VGStudio Max 2.1 компании Volume Graphics.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Здесь приведены некоторые сведения о современных литейных технологиях, которые с полным правом можно отнести к инновационным и которые в полной мере соответствуют задачам создания инновационной экономики. Экономика приобретает инновационный характер вследствие инновационного развития в первую очередь сферы материального производства, в основе которого лежат **технологии** – «знание и умение» сделать что-либо: микросхему, программный продукт, автомобильную шину, лопатку турбины или медицинский препарат. Именно технологии в широком смысле – наличие или отсутствие их, определяют положение экономики страны в мире, ее стратегические позиции. Наличие технологий дает в руки ученому или конструктору мощные инструменты для реализации новых идей. Технологии позволяют применять новые высокоэффективные материалы, новые методы управления, и таким образом обуславливают новое функциональное и интеллектуальное содержание продукта. Отсутствие же технологий сковывает, ограничивает творческий потенциал ученого или конструктора, вынуждает его применять те технические решения, которые есть в его распоряжении, а не те, которые требуются для достижения амбициозных целей. Поэтому сами технологии **являются главным объектом инновационной деятельности**.

Разработка инновационных технологий является следствием, результатом совместного труда ученых в фундаментальных и прикладных областях. Именно это – НИР и НИОКР, являются ключевыми звеньями во всей технологической цепочке создания инновационных продуктов, и именно эти ключевые звенья должны быть

объектами особого внимания, как со стороны государства, так и научного сообщества. Созданный в России 90-х годах институт ЦКП (Центров Коллективного Пользования) является удачным примером соединения усилий государства и науки для решения важнейших задач развития научно-технической базы и модернизации экономики страны. Но и этот институт требует совершенствования и модернизации в силу возросшей значимости науки в современных условиях. Приведенные в настоящей работе технологии являются не только современными и высокоэффективными, но инновационными по своей сути, поскольку сами позволяют генерировать новые технологии, несут в себе новое качество. залогом успешного освоения данных технологий является их цельность, т. е. соединение их самих в определенную технологическую цепочку, которую можно переформатировать в зависимости от конкретной решаемой задачи. Особенностью аддитивных технологий, о которых идет речь в статье, является их относительно высокая стоимость. Освоить эти технологии во всем их многообразии не под силу даже самым успешным предприятиям. И в этой связи роль Центров Коллективного Пользования, Центров Компетенций может быть многократно усилена при разумном согласовании их действий в определенных целях для решения крупных научно-исследовательских задач. Специализация одних ЦКП и взаимосвязь их с другими в рамках единой научно-исследовательской программы позволит рационально использовать дорогостоящее оборудование с высоким конечным результатом, выраженным в появлении новых технологий и инновационных продуктов.