

Министерство образования и науки
Российской Федерации

Набережночелнинский институт (филиал)
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Казанский (Приволжский) федеральный
университет»

Кафедра машиностроения

**ТЕХНОЛОГИЯ БЫСТРОГО
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

Учебное пособие

**Набережные Челны
2017**

УДК 669.018.28(075.8)

*Печатается по решению
редакционно-издательского совета
Набережночелнинского института
Казанского (Приволжского) федерального университета*

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор **М.С. Колесников**;
кандидат технических наук **Р.Д. Фарисов**

Сафронов Н.Н.

Технология быстрого прототипирования в литейном производстве: учеб.
пособие / Н.Н. Сафронов, Г.Н. Сафронов, Л.Р. Харисов. – Набережные Челны:
Изд.-полигр.центр Набережночелнинского института К(П)ФУ, 2017. – 77 с.

©Набережночелнинский институт К(П)ФУ, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Технологии быстрого прототипирования (Rapid Prototyping – RP) стремительно вошли в современную промышленность, медицину, дизайн, архитектуру, образование – практически во все сферы деятельности человека, вооруженного компьютером, и стали неотъемлемой частью процесса материального производства – будь то серийная продукция или уникальные (единичные) изделия. Additive Fabrication (AF) или Additive Manufacturing (AM) – принятые в англоязычной технической лексике термины, обозначающие аддитивный, т.е. «добавление», метод получения изделия (в противоположность традиционным методам механообработки путем «вычитания» (subtractive), материала из массива заготовки). Они употребляются наряду со словосочетанием RP, но имеют более общее значение, точнее отражающее современное положение. Можно сказать, что RP в современном понимании является частью AF-технологий, «отвечающей» за собственно прототипирование методами послойного синтеза. AF- или AM-технологии охватывают все области синтезирования 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 так называемая CAD-модель.

Современный конструктор не мыслит себе создание новой продукции вне цепочки CAD/CAM/CAE, внутри которой важнейшее место занимает RP-технология. Причина здесь одна: сокращение сроков создания нового продукта в несколько раз, часто в десятки раз.

Нужно не только спроектировать продукт, но и провести весь комплекс исследовательских, опытно-конструкторских, экспериментальных работ,

технологическую подготовку производства, наконец, сертификацию, маркетинг, создать сервисную структуру и т.д. RP-технология решает задачу сокращения сроков НИОКР (научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки), и особенно ОКР, настолько значительно (зачастую в десятки раз), что несмотря на высокие затраты, связанные с приобретением специального оборудования, все крупные западные фирмы имеют у себя на вооружении не только отдельные машины по быстрому прототипированию, но и целые комплексы – RP-центры. Они оснащаются различными машинами разных фирм, специализирующихся на отдельных направлениях данных технологий.

В настоящее время RP-технология – это очень емкое понятие, включающее в себя всё многообразие средств получения прототипа изделия по 3D-CAD-модели. В данной работе мы будем говорить о RP-технологиях в первоначальном смысле этого понятия, когда термин Rapid Prototyping вошел в обиход с появлением лазерных стереолитографических машин, «выращивающих» модели (прототипы) из фотополимерной смолы. За 25 лет, прошедших после выпуска на рынок первых прототипирующих машин, это направление получило значительное развитие. Появились машины, работающие с другими материалами и на другом принципе, но общим для всех современных машин остается «послойность», т.е. послойное построение физической модели по 3D-модели. Поэтому данное направление RP-технологий объединяют общим понятием «послойный синтез», имея в виду не только лазерную стереолитографию, но и лазерное спекание порошковых материалов, и так называемые «трехмерные принтеры», и послойное создание моделей из ламинированной бумаги (LOM-технология), технологии синтеза песчаных литейных форм и др.

ТЕХНОЛОГИЯ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

Технология быстрого прототипирования подразумевает быстрое получение прототипа, не ввязываясь в изготовление традиционной технологической оснастки, быстрое – в течение нескольких дней или недель (а не месяцев и лет) – получение опытного образца и возможность его испытаний и доводки, не дожидаясь, когда модельщик «срубит» модель, технолог создаст пресс-форму, а литейщик сделает отливку, часто с непредсказуемым результатом. Ключевое слово здесь – «быстро». Быстро сделать опытный образец, быстро обнаружить неизбежные ошибки, быстро внести изменения или бросить неудачную конструкцию, быстро принять решение – правильно сделано или нет, затем быстро отдать доведенное изделие в производство, и дальше, с помощью тех же RP-технологий, быстро создать технологическую оснастку на уже отработанное, проверенное и испытанное изделие. Традиционная технологическая оснастка (например, модельная для литья), созданная для изготовления первого опытного образца, практически никогда не используется вторично. Изменения, вносимые конструкторами и технологами в процессе испытаний и доводки этого образца, настолько значительны, что дешевле изготовить новую оснастку, чем править старую. Таким образом, оснастка для первого образца практически всегда теряемая. В процессе работы над новым проектом, особенно на стадии комплексного проектирования, трудно выявить различные ошибки и недостатки, используя только экран дисплея и оперируя даже с твердотельными 3D-моделями. Имея реальную физическую модель будущего изделия, разработчик может обнаружить и устранить конструкторские ошибки, выполнить контрольную сборку с моделями деталей и скорректировать пути продолжения процесса проектирования. Любой технолог, работающий в опытном производстве, мог бы рассказать об обидных случаях, когда специальная и весьма дорогостоящая технологическая оснастка (пресс-формы, штампы и др.) оказывалась негодной из-за вовремя не выявленной конструкторской ошибки. Получение моделей

деталей методами RP-технологий минимизируют риск ошибочных конструкторских и технологических решений.

В настоящее время на рынке существуют различные RP-системы, производящие модели по различным технологиям и из различных материалов. Однако все современные системы быстрого прототипирования работают по схожему послойному принципу построения физической модели, который в упрощенном виде заключается в следующем:

- средствами CAD создается графическая 3D-модель детали;
- готовая модель записывается в STL-файл (все современные CAD-системы твердотельного моделирования могут экспортировать файлы в этом формате);
- STL-файл передается в установку быстрого прототипирования;
- трехмерная модель разбивается на горизонтальные сечения (слои) с помощью специальной программы, поставляемой с оборудованием;
- производится последовательное построение сечений детали слой за слоем снизу вверх, до тех пор, пока не будет получен физический прототип модели.



Песчаный стержень



Модель головки цилиндров из полиамида



Стереолитографическая мастер-модель колеса турбокомпрессора

Рисунок 1. Примеры готовых прототипов

Каждый последующий слой «приваривается» или «приклеивается» к предыдущему – и так до полного построения модели (рис.1).

Сами технологии создания прототипов бывают различными. Что касается литейного производства, то в западной промышленности широкое

распространение получили технологии быстрого прототипирования на основе лазерной стереолитографии (фотополимеризации), лазерного спекания и др. Применение этих технологий позволяет непосредственно получать модели (макеты, копии) требуемой детали, минуя стадию традиционного изготовления деревянной оснастки. Модели выращиваются из синтетических материалов и затем используются для получения литейных форм (так называемые «уничтожаемые» или «теряемые» модели, например, для литья по выплавляемым или выжигаемым моделям), либо в качестве литейной оснастки для формовки – например, песчаных форм. С помощью лазерной технологии могут быть получены также и песчаные стержни любой сложности (машины фирм 3D Systems, EOS, Generis). Выращивание моделей открывает неограниченные возможности в технологии литья металлов, позволяет реализовать конструкции, ранее недоступные вследствие технологических ограничений.

Таким образом, последовательность действий при использовании RP-технологий для изготовления литейных деталей может быть следующая (рис. 2).



Рисунок 2. Процесс быстрого прототипирования

Данная модель была изготовлена за 10 часов, а отливка, учитывая время формовки и сушки песчаной формы, за 30 часов. Другой пример – блок цилиндров двигателя (рис. 3).



Рисунок 3. Быстрое прототипирование на примере блока цилиндров

Это наиболее типичные примеры использования RP-технологий в машиностроении, там, где трудоемкость изготовления опытных образцов особенно велика и эффективность RP-технологий с точки зрения экономии времени особенно заметна.

Рассмотрим подробнее пять технологий (процессов) быстрого прототипирования и некоторые наиболее популярные установки компании 3D Systems.

ТЕХНОЛОГИИ И УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА

Установка ThermoJet (Multi-Jet Modelig, или MJM-процесс)

Построение модели производится с помощью специальной струйной головки, подающей расплавленный материал (технический воск на основе парафина со специальными ингредиентами) на рабочую платформу, где выращивается модель (рис. 4). На этой установке могут быть получены модели размером 190*210*250 (высота) мм.

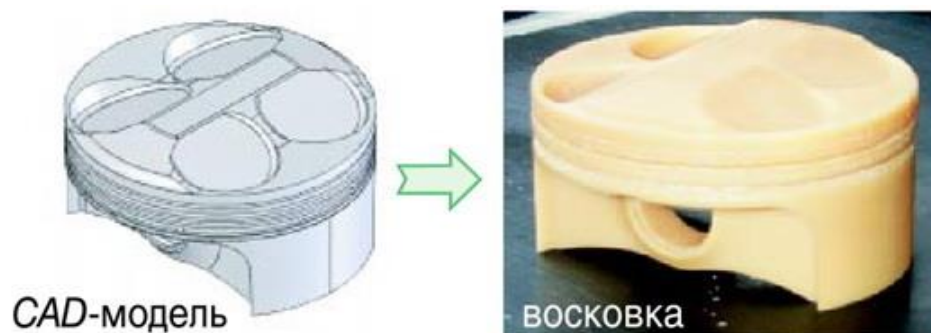


Рисунок 4. Модель

Однако сложные и более габаритные модели могут быть получены из нескольких частей путем склейки (рис.5).



Рисунок 5. Установка ThermoJet

Шаг построения 0,1 мм. Точность построения модели зависит от квалификации оператора, но в среднем можно сказать, что отклонение размеров от номинала лежит в пределах 1-2%. Скорость построения зависит от плотности загрузки рабочей платформы (можно одновременно выращивать несколько моделей), но ориентировочно составляет 0,5-1,0 см/час (по высоте).

Установка (рис. 6) относится к классу недорогих моделлеров, машина очень эффективна для быстрого изготовления металлических единичных или уникальных изделий по выплавляемым моделям, а также для изготовления технологической оснастки.

Установка Viper si 2, SLA 3500/5000/7000 (Stereo Lithography Apparatus, SLA-процесс)

Основой в данном процессе является ультрафиолетовый лазер (твердотельный в Viper si 2 и CO₂ – в других машинах), который последовательно переводит поперечные сечения модели на поверхность емкости со светочувствительной смолой. Жидкий пластик затвердевает только в том месте, где прошел лазерный луч. Затем новый жидкий слой наносится на затвердевший слой, и новый контур «обрабатывается» лазером. Процесс повторяется до завершения построения модели, т.е. пластиковой копии детали. На сегодня стереолитография – наиболее распространенная технология. Она охватывает практически все отрасли материального производства от медицины до тяжелого машиностроения. SLA-технология позволяет очень быстро и очень точно построить модель изделия практически любых разумных размеров (рис. 6).

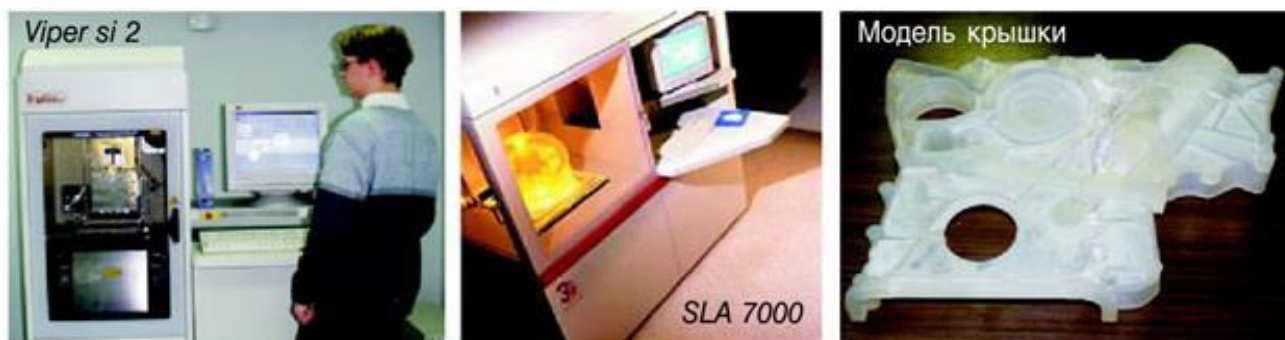


Рисунок 6. Стереолитография

Качество поверхностей весьма высокое и при необходимости может быть дополнительно улучшено, поскольку «зафиксированный» фотополимер хорошо обрабатывается, и поверхность модели может быть доведена до зеркальной. Время построения модели зависит от загрузки рабочей платформы, а также от шага построения. Установка Viper si 2 (размеры рабочей зоны машины 250×250×250 мм) имеет наименьший шаг построения – 0,05 мм. С её помощью можно получать высокоточные мастер-модели для последующего изготовления восковок, модели и макеты для медицинских целей, для электронной или ювелирной промышленности, для точного стального литья и т. д. К примеру, построение модели колеса турбокомпрессора (рис. 1) с шагом 0,05 мм заняло 4 часа 35 мин., а отклонение размера от номинала (55 мм) составило 0,06 мм.

Установка послойного лазерного спекания порошковых материалов Vanguard (Selective Laser Sintering, SLS-процесс)

Согласно этому процессу модели создаются из порошковых материалов за счет эффекта спекания при помощи энергии лазерного луча. В данном случае, в отличие от SLA-процесса, лазерный луч является не источником света, а источником тепла. Попадая на тонкий слой порошка, лазерный луч спекает его частицы и формирует твердую массу, в соответствии с геометрией детали. В качестве материалов используются полиамид, полистирол, песок и некоторые металлы. Изображенная на рис.7 установка Vanguard является универсальной с точки зрения применяемых материалов.



Рисунок 7. SLS-установка Vanguard

В отличие от аналогов (например, машины фирмы EOS) она работает со всеми известными порошковыми материалами. Огромным преимуществом SLS-процесса является отсутствие так называемых поддержек при построении модели. В SLA- и MJM- процессах при построении нависающих элементов детали используются специальные поддержки, предохраняющие свежестроенные тонкие слои модели от обрушения. При использовании SLS-процесса в таких поддержках нет необходимости, поскольку построение ведется в однородной массе.

После построения модели достаточно лишь высыпать остаточный порошок из внутренних полостей, и модель готова к дальнейшей работе.

Модели из полистирола предназначены для получения отливок методом выжигаемых (газифицируемых) моделей. После построения модель весьма хрупка и требует бережного обращения (рис. 8).

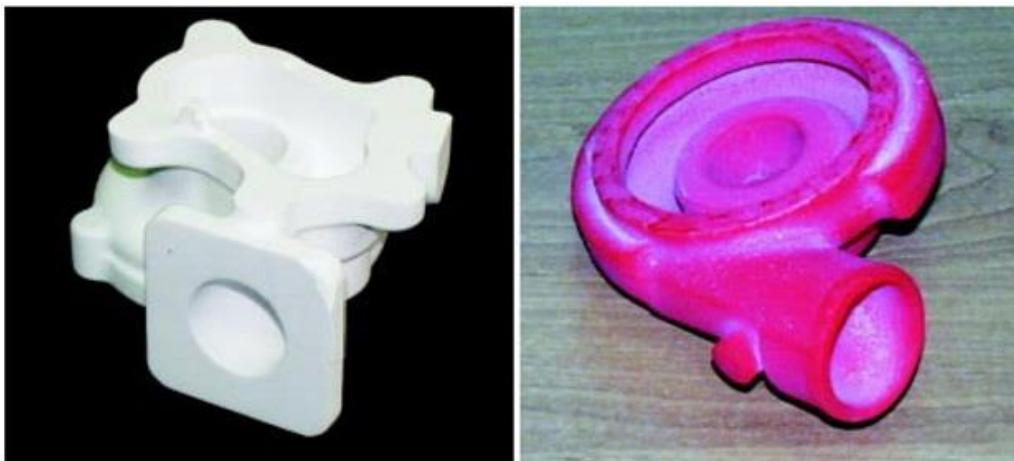


Рисунок 8. Модели из полистирола корпуса турбины после построения и корпуса компрессора после инфильтрации

Для придания большей прочности её пропитывают расплавленным парафином (инфильтрация), после чего модель готова для заливки формовочной смесью и последующих технологических операций. Другим рабочим материалом для построения моделей является полиамид. Он применяется для создания функциональных моделей, т.е. моделей, способных выполнять свои функции в качестве деталей машины или устройства (например, детали облицовки салона автомобиля или декоративные элементы

кузова). В некоторых случаях этот материал пригоден для исследовательских работ по определению конфигурации какой-нибудь ненагруженной детали, например, впускного трубопровода автомобильного двигателя (рис. 9).



Рисунок 9. Испытание впускного трубопровода двигателя

Этот материал удобен для изготовления моделей с целью проверки собираемости сложного узла или для проведения предварительных испытаний. Большие технологические возможности открывает использование песка в качестве рабочего материала. Песчаные стержни весьма сложной конфигурации могут быть изготовлены непосредственно в машине без применения традиционной стержневой оснастки. Размеры рабочей зоны машины 320/360/440 (высота) мм.

Очень перспективным направлением в технологии лазерного спекания является работа с металлическим (стальным) порошком. Здесь мы получаем возможность сразу вырастить нужную деталь из металла, минуя стадии построения модели, литья и даже мех.обработки.

Это направление пользуется популярностью у изготовителей пресс-форм для пластмассовых изделий. По CAD-модели выращивается металлопорошковая модель, которая представляет собой некую решетку или каркас. Такая модель очень хрупка и требует бережного обращения. Затем к ней подставляют так называемые питатели, на которых располагают кусочки бронзы. Затем модель с питателями помещают в специальную печь, где при температуре 1100°C происходит процесс инфильтрации – «пропитка» модели бронзой, заполнение «решетки» металлом за счет сил молекулярного

взаимодействия. В итоге получается некий сталебронзовый композит (материал, которому еще не придумали точного названия), по механическим свойствам близкий к обычной конструкционной стали (рис. 10).

Конечно, это не полноценная сталь, которую можно подвергать термообработке и управлять её свойствами.

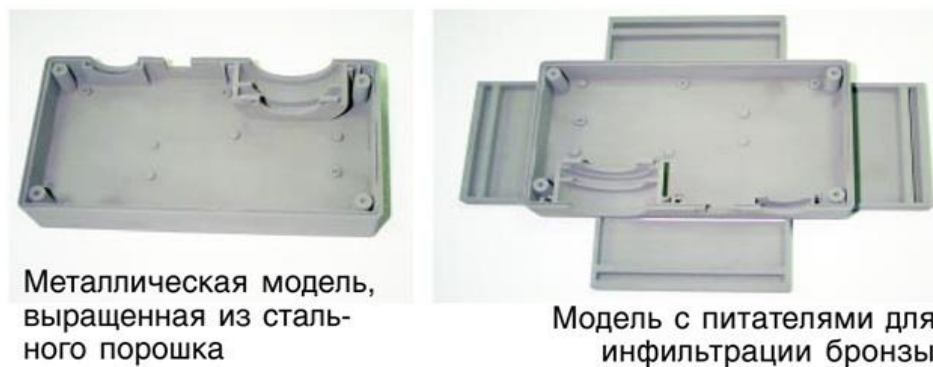


Рисунок 10. Сталебронзовые прототипы

Однако во многих случаях полученные таким образом изделия могут быть вполне функциональны, например, как детали пресс-форм для пластмасс.

Развитие RP-технологий стимулировало значительный прогресс в литейном деле. Хотя сами по себе технологии литья по выплавляемым или выжигаемым моделям по сути остались такими же, как и сотни лет назад, современное оборудование для литья приобрело черты офисного оборудования. Фактически это оборудование уже настолько «приблизилось» к разработчику, что теперь не редкость видеть конструктора, работающего с литейной машиной как с плоттером, на котором он распечатывает чертежи. Зачастую эти установки (так же, как и RP-оборудование) даже устанавливаются рядом с помещением, где работают конструкторы. Безусловно, речь идет об оборудовании, предназначенном исключительно для изготовления опытных образцов или малых серий. Большой популярностью пользуются литейные машины для вакуумного литья. Они органично вписываются в RP-технологию, часто являясь конечным звеном в технологической цепи от чертежа (файла) до опытного изделия.

ТЕХНОЛОГИЯ ЛИТЬЯ ПО 3D МОДЕЛЯМ

Точное вакуумное литье по выплавляемым моделям

В качестве модели для получения отливки используется либо модель, непосредственно выращенная на установке лазерного синтеза (материалы – фотополимеры или полистирол, т.е. не «выплавляемые», а «выжигаемые»), либо модель-восковка, полученная на трехмерном принтере (ThermoJet) или с помощью оснастки, изготовленной методом послойного синтеза или традиционным методом. Модель помещается в специальную опоку с перфорированными стенками и заливается формовочной смесью («жидкой керамикой», гипсокерамикой и т.п.), приготовленной в смесителе непосредственно перед заливкой модели. Собственно процесс заливки осуществляется в вакуумной камере, совмещенной со смесителем. Вакуумирование при заливке модели является важным звеном в технологической цепи – это способствует удалению пузырьков воздуха из смеси, обеспечивает прочность формы и высокое качество поверхностей отливки. Затем опоку извлекают из вакуумной камеры и после некоторой экспозиции помещают в печь для удаления (выплавления или выжигания) модели, а после этого – в печь для термофиксации формы (рис. 11).



Рисунок 11. Изготовление формы

В качестве материала для получения отливок обычно применяется первичный металл в виде кусков по 200÷300 грамм. Хотя противопоказаний

для применения металла “вторичной” переработки нет, однако фирмы, использующие данные технологии, считают, что риск получения некачественной отливки из-за низкого качества собственно металла в данном случае не оправдан ввиду относительно высокой стоимости как самой модели, так и всего технологического процесса.

Следующим этапом является заливка металла в форму и получение отливки в литейной вакуумной машине (рис. 12). Опока устанавливается в специальный контейнер, подводится к тигельной камере, расположенной в верхней части машины, и фиксируется с помощью замков. Тигель выполнен из графита или керамики. Нагрев тигля осуществляется индукционным методом. Размеры тигля варьируются в зависимости от назначения машины от 0,2 литра (ювелирная промышленность) до 30 литров (машиностроение). По специальному заказу изготавливаются машины и большего объема тигля и вакуумной камеры. В вакуумной камере литейной машины создается разрежение около 700 мм рт. ст. и открывается клапан подачи металла.



Рисунок 12. Заливка металла в форму

При этом в тигельной камере в зависимости от конфигурации отливки и вида металла может сохраняться атмосферное давление или поддерживаться избыточное давление до 2 бар. Дозирующее устройство обеспечивает подачу металла для заливки в точном соответствии с объемом отливаемой детали и литниковой системы. Затем опоку извлекают из машины и охлаждают на воздухе (рис. 13). После этого её помещают в очистительную машину,

представляющую собой герметизированную камеру, в которой с помощью струи воды под давлением разрушают форму и вымывают формовочную смесь из внутренних полостей отливки.



Рисунок 13. Извлечение отливки

Отличительной чертой современной технологии быстрого литья Rapid Casting является не собственно литье металла как таковое (вакуумное литье и литье под давлением широко использовалось и ранее), а способ получения модели и литейной формы. Именно поэтому все фирмы, выпускающие литейные машины, предлагают в качестве дополнительной опции и специальное оборудование для производства моделей, форм и модельной оснастки. Технология Rapid Casting позволяет произвести единичный экземпляр прототипа, создать уникальную продукцию в рекордно сжатые сроки (в течение дней, а не месяцев, как по традиционной технологии). Это чрезвычайно важно при разработке опытных изделий, особенно сложной конфигурации. Но, как уже говорилось, зачастую при создании новой продукции конечное изделие сильно отличается от прототипа или первой версии. Литейная оснастка, изготовленная для производства первого прототипа, практически не используется для получения последующих версий изделия. В этом случае технология Rapid Prototyping оказывается не только выгодной с точки зрения сокращения сроков изготовления детали, но и рентабельной. Если же стоит задача производства опытной серии деталей, приведенная выше технология оказывается неприемлемо дорогостоящей.

Литье в силиконовые формы

В тех случаях, когда стоит задача тиражирования детали (малая серия), широко используется получение восковок с помощью силиконовых форм (рис. 14). Этот метод также предполагает «участие» стереолитографии или послойного синтеза в любом другом виде. Суть данного метода состоит в том, что стереолитографическая модель используется для получения оснастки из силикона, с помощью которой в дальнейшем идет изготовление восковок.

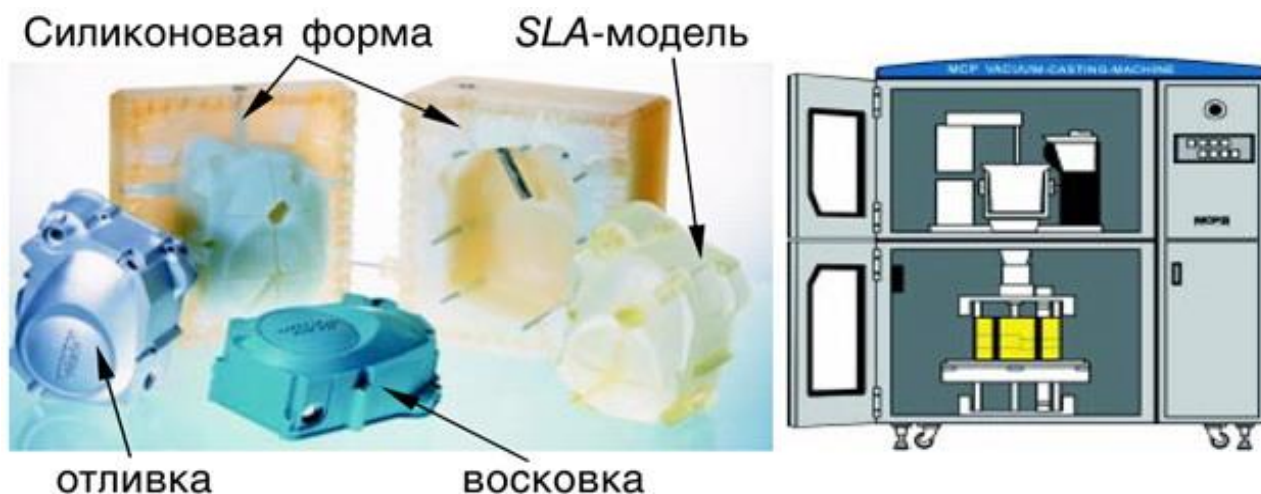


Рисунок 14. Получение восковок с помощью силиконовых форм

Стереолитографическую модель (по сути, копию детали) заливают жидким силиконом. После затвердения силикона полученную форму разбирают и извлекают стереолитографическую модель (в данном случае она оказывается «не теряемой»), а форму после финишной обработки используют для тиражирования восковок.

В зависимости от сложности детали силиконовая технология позволяет получать от нескольких сот до нескольких тысяч изделий с гарантированным качеством. Эта технология получила широкое распространение и в отраслях, не связанных с металлообработкой непосредственно, например, при изготовлении мелких партий изделий из пластмассы, которая заливается непосредственно в силиконовую форму.

Процесс изготовления силиконовой формы в основных чертах следующий. Силикон представляет собой двухкомпонентную смесь полимеров. Смесь из жидких компонентов приготавливается непосредственно перед

получением силиконовой формы в специальном смесителе и затем подается в опоку (обычно – прямоугольной формы), в которой находится стереолитографическая (или иная) модель детали.

В камере, где находится опока, создается вакуум, что обеспечивает удаление пузырьков воздуха из смеси.

С помощью специального программного обеспечения и технологических приемов при заливке силикона формируется разъем формы. Затем форма полимеризуется и извлекается из вакуумной камеры. После очистки она готова к применению (рис. 15).



Рисунок 15. Изготовление восковок в силиконовых формах

В силиконовых формах могут быть получены восковки для последующего изготовления отливок по выплавляемым моделям, либо прототипы изделий из пластмассы (например, нейлона).

ПРАКТИКА ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

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 постоянную 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 невозможной. И в этой связи традиционные методы оказываются не только дороги в плане материальных потерь, но и чрезвычайно затратны по времени.

Отказ от традиционных технологий, применение новых методов получения литейных форм и моделей за счет технологий послойного синтеза дали возможность радикально сократить время на создание новой продукции.

Например, характерная для автомобильного 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 (рис.16).

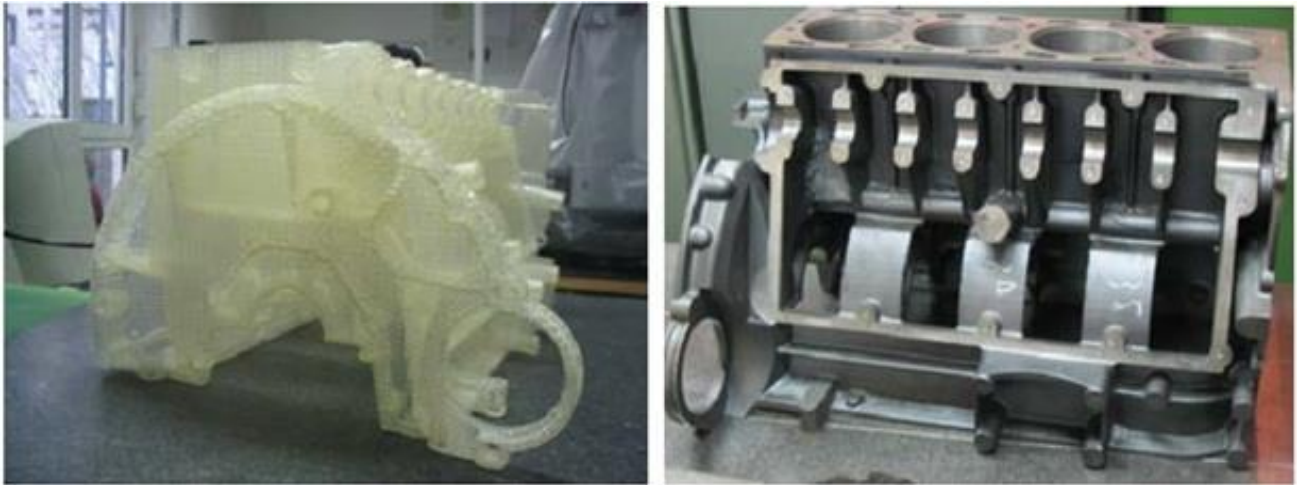


Рисунок 16. Quick-Cast модель и отливка блока цилиндров (чугун)

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 (рис. 21), 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: прямое выращивание восковой модели (1 день); формовка и сушка формы (1 день); прокалка формы и собственно литье (1 день); итого: 3-4 дня с учетом подготовительно-заключительных этапов.

Практически все автомобильные и авиастроительные компании промышленно развитых стран имеют в арсенале своего опытного производства десятки 3D принтеров, обслуживающих задачи НИОКР. Более того, эти машины начинают использоваться, как «обычное» технологическое оборудование в единой технологической цепи и для серийного производства.

При использовании АФ-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 «безбумажным» технологиям, когда для изготовления детали традиционной бумажной чертежной документации в принципе не требуется. 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.



Рисунок 17. Фрагменты песчаной формы

Литейные модели чаще всего могут быть получены (выращены) из:

- порошкового полистирола (для последующего литья по выжигаемым моделям);
- фотополимерных композиций для последующего литья по выжигаемым моделям или по технологии MJM для литья по выплавляемым моделям.

Модели из порошкового полистирола широко используются в качестве модельного материала для традиционного литья по выжигаемым моделям. Полистирольные модели изготавливаются на AF-машинах, работающих по технологии SLS. Эту технологию часто применяют тогда, когда необходимо

быстро сделать одну или несколько отливок сложной формы относительно больших размеров с умеренными требованиями по точности (рис. 18).

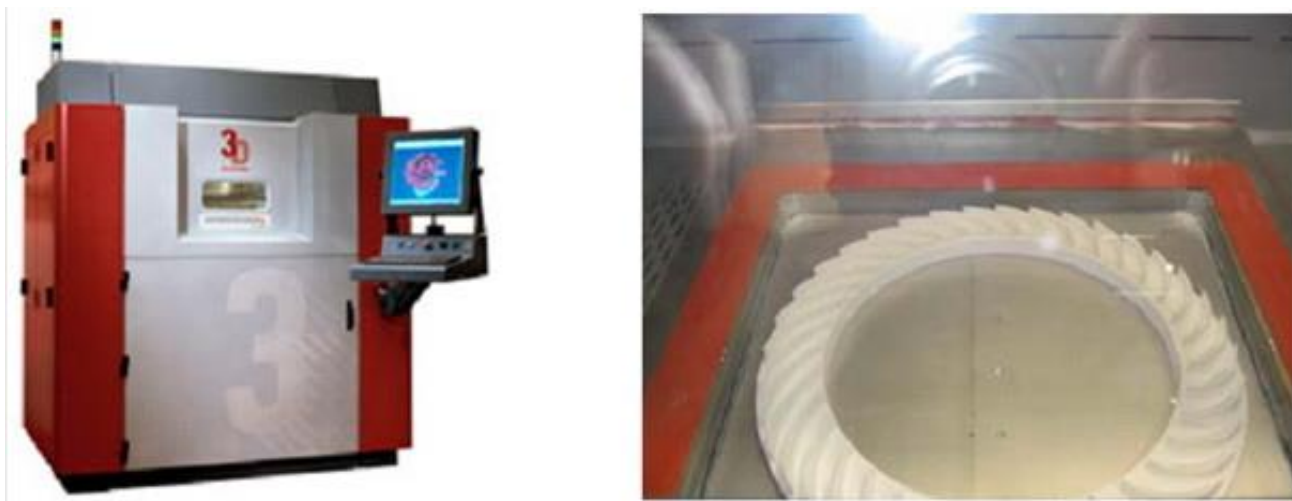


Рисунок 18. SLS-машина SinterStation Pro и модель колеса турбины

Модельный материал – полистирольный порошок с размером частиц 50-150 мкм, накатывается специальным роликом на рабочую платформу, установленную в герметичной камере с атмосферой инертного газа (азот). Лазерный луч «пробегаёт» 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 накатывается поверх отвержденного, формируется новый слой, который также спекается с предыдущим. Процесс повторяется до полного построения модели, которая в конце процесса оказывается заключенной в массив неспеченного порошка. Модель извлекается из 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 целиком, 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.
(рис.19).



Рисунок 19. Полистирольная модель и отливка цилиндра ДВС

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.

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. Во-вторых, 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 (рис. 20) показаны инфильтрированные модели красного цвета, из машины же извлекаются полистирольные модели снежно-белого цвета).



Рисунок 20. Полистирольная модель (после выращивания и инфильтрации) и отливка из чугуна

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 (рис. 21).



Рисунок 21. Полистирольные модели и отливки из алюминия

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 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.



Рисунок 22. SLS-модель распределительного вала и формовочный ящик

Модель выращивают, так же как и полистирольную. При этом по возможности делают ее полой 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 22. Ввиду большой длины модель выращена из двух частей, части склеены, заполнены эпоксидной смолой и закреплены в формовочном ящике; продолжительность операций 2 дня.

Суть технологии изготовления моделей из фотополимеров заключается 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 – отверждение слоя посредством лазера, и «моментальная» засветка слоя – отверждение слоя фотополимера вспышкой ультрафиолетовой лампы или прожектора. 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.

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. Лазерный луч здесь является не источником тепла, как в SLS-технологии, а источником света. Луч «штрихует»

текущее сечение САD-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 постобработки. 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.



Рисунок 23. SLA-модель и отливка изделия из серебра «шарик»

Таким образом, может быть 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.23).

Стереолитография широко применяется для:

- выращивания литейных моделей;
- изготовления 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 других видов исследований.



Рисунок 24. Quick-cast модель, она же с литниковой системой и отливка головки цилиндров (алюминий)

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 (рис. 24) 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 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» (рис. 25). В этом случае, конечно, в конструкции модели должны быть предусмотрены литейные уклоны и радиусы для выхода модели из формы без повреждений последней. Однако этот способ формовки используется редко из-за недостаточной прочности SLA-модели.



Рисунок 25. CAD-модель, SLA-модель и отливка передней крышки ДВС «в землю»

Само по себе получение точной качественной модели – дело дорогостоящее, потеря же и модели, и формы, и отливки становится и еще более дорогостоящей и драматичной, 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 (рис. 26), некоторый опыт имеется и в научных организациях автомобильного профиля.



Рисунок 26. SLA-модель и отливка рабочего колеса турбоагрегата (ОАО «ТМЗ»)

В частности, в «НАМИ» по этой технологии впервые в России были получены отливки таких сложных деталей, как головка и блок цилиндров автомобильного двигателя (см. рис.24).

Однако для других отраслей эта технология остается практически неосвоенной. Основным производителем SLA-машин является американская компания 3D Systems, которая выпускает широкую гамму машин с разными размерами зоны построения, от 250x250x250 мм до 1500x570x500 мм. Основные данные по машине iPro 8000 (рис. 27), которая достаточно активно используется в мировой промышленности для целей литейного производства, приведены в табл.1.

Таблица 1

Основные параметры SLA-машины iPro 8000

Размер рабочей зоны, мм	Шаг построения, мм	Максимальный вес модели, кг	Габаритные модели, мм	Вес, кг
650×750×550	0,05÷0,15	75	2220×1260×2280	1590

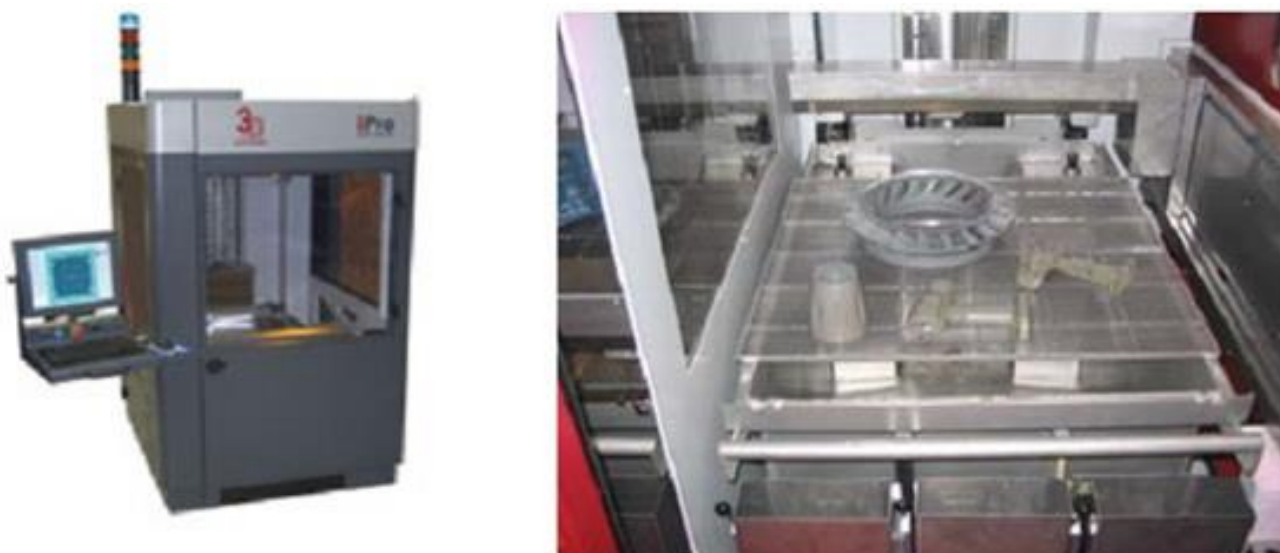


Рисунок 27. Машина iPro 8000 и SLA-модели

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-моделей и мастер-моделей. А для других целей, например, дизайн-макетов, используют более дешевые технологии. 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 $0,1 \div 0,2$ мм.

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, за $3 \div 5$ 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.

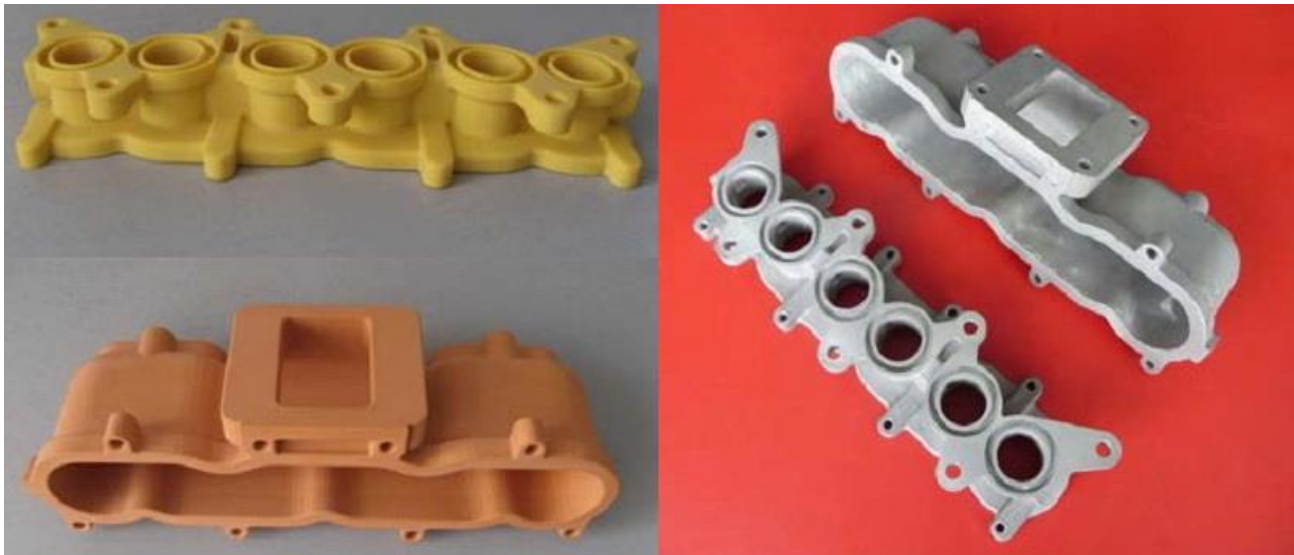


Рисунок 28. Модели Envisiontec и отливки деталей ДВС из алюминия

Модели Envisiontec (рис. 28) используются так же, как и SLA-модели – в качестве мастер-моделей и выжигаемых литейных моделей. 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, преимуществом 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. 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 si 2 (3D Systems) такие модели строились бы не менее 5,5-ти и 16-ти часов.

Для индустриального 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. Машина Extrim имеет один цифровой прожектор с разрешением 1400×1050 пикселей, EXEDE – два прожектора (рис. 29). 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



Рисунок 29. AF-машина Perfactory EXEDE

вниз с малой скоростью. Поэтому на моделях нет ярко выраженных ступенек, характерных для других способов построения.

Таблица 2

Основные характеристики машин Envisiontec семейства Perfactory

	Размеры зоны построения, мм	Толщина слоя построения, мм	Габаритные Размеры, мм	Вес, кг
Standart Zoom Standart UV	120×90×230 190×142×230 175×131×230	0,025÷0,150	480×730×1350	70
Extrim	320×240×430	0,025÷0,150	810×730×2200	480
EXEDE	457×431×508	0,025÷0,150	810×840×2200	520

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



Рисунок 30. ProJet CP 3000

Технология MJM получения восковых моделей строится на 3D-принтерах с использованием специального модельного материала, в состав которого входит светочувствительная смола – фотополимер на акриловой основе, и литейный воск (более 50% по массе). Фотополимер является связующим элементом.



Рисунок 31. Литейные модели ProJet 3000СХР

Материал посредством многоструйной головки послойно наносится на рабочую платформу, отверждение каждого слоя производится за счет облучения ультрафиолетовой лампой. Принтеры ProJet CP 3000 (рис. 30) и ProJet CPX 3000 (рис. 31.) специально разработаны для выращивания восковых моделей для точного литья металлов в гипсо-керамические и оболочковые формы (рис. 32). Принтеры имеют два режима построения модели – «стандартный» с разрешением $328 \times 328 \times 700$ точек на дюйм и размерами зоны построения $298 \times 185 \times 203$ мм, и «высокоточный» (XHD – Xtreme High Definition) с разрешением $656 \times 656 \times 1600$ точек на дюйм на уменьшенной до $127 \times 178 \times 152$ мм зоне построения.

Особенностью данной технологии является наличие так называемых поддерживающих структур – 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.



Рисунок 32. Оболочковая форма и отливка корпуса турбины (чугун), полученные по восковой модели

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) $0,025 \div 0,05$ 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. 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).

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

(рис. 33) 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.

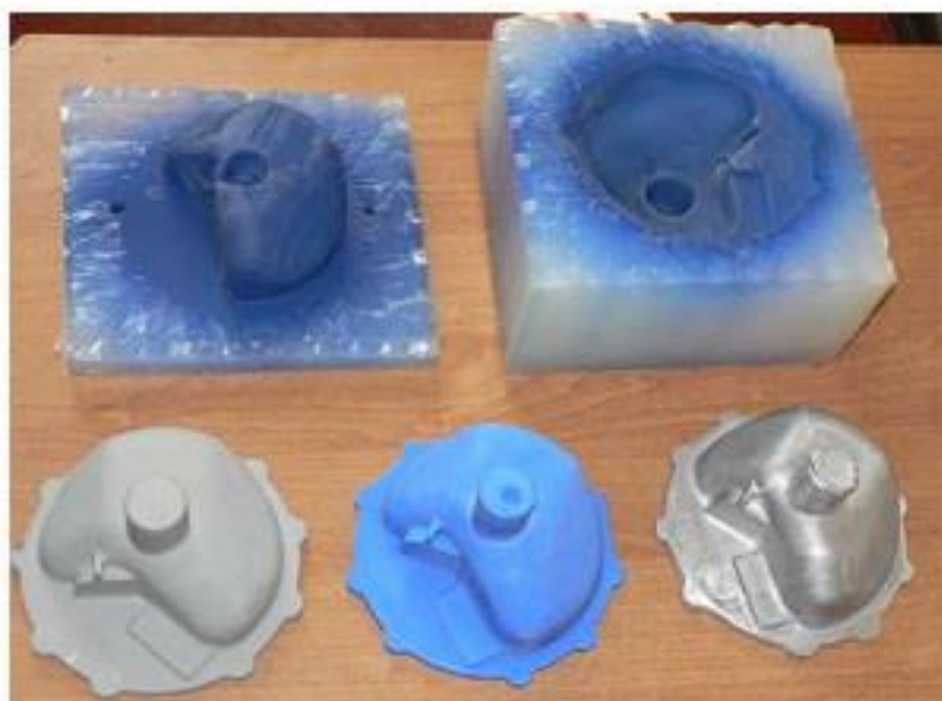


Рисунок 33. Силиконовая форма (вверху), мастер-модель (внизу слева), восковая модель (в середине), металлическая отливка (справа)

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 А и В, которые при смешении в определенной пропорции полимеризуются и образуют однородную

относительно твердую массу). Эластичные формы получают путем заливки мастер-модели силиконом в вакууме.



Таблица 3

Характеристики литейной машины МТТ 4/04

Габаритные размеры, мм	1930×1510×900
Макс.размеры формы, мм	750×900×750
Объем заливки, дм ³ /кг	2,2/2,0 или 5,5/6,0

Рисунок 34. Литейная машина МТТ

Мастер-модель располагают в обычной деревянной опоке, опоку помещают в вакуумную литейную машину (рис. 34), где предварительно в специальной емкости производят смешение компонентов А и В, 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 минут 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°С, второй – для выдержки форм, в котором поддерживается температура около 70°С; 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.

Обычная стойкость 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, характерной для авиационной, медицинской и приборостроительной отраслей. Широкий спектр как силиконов, так и полиуретановых смол позволяет изготавливать отливки с ударо- и теплостойкими свойствами, различной жесткости в разнообразной цветовой гамме. Современные предприятия, изготавливающие отливки по выплавляемым моделям, обычно имеют в составе технологического оборудования АФ-машину для выращивания мастер-моделей и машину для вакуумного литья в силиконовые формы.

Литье металлов в вакууме

Для изготовления металлических отливок в условиях научных исследований и опытного производства широкое применение имеют системы вакуумного литья цветных металлов. Ключевым звеном в таких системах, естественно, является литейная машина. Обычно, учитывая условия опытного производства, это компактные машины с объемом тигля 3÷20 л. Как правило, система вакуумного литья (рис. 35) 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.



Литейная машина



Прокалочная печь



Вакуумный миксер



Размывочная машина

Рисунок 35. Система вакуумного литья

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.



Рисунок 36. Вакуумная машина MPA 1000 (MTT Technologies) с объемом тигля 10 л для литья цветных металлов

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



Рисунок 37 – Машина SGA 3500

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 (МК-Technology, МТТ-Technologies (рис.36), 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 условия

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

В частности, фирма ProfiCast производит вакуумную машину SGA 3500 (рис. 32) с индукционным нагревом для литья конструкционных и нержавеющей сталей. Машина выполнена по схеме с опрокидывающимся (поворотным) тиглем объемом 3,5 л., оборудована сенсорным 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.

Машина «Cyclon» фирмы МК-Technology (рис. 38) предназначена для получения маршалитовых, электро-корундовых и т.д. форм (рис. 39), используемых при литье по выплавляемым моделям. Восковые или



Рисунок 38. Машина Cyclon

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 создании 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 500×500×500 мм, вес до 15 кг. Габариты машины 4600×1450×3750 мм.

Для ускорения процесса приготовления оболочковых форм используется



Рисунок 39. Технологический процесс изготовления форм

специальная сушильная машина – Booster (МК-Technology) (рис. 40), которая может быть легко интегрирована в существующую технологическую линию. Booster позволяет получать пригодные для заливки металла формы в течение одного рабочего дня. Максимальный размер оболочковой формы 800×800×1000 мм, габаритные размеры машины 1900×3500×1850 мм, масса 1600 кг. Автоклав МКА (МК-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.



Рисунок 40. Технологическая линия МК-Technology

Нагрев происходит так быстро, что воск не успевает расшириться и повредить оболочковую форму. Длительность рабочего цикла 12-20 мин.

Технологии синтеза песчаных литейных форм

Литейные формы – это отдельный и большой раздел АF-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 САD-моделью детали САD-модели технологической оснастки для литья детали (рис. 41). Для производства песчаных литейных форм используются две АF-технологии:

- послойное спекание плакированного песка лазерным лучом (фирма EOS);
- послойное нанесение связующего состава или Inkjet-технология (фирма ProMetal) (рис. 42).

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 прокалочную 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.

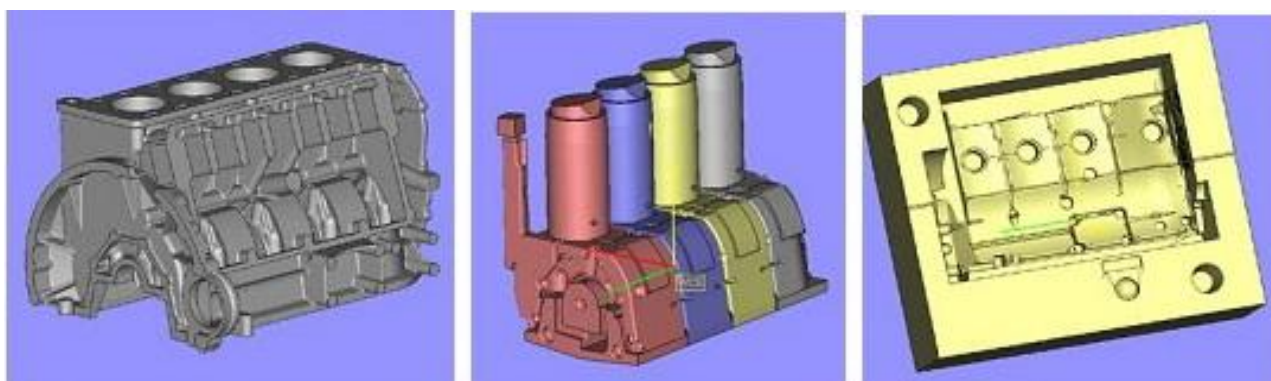


Рисунок 41. CAD-модели блока цилиндров и фрагментов песчаной формы



Рисунок 42. Выращенные фрагменты формы (ProMetal), форма в сборе и отливка блока (чугун)

В этом случае дополнительной термообработки формы не требуется.

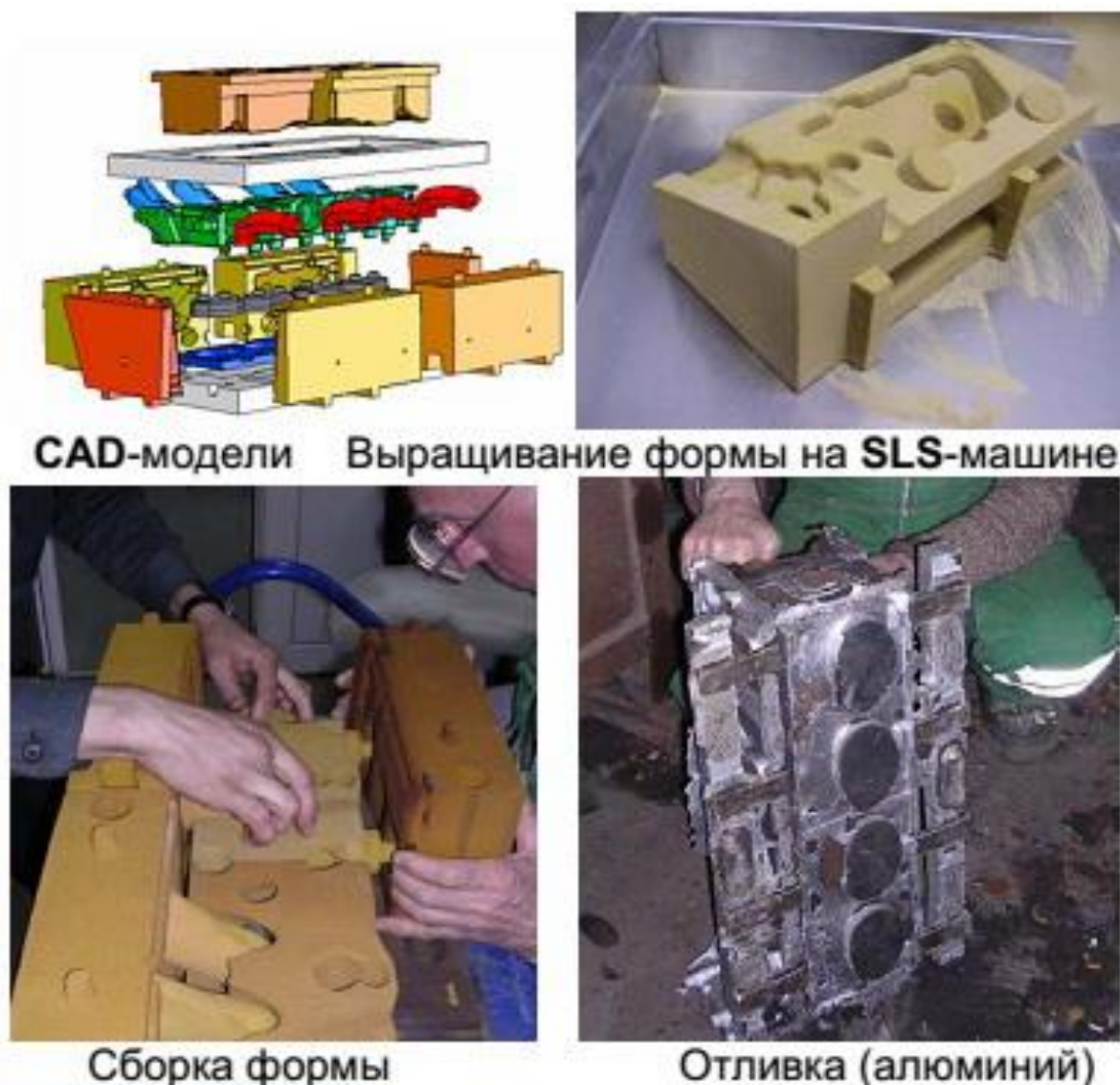


Рисунок 43. Технологический процесс изготовления отливки

Независимо от метода построения собственно формы, алгоритм действий конструктора-технолога практически одинаков. Коротко последовательность операций выглядит следующим образом. Создается CAD-модель изделия (рис.43); назначаются припуска на обрабатываемые поверхности; согласно рекомендациям технолога проектируется литниковая система, которая сочленяется с основной CAD-моделью, получают технологическую CAD-модель, модель масштабируют в соответствии с 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 CAD-модели блока цилиндров и фрагментов песчаной формы 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 (рис.44) 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 1500×750×700 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.

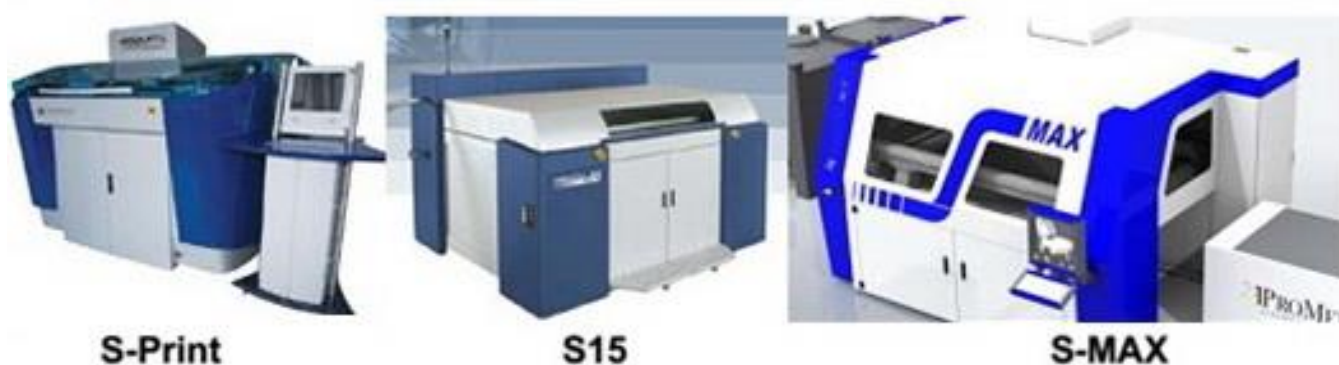


Рисунок 43. Машины ProMetal

Основным преимуществом машины является возможность строить целиком относительно габаритные формы и стержни. Производительность машины также является существенным преимуществом, в особенности для условий индустриального применения.

Основные характеристики машин ProMetal

	S-print	S15	S-MAX
Размеры зоны построения, мм	750×380×400	1500×750×700	1800×1000×700
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 ³ /ч	7500	15 000	59400÷108000
Габаритные размеры, мм	2820×2440×2160	3113×3354×2164	7000×3586×2860
Вес, кг (основной модуль)	2500	3500	6500

В машине EOS S 700 (рис. 45) используется SLS-технология. Она не столь быстрая, но более «деликатная», может строить филигранные фрагменты формы размерами до 1 мм. Рабочая зона построения 720×380×380 мм, шаг построения 0,2 мм; точность построения 0,3 мм (на длине 720 мм). Габаритные размеры 1420×1400×2150 мм. Для увеличения скорости работы в машине используется система с двумя лазерами. Машина отверждает до 2500 см³ песка в час (для сравнения: ProMetal – 7500 см³/ч).



Рисунок 44. Машина EOS S 700

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 (рис. 46), по сложности недоступные другим технологиям. Эти машины применяются там, где существуют заведомо повышенные требования к точности литья и чистоте поверхности отливок.



Рисунок 45. Песчаные формы и отливки (EOS)

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.

Технологии синтеза металлических изделий и форм.

Важное место в АF-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.

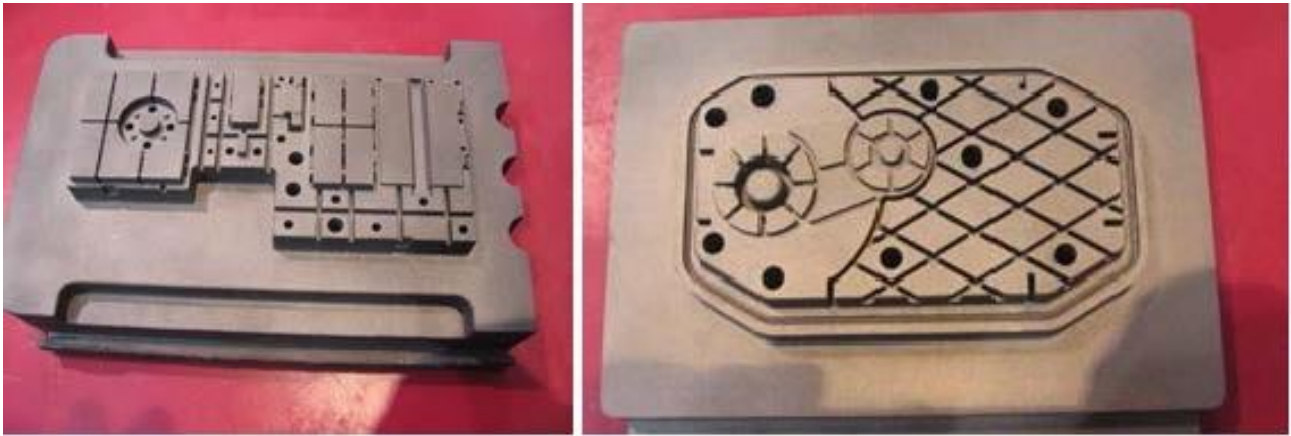


Рисунок 46. Синтезированные металлические вставки для литья деталей из пластмассы (3D Systems)

Применяют две технологии формирования модели при построении – лазерную (спекание, сплавление) и технологию Inkjet, согласно которой слой фиксируется с помощью специального состава, впрыскиваемого на поверхность порошкового металла через многоструйную подвижную головку (по типу 3D-принтера). Иногда, как например фирма 3D (рис. 47) 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 (рис.48) 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-

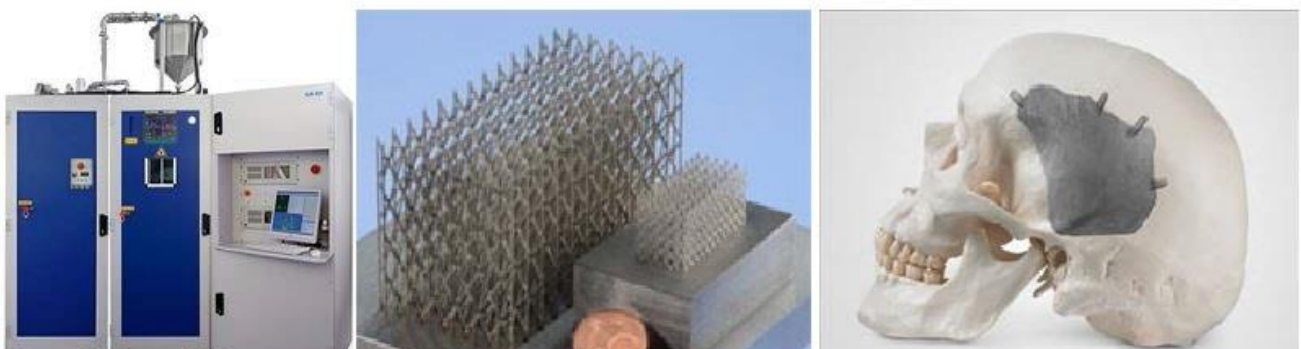


Рисунок 47. AF-машина Realiser SLM 250 и образцы изделий из титана



Рисунок 48. Машина EOS EOSINT M-270 и образцы выращенных металлических изделий

технологий для получения мелкодисперсных порошковых композиций металлов позволило выращивать полностью функциональные металлические детали с механическими свойствами литых деталей (рис. 49), изготовленных традиционными методами. Более того, АФ-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).

Аддитивные технологии порошковой металлургии

В данном разделе речь пойдет о новых технологиях с еще неустоявшейся терминологией, находящихся на стыке разных традиционных технологий, 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.

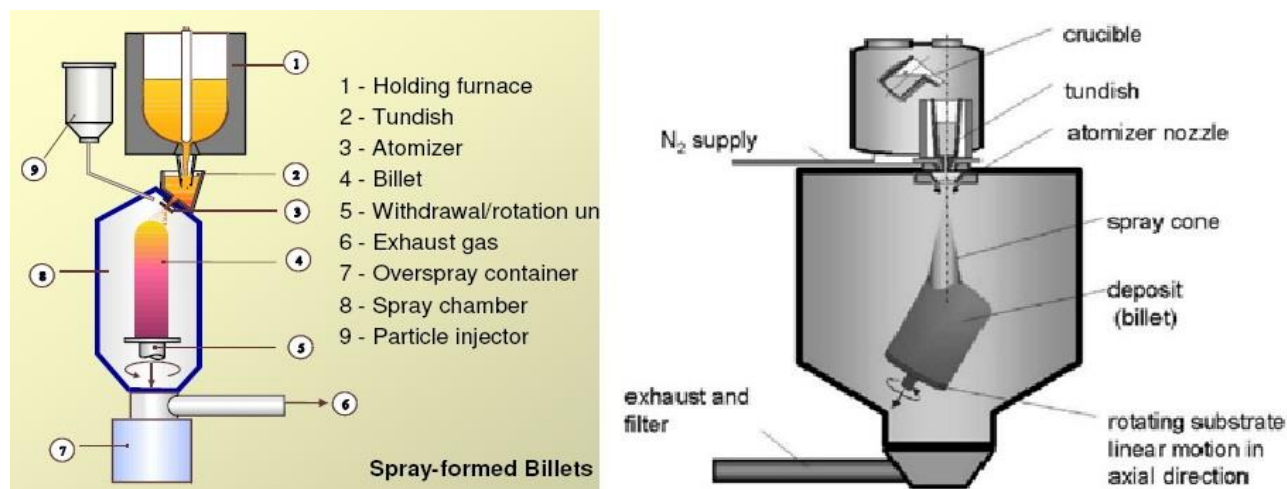


Рисунок 50. Схемы технологии Spray forming

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 (рис. 50) 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 $10\div 100$ мкм) осаждаются на подложку, формируя таким образом массив болванки.

В отличие от литой заготовки, полученной простым сливом металла в изложницу, болванка, изготовленная методом spray forming, имеет высокую однородность микро- и макроструктуры материала (рис. 51,52). 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 Mercedes-Benz. Данная технология успешно применяется для получения заготовок из сплавов, склонных к ликвации при

кристаллизации, в частности, медьсодержащих сплавов, использующихся для производства суперпроводников (CuSn), высокопрочных инструментов (CuMnNi, CuAlFe) для нефтедобывающей и горнорудной промышленности.

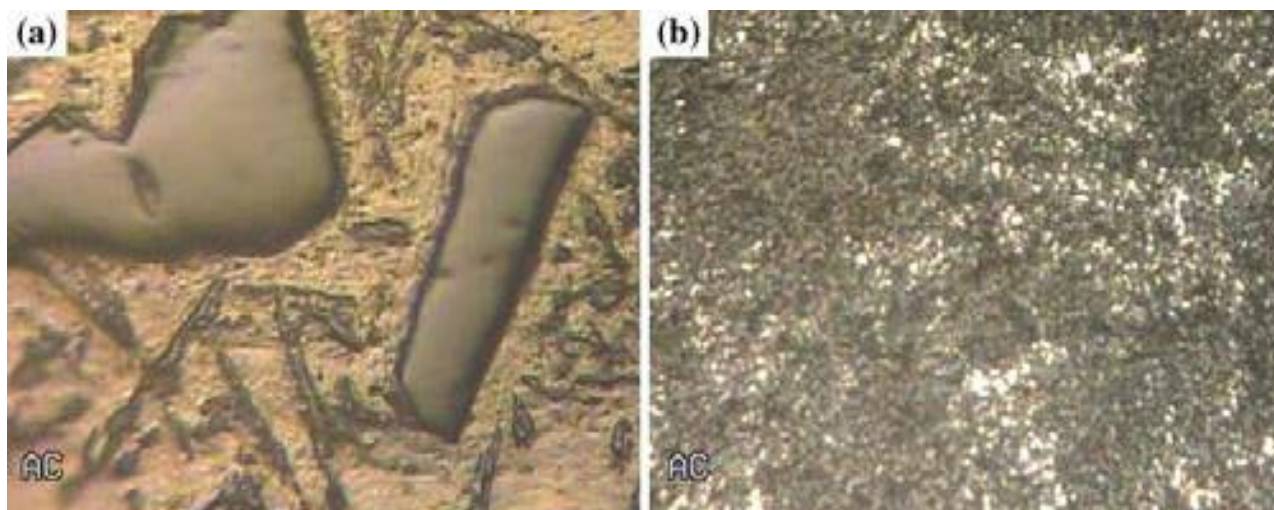


Рисунок 49. Микроструктура сплава Al+15% Si: a - отливка, b - spray forming (увеличение: $\times 400$)

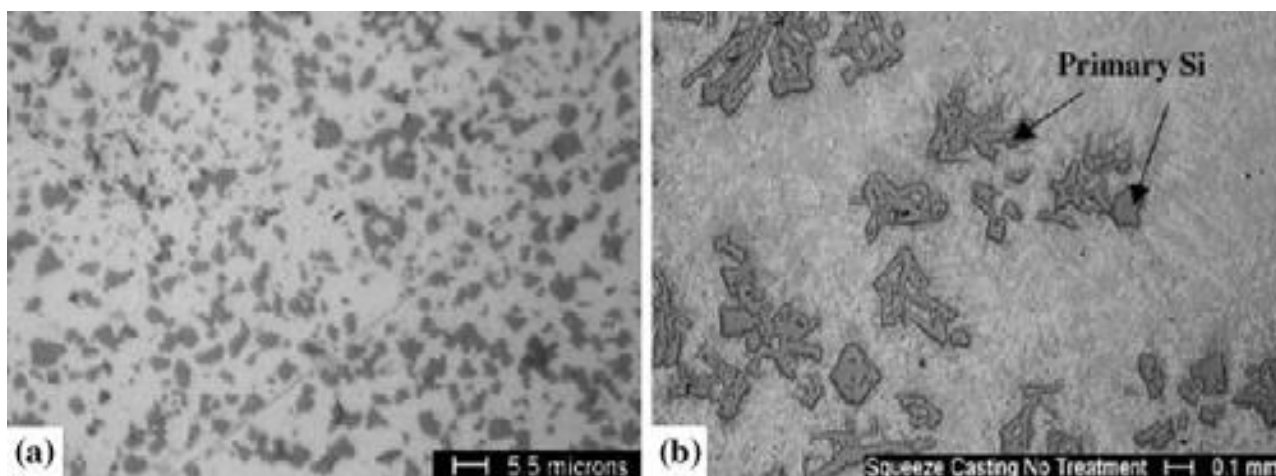


Рисунок 50. Распределение кремния в образце: a- spray forming; b- отливка+ковка, сплав Al + 25% Si + 0,89% Cu + 1% Ni + 1,84% Mg

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

относительно наличие микропор в структуре материала, появление которых связано с захватом молекул газа при атомизации и осаждении частичек металла и с

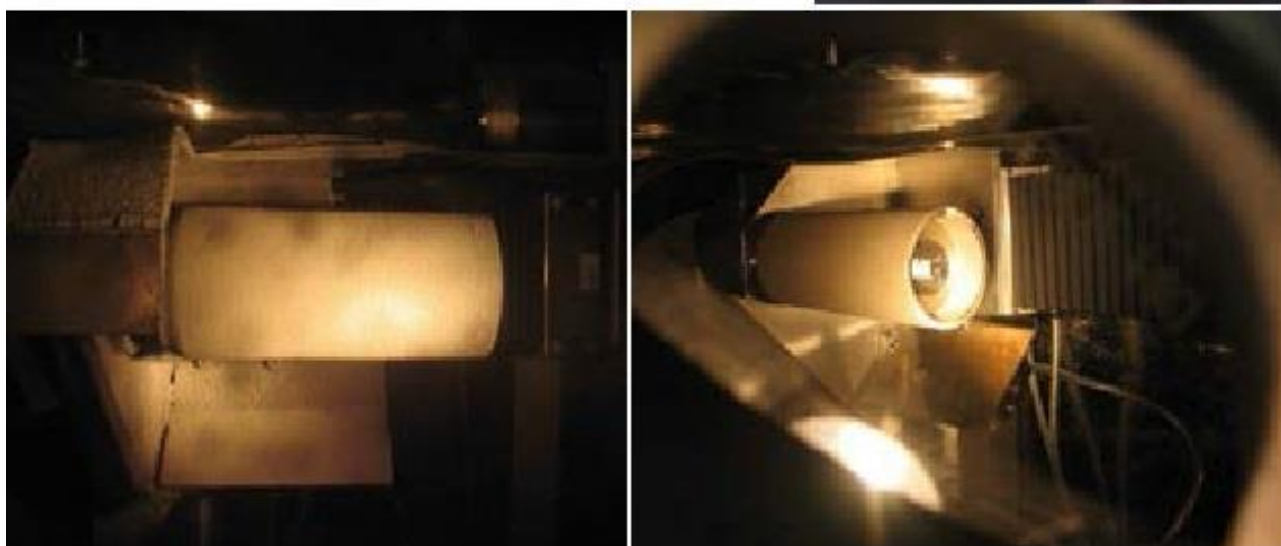
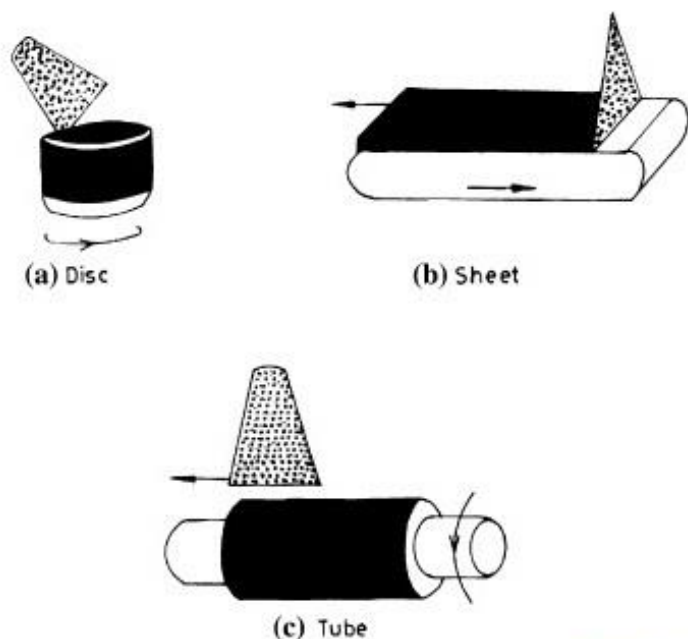


Рисунок 51. Цилиндрическая заготовка, полученная методом Spray forming «неплотным» спеканием частиц друг с другом при кристаллизации. Пористость металла устраняют посредством горячего изостатического прессования (HIP) и последующей обработки давлением – прокатки иликовки.

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» (рис. 53).

Технология spray 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 spray forming-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, США) является разработчиком нового способа изготовления инструментальной оснастки с использованием технологии spray forming. Машина RSP (рис. 54) 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.

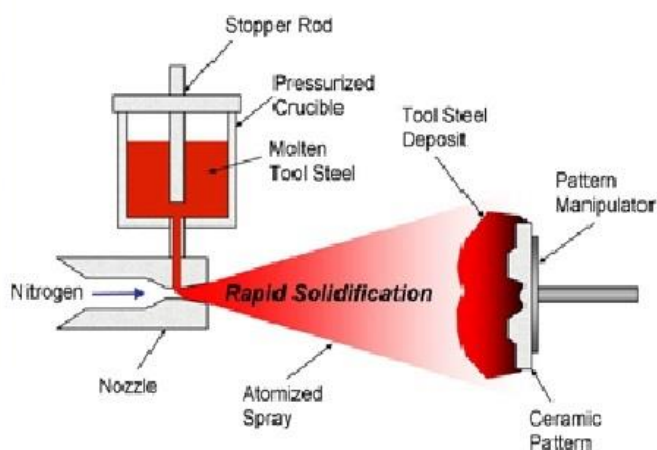


Рисунок 53. RSP-машина

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

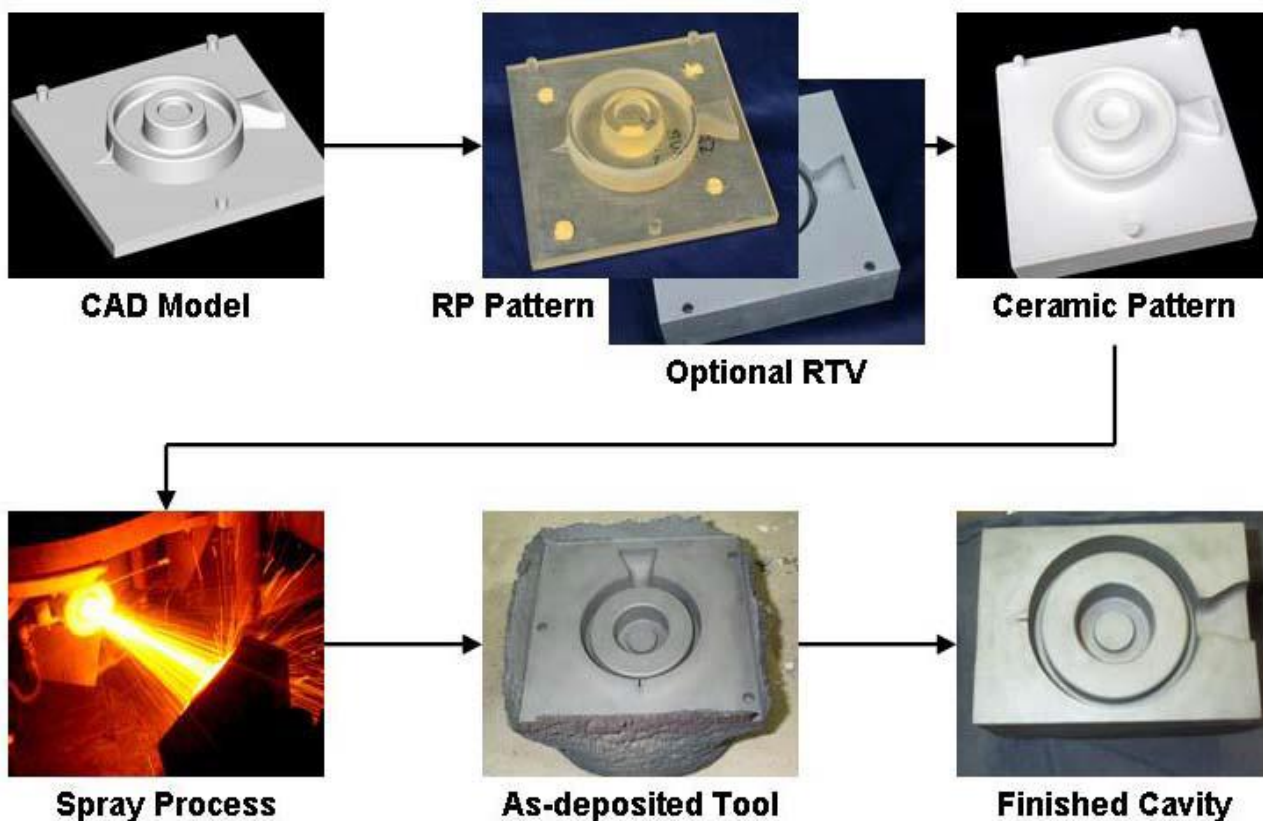


Рисунок 52. Технологический процесс изготовления формы

платформу, обеспечивает равномерное нанесение металла. После завершения процесса и остывания в течение полутора-двух часов керамическая модель извлекается из металлического «слепок» и производятся стандартные технологические операции: механо- и термообработка (рис. 55).

Машина RSP может изготавливать детали с максимальными размерами 180×180×100 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 (рис. 56). 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.



Рисунок 54. Биметаллический кокиль

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



Рисунок 55. Примеры деталей авиадвигателя, полученные с использованием технологии «Spray forming»

содержание лития, имеет улучшенную изотропию, экспериментально показано отсутствие проблем с растрескиванием отливки и макросегрегацией, которые имеют место при получении заготовки литьем. Получен сплав с содержанием лития 4% по весу, имеющий плотность $2,4 \text{ г/см}^3$ 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, они 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

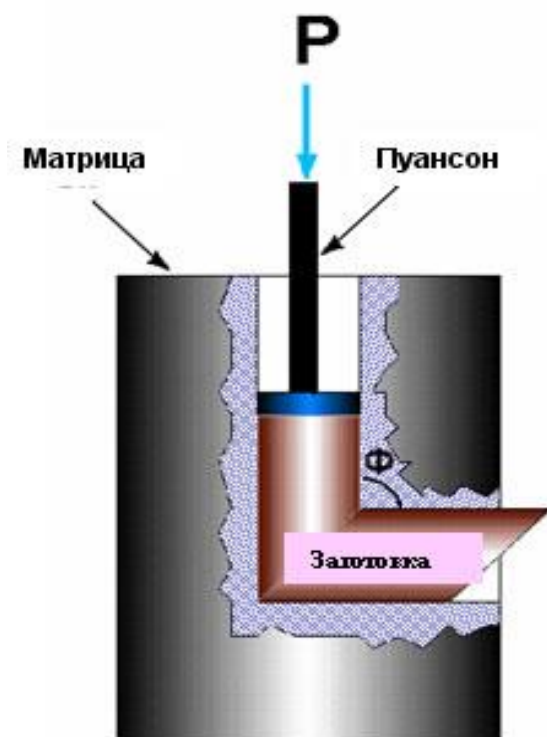
оксидами. Вариацией соотношения кремния и алюминия могут быть получены сплавы с заданным коэффициентом термического расширения (постоянным в широком диапазоне температур), которые имеют большие перспективы применения в микроволновых устройствах и пленочных радиаторах, используемых в телекоммуникационных системах, аэрокосмической и оборонной промышленности (рис. 57.)



Рисунок 56. Установка Spray forming Оксфордского университета, (до 80 кг по Al)

Европейскими лидерами в освоении технологий Spray forming являются компании Sandvik Osprey (Великобритания), 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, а также компания Sprayform Technologies International – совместное предприятие Pratt & Whitney и Howmet, разработавшая технологию получения прессформ (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 (рис.58.) 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 материалов, в частности для дальнейшего развития отечественной технологии ИПД – интенсивной пластической деформации. Известно, что

Рисунок 57. Схема процесса РКУП ИПД метод, например, равноканального углового прессования – РКУП (рис. 59), 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 которых 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



Рисунок 60. Hermiga 100/10 VI

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 АФ-машины для послойного синтеза.

Плавильно-распылительная машина Hermiga 100/10 VI (рис. 60) (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 - 2100×3200×2400 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 103 до 106 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 включает 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 тигеля 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 припой для электронной промышленности. В линейке оборудования Hermiga 100/10 VI 25 имеются как лабораторные атомайзеры, на

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



Рисунок 58. Установка компания Atomising Systems Ltd

Лабораторный атомайзер ALD VIGA1-B (ALD GmbH, Германия) (рис. 61) для получения порошков стали и сплавов предназначен 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.



Рисунок 62. Лабораторный атомайзер ALD VIGA1-B

Лабораторный атомайзер ALD EIGA (рис. 62) имеет, так же 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

электродов с распылением газом) прутки после предварительной плавки в форме электродов проходят индукционную плавку и распыляются без использования



Рисунок 59 – Лабораторный атомайзер ALD EIGA

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 (рис. 63) 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.

Компьютерная томография для измерений и контроля 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 позволяют оперативно исследовать проблемные места в отливке, объективно оценить степень их важности, провести вариантные 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 трехмерной 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 (рис. 64), имеющие в своем составе макро- и микрофокусные трубки и линейный и плоскочувствительный 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 (рис. 65).



Рисунок 60. Y.CT Modular и YXLON Compact

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 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.

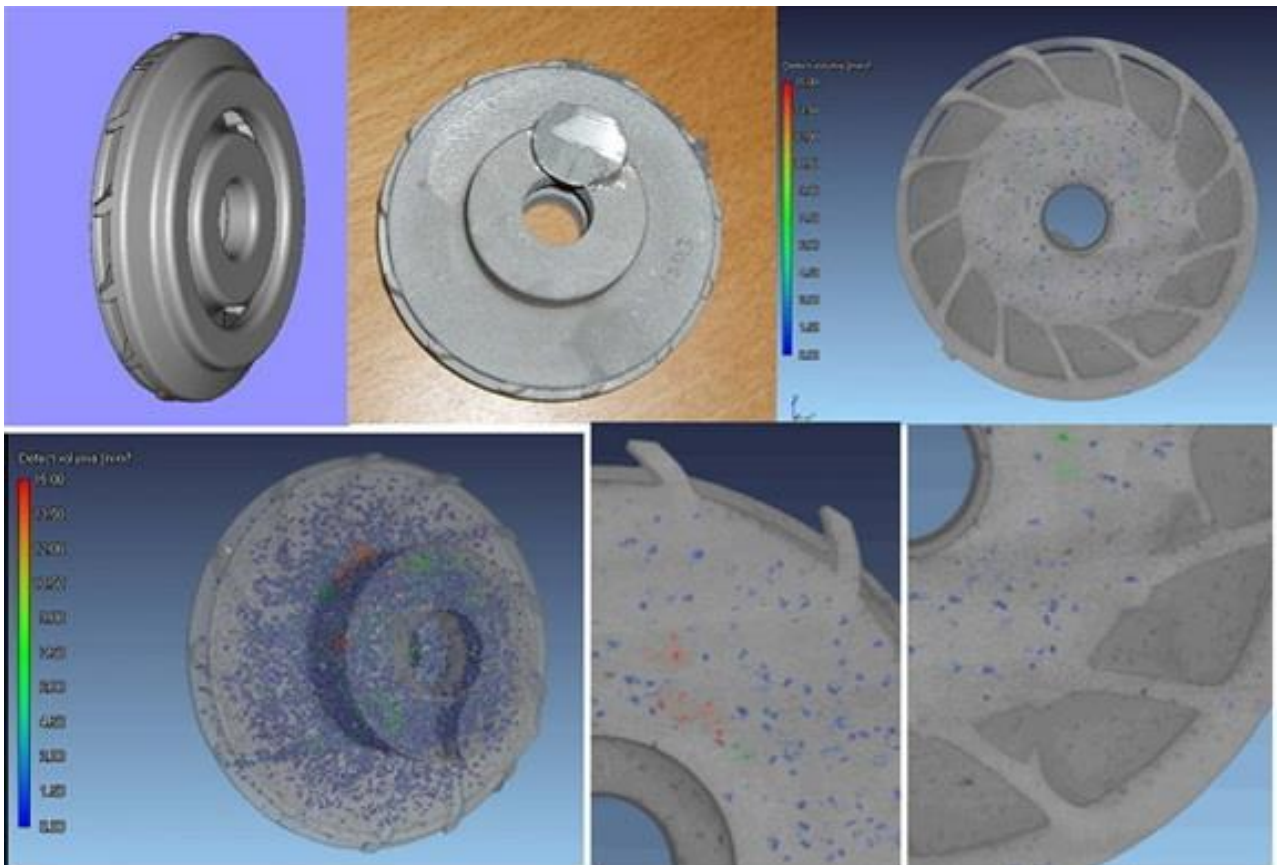


Рисунок 61. Инспекционный контроль и анализ качества литейных деталей: CAD-модель, отливка, полученная литьем по выжигаемым синтез-моделям, и результаты томорафических исследований (с указанием дефектных мест)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В издании 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 они 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.

Приведенные в настоящем пособии 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 структурировать в зависимости от конкретной решаемой задачи. Особенностью аддитивных технологий 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 компетенций может быть многократно усилена при разумном согласовании их действий в определенных целях для решения крупных научно-исследовательских задач. Специализация одних центров компетенций 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. David L. Bourella, Joseph J. Beaman, Jr.a, Ming C. Leub and David W. Rosenc. A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead. RapidTech 2009, www.rapidtech.itu.edu.tr.
2. Beaman J. J. Solid Freeform Fabrication: An Historical Perspective. The University of Texas. Austin, Texas.
3. Greul M. Metal and ceramic prototypes using the Multiphase Jet Solidification (MJS) process Metallische und keramische Prototypen mit dem Multiphase jet Solidification (MJS) Verfahren. Fraunhofer IFAM // Conference on Rapid Tooling & Manufacturing, 1997.
4. Techel A. et al. Laser Additive Manufacturing of Turbine Components, Precisely and Repeatable. Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology (IWS), интернет-издание Laser Institute of America. Доступ свобод.: <http://www.lia.org/blog/category/laser-insights-2/laser-additive-manufacturing>
5. Sabina L. Campanelli et. al. Capabilities and Performances of the Selective Laser Melting Process. Polytechnic of Bari, Department of Management and Mechanical Engineering, Viale Japigia, 182 Italy [Электронный ресурс], Режим доступа: <http://cdn.intechweb.org/pdfs/12285.pdf>
6. Безобразов Ю.А. и др. Анализ структуры образцов, полученных DMLS- и SLM-методами быстрого прототипирования. СПбГПУ.
7. Шабров Н.Н. Реальные достижения виртуальной реальности // Rational Enterprise Management. – 2011. – № 2. – С. 46-48.
8. 3-D Printing Manufacturing Process is Here; Independent global forum for the Unmanned Aircraft Systems community, UAS Vision [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.uasvision.com>.
9. Khoshnevis B. et al. Metallic part fabrication using Selective Inhibition Sintering (SIS). Department of Industrial and Systems Engineering University of South California, Los Angeles, CA 90089, USA.
10. 5-akselinen pystykarainen työstökeskus MATSUURA MAM72-35V on uudistunut. 18.12.2012. Доступ свобод.: <http://www.makrum.fi/blog/matsuura-uudistanut-mam72-35v-pystykaraisentyostokeskuksen/>
11. Louvis E. et. al. Selective laser melting of aluminium components. Journal of Materials Processing Technology. Volume 211, Issue 2, 1 February 2011, Pages 275–284. Department of Engineering, The University of Liverpool, Liverpool L69 3GH, United Kingdom.
12. Yasa E. et. al. The investigation of the influence of laser re-melting on density, surface quality and microstructure of selective laser melting parts // Rapid Prototyping Journal. – 2011. – Vol. 17. – Iss: 5. – P. 312-327.
13. Yasa E., Kruth J. Application of laser re-melting on Selective laser melting parts. Catholic University of Leuven, Dept. of Mech. Eng, Heverlee, Belgium. Advances in Production Engineering & Management 6 (2011) 4. P. 259-270, Scientific paper [Электронный ресурс]. URL: <https://lirias.kuleuven.be>.
14. Beyer E. New Industrial Systems & Concepts for Highest Laser Cladding Efficiency. Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik. MAY 6, 2011 in LASER CLADDING, LASER MANUFACTURING [Электронный ресурс] режим доступа <http://www.lia.org/blog/2011/05/high-performancelaser-cladding/>

15. Dutta B. et. al. Additive Manufacturing by Direct Metal Deposition *ADVANCED MATERIALS & PROCESSES*. MAY 2011. P. 33-36
16. Robbie Adams, ION FUSION FORMATION, Pat. US 6,680,456 B2, Jan. 20, 2004.
17. Beyer E. New Industrial Systems & Concepts for Highest Laser Cladding Efficiency. Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik. MAY 6, 2011 in *LASER CLADDING, LASER MANUFACTURING* [Электронный ресурс] режим доступа <http://www.lia.org/blog/2011/05/high-performancelaser-cladding/205>
18. Осокин Е. Н. Процессы порошковой металлургии. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: курс лекций / Е. Н. Осокин, О. А. Артемьева. – Электрон. дан. (5 Мб). – Красноярск: ИПК СФУ, 2008.
19. Hohmann M., Brooks G., Spiegelhauer C. Production methods and applications for high-quality metal powders and sprayformed products. *Produktionsmethoden und Anwendungen für qualitativ hochwertige Metallpulver und spruhkompaktierte Halbzeuge*. Stahl und Eisen. – 2005.
20. Tsantrizos P. G. et. al. Method of production of metal and ceramic powders by plasma atomization. Pat. US № 5707419, 13.01.1998.
21. Интернет-сайт компании Raymor. URL: www.raymor.com.
22. Boulos M. Plasma power can make better powders. *Metal Powder Report*. 2004. – Vol. 59. – Issue 5. – P. 16-21.
23. Donachie M.J., Donachie S. *Superalloys: A Technical Guide*, 2 nd Ed. – ASM International, 2002. – 438 p.
24. Fngelo H. C., Subramanian R. *Powder Metalurge: Science, technology and application*. – New Dehli, 2009.
25. Ahsan M.N. et. al. A comparatine study of laser direct metal deposition characteristics using gas and plasma-atomized Ti-6Al-4V powders // *Materials Science and Engineering*. – 2011. – P. 7648-7657.
26. Ahsan M.N. et. al. A comparison of laser additive manufacturing using gas and plasma-atomized Ti-6Al-4V powders // *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping*. – London: Taylor & Francis Group, 2012.
27. Интернет-источник: <http://foundrymag.com/feature/new-tooling-alloymolds-and-dies-advancing-market>
28. Компания НЕТРАМ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.netramm.com>.
29. Дорошенко В.А. Модульные производственно-технологические комплексы для мелко- и среднесерийного многономенклатурного производства / В.А. Дорошенко, А.И. Чудайкин, В.А. Юдин // *Литейное производство*. – 2012. – №2.
30. Additive Manufacturing Consortium [Электронный ресурс]. <http://ewi.org/additive-manufacturing-consortium/206>
31. UK Government offers investment in AM. TCT additive manufacturing and professional 3D printing. October 22, 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tctmagazine.com/articles/uk-government-offersinvestment-in-am/>
32. UAV fully fabricated by additive layer manufacturing. 27 August 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.greencarcongress.com/2012/08/sulsa-20120827.html>
33. Arcam Q10 - Changing the scene for implant manufacturing [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.arcam.com/technology/products/arcam-q10/>
34. Europe's Rosetta Spacecraft Makes Historic Arrival at Comet. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.space.com/26740-rosettaspacescraft-comet-arrival.html>

35. Massive 3D Printer Under Development In China [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://3dprinterplans.info/tag/nanfang-ventilator-co/>
36. China developing world's largest 3D printer, prints 6m metal parts in one piece [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.3ders.org/articles/20140207-china-developing-world-largest-3d-printer--prints-6mmetal-parts-in-one-piece.html>
37. Wohlers Report 2012. Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report, ISBN 0-9754429-8-8, 2012. 286 p.
38. Kovaleva I.O., Kovalev O.B. Simulation of the acceleration mechanism by light-propulsion for the powder particles at laser direct material deposition. Khristianovich's Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia/ Optics and Laser Technology, Volume 44, Issue 3. P. 714-725.
39. Woodcock J. 3D printing, government and police. TCT Magazin, Volume 20/Ussue 6. Nov.12.2012. 5 p.
40. World's First 3D Printed Metal Gun. [Электронный ресурс] режим доступа: <https://blog.solidconcepts.com/industry-highlights/worlds-first-3dprinted-metal-gun/>

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	1
Технология быстрого прототипирования	5
Технологии и установки для послойного синтеза	9
Установка ThermoJet (Multi-Jet Modelig или MJM-процесс).....	9
Установка Viper si 2, SLA 3500/5000/7000 (Stereo Lithography Apparatus, SLA-процесс) .	10
Установка послойного лазерного спекания порошковых материалов Vanguard (Selective Laser Sintering, SLS-процесс).....	11
Технология литья по 3D моделям.	15
Точное вакуумное литье по выплавляемым моделям	15
Литье в силиконовые формы	18
Практика получения отливок	20
с использованием аддитивных технологий.....	20
Литье полиуретановых смол в силиконовые формы.....	38
Литье металлов в вакууме	41
Технологии синтеза песчаных литейных форм.....	46
Технологии синтеза металлических изделий и форм.....	51
Аддитивные технологии порошковой металлургии	53
Компьютерная томография для измерений и контроля изделий.....	68
Заключение.....	72
Литература	74

Учебное издание

**ТЕХНОЛОГИЯ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ
В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

Учебное пособие

Главный редактор *Д. Мухамадеева*
Технический редактор *Т. Хамадеева*
Корректор *З. Сафаралеева*

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре
Набережночелнинского института
Казанского (Приволжского) федерального университета

Подписано в печать 27.06.2017.
Формат 60x84/16. Печать ризографическая.
Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman».
Усл. п. л. 4,6. Уч.-изд. л. 2,4.
Тираж 100 экз. Заказ № 827

423810, г. Набережные Челны, Новый город, проспект Мира, 68/19
тел./факс (8552) 39-65-99 e-mail: ic-nchi-kpfu@mail.ru