

Опыт использования технологий быстрого прототипирования для литья корпусных деталей в песчаные синтез-формы

(канд. техн. наук М. Зленко, инж-ры. В. Довбыш и В.Кравченко, ГНЦ РФ НАМИ)

Для достижения конкурентоспособности в современном автостроении важнейшую роль играет скорость изготовления и доводки опытных образцов автомобилей, двигателей, трансмиссии и других агрегатов автомобилей.

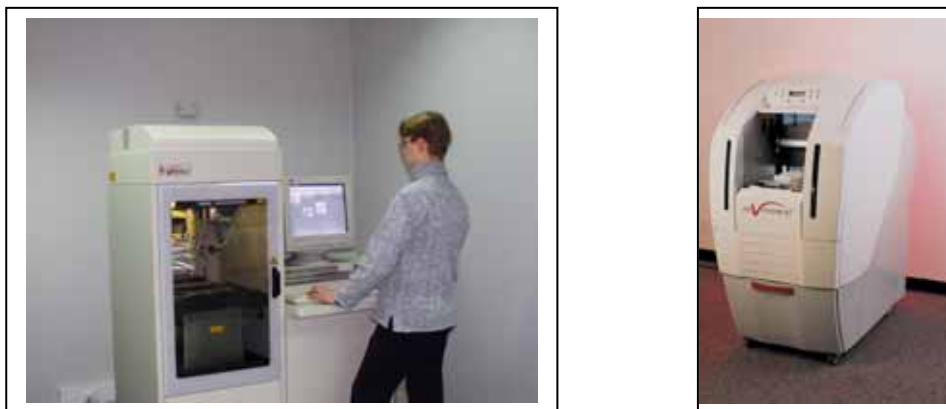
Революционным шагом в развитии современного машиностроения явилось освоение технологии быстрого прототипирования – **Rapid Prototyping (RP)**, в основе которого лежит создание компьютерной трехмерной модели, т. е. создание **CAD**-данных с последующей материализацией этих данных на технологическом оборудовании посредством **CAM**-технологий (**Computer-Aided Manufacturing**). **Фундаментом новых технологий является цифровая запись полной информации об объекте.** В настоящее время практически все западные автомобильные фирмы перешли на широкое промышленное применение **RP**-технологий, однако наиболее динамично это направление осваивается и развивается в области создания опытных образцов, поскольку использование **RP**-технологии сокращает период от разработки изделия до постановки его на производство **в несколько раз**, что дает **определяющее преимущество** в конкурентной борьбе, несмотря на относительно высокую стоимость специализированного оборудования.

В нашей стране и, в частности в отечественной автомобильной отрасли, **RP**-технологии также получили развитие. Наиболее известной из них является **SLA**-технология (стереолитография), суть которой заключается в послойном «выращивании» физической модели из жидкого фотополимера, отверждаемого лазерным лучом (рис. 1). Фотополимеризация (не только лазерным лучом) является до сих пор наиболее распространенной среди технологий быстрого прототипирования. Это обусловлено, во-первых, высокой точностью построения моделей, и, во-вторых, многофункциональностью моделей. Они могут быть использованы и как дизайн-макеты, и как модели для контрольных сборок, и как мастер-модели, и как «выжигаемые» модели для литья в оболочковые формы, и как формовочная модель для литья в песчаные формы, и как функциональные прототипы (т. е. способные выдержать функциональные испытания).



Рис. 1 Стереолитографическая модель головки цилиндров

Широкое распространение стереолитографические модели имеют в производстве малых серий пластмассовых изделий и используются как мастер-модели для изготовления силиконовых форм. Кроме того, **SLA** и другие установки (рис. 2), использующие принцип послойного отверждения жидкого фотополимера, имеют достаточно широкий типоразмерный ряд и производятся различными фирмами в широком ценовом диапазоне.



Машины “Viper” и “InVision”

Рис. 2 Прототипирующие машины фирмы 3D Systems

Менее известной у нас в стране является **SLS**-технология (Selective Laser Sintering, **SLS**-процесс). Это объясняется достаточно высокой ценой на SLS-машины (в основном более 400 000 долларов США). Весьма мало и информации о практическом опыте использования **SLS**-технологии в автомобильной промышленности. Данная статья призвана устранить в определенной мере этот недостаток.

Суть **SLS**-процесса состоит в послойном спекании порошковых материалов. Здесь, 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, «считанной» с трехмерной CAD-модели. В качестве материалов используются *полиамид*, *полистирол*, плакированный литейный песок и некоторые металлы. Наиболее авторитетными фирмами-производителями **SLS**-машин являются компании **3D Systems** (США) и **EOS** (Германия). Изображенная на рисунке 3 машина **Vanguard (3D Systems)** является универсальной с точки зрения



Рис. 3 **SLS**-машина Vanguard фирмы 3D Systems

применяемых материалов. В отличие от аналогов (например, машины фирмы **EOS** специализированы на работу с отдельными материалами) эта установка работает со всеми известными порошковыми материалами.

Одним из важнейших преимуществ **SLS**-процесса перед другими технологиями послойного синтеза моделей является отсутствие так называемых поддержек при построении модели. В **SLA**-процессе при построении нависающих элементов детали используются специальные поддержки (выращиваются одновременно с основной моделью и удаляются вручную в процессе пост-обработки), предохраняющие свежестроенные тонкие слои модели от обрушения в начальный момент построения. В **SLS**-процессе 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.

Шаг построения модели зависит в основном от применяемого материала и варьирует от 0,1 до 0,25 мм. Из-за физических особенностей материала **SLS**-модели имеют большую шероховатость, по сравнению со стереолитографическими моделями, а в следствие большего шага построения и несколько меньшую точность построения. Однако ее вполне достаточно для решения большинства машиностроительных задач.

Полиамидные модели могут быть использованы в качестве:

- дизайн-макетов;
- формовочных моделей (например, как альтернатива традиционной деревянной модели);
- функционального прототипа (например, детали обшивки салона или приборной панели могут быть выращены, окрашены в нужный цвет, установлены на автомобиль для проведения функциональных испытаний).

На рис. 4 показан пример использования полиамидной модели в качестве формовочной модели для изготовления чугунных отливок распределительного вала.

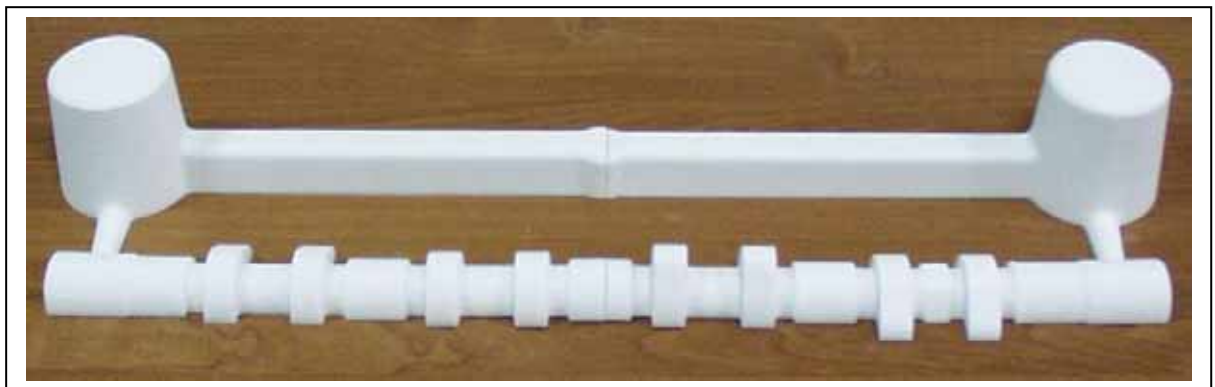


Рис. 4 Полиамидная модель распределительного вала с элементами литниковой системы

Порошковый полистирол – уникальный материал для получения выжигаемых (газифицируемых) моделей (рис. 5, 6). Используя технологию литья в оболочковые формы, могут быть получены качественные отливки практически любой сложности.

Работа с полистирольными моделями требует известной аккуратности в связи с относительной хрупкостью модели, непосредственно извлеченной из машины. Для придания модели большей прочности ее пропитывают парафином. В остальном же технология получения собственно отливки мало чем отличается от обычной технологии литья по выплавляемым (в данном случае «выжигаемым» моделям) и предполагает использование тех же формовочных материалов и того же оборудования.

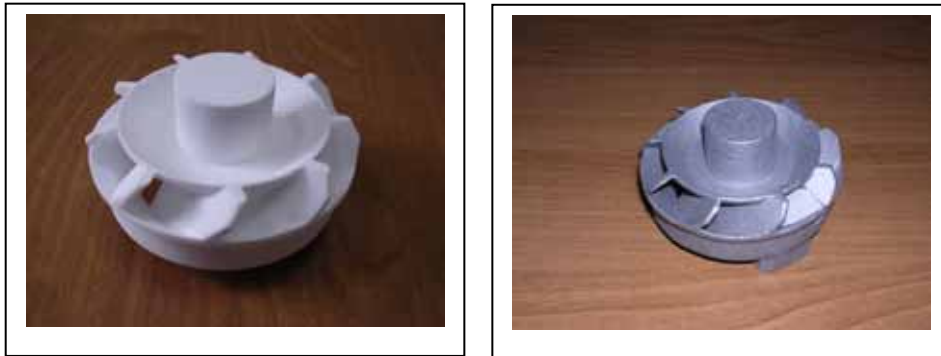


Рис. 5 Полистирольная модель и отливка крыльчатки



Рис. 6 Отливка корпуса компрессора (турбокомпрессора) после удаления формовочной смеси

Указанные технологии широко используются в мировом автостроении, особенно при создании опытных образцов. Важнейшим преимуществом применения **RP**-технологий в литейном производстве является возможность получения отливок без необходимости изготовления деревянной оснастки, что позволяет значительно (в прямом смысле *на порядок*) сократить сроки изготовления и доводки опытных образцов. Именно для изготовления опытных образцов применение **RP**-технологий оказываются наиболее рациональным, поскольку в подавляющем большинстве случаев первый, пилотный образец – будь то блок цилиндров или корпус турбокомпрессора, картер сцепления или заднего моста, настолько значительно отличается от конечного серийного образца, что переделка литейной оснастки, изготовленной для литья пилотного образца зачастую либо невозможна, либо сопоставима по затратам с изготовлением новой оснастки. Таким образом, эта – первая оснастка практически всегда *теряемая*. Теряется и время на ее изготовление. Поэтому, несмотря на относительно высокую стоимость **RP**-технологий, временной фактор оказывается решающим и практически все опытные образцы автомобильных изделий в настоящее время изготавливаются посредством **RP**-технологий.

Опыт использования полиамидных и полистирольных моделей в зарубежной автомобильной промышленности достаточно обширен. Чего нельзя сказать о работе с литейным песком и синтезированными песчаными формами. Это направление **SLS**-технологий до сих пор является малоизученным и малоосвоенным в мировой практике. Наибольших успехов здесь достигли фирмы-пользователи **RP**-технологиями в США и всего несколько фирм в Европе. Причем нюансы работы с песком практически нигде не публикуются и являются охраняемыми знаниями, подпадающими под понятие «ноу-хау».

Работа с песком привлекательна по нескольким причинам. Во-первых, литьем в песок можно получить отливки деталей, которые весьма затруднительно получить другим способом. Это касается в первую очередь относительно габаритных деталей, таких как, например, головки и блоки цилиндров. Во-вторых, это (потенциально) дешевле. Далеко не всегда получение отливок по выплавляемым и выжигаемым моделям оказывается удачным с первой попытки. Стоимость изготовления собственно выжигаемой модели, например, головки цилиндров достигает 7-10 тыс. евро (высока стоимость материала модели: 100-200 евро за 1 кг). Плюс к этому – стоимость формовочной смеси 2-2,5 евро за 1 кг (на формовку головки цилиндров требуется 20-30 кг). Плюс стоимость собственно литья (зависит от материала и особенностей литейной технологии). Таким образом, стоимость одной отливки (в Европе, при удачном стечении обстоятельств) составляет в среднем 10-15 тыс. евро. Риск же получения некондиционной отливки (а следовательно и риск потери дорогостоящей модели) при литье габаритных и сложных деталей весьма велик.

В случае использования песка стоимость модели, в данном случае литейной формы, меньше из-за меньшей стоимости материала – 1,5 -2,5 евро за 1 кг. Кроме того, в процессе доводки технологии литья конкретной детали можно достаточно оперативно изменить конструкцию отдельного фрагмента формы в проблемном месте, сохраняя конструкцию других (не проблемных) фрагментов формы.

В-третьих, литье в песок само по себе более надежное, поскольку песчаная форма собирается из выращенных фрагментов и сборка ее может быть тщательно проконтролирована, в отличие, например, от формовки в гипсовые смеси, где возможно неконтролируемое, случайное образование пустот при заливке смеси.

Тем не менее, как уже было сказано, **SLS**-технология применительно к песку не получила должного распространения. Одной из причин такого положения на наш взгляд является то обстоятельство, что при использовании данной технологии требуются специфические знания по конструированию не только собственно изделия, например, головки цилиндров, но и самой песчаной формы, причем знания принципиально отличные от знаний «традиционного» технолога-литейщика. Необходимы знания технологических нюансов, связанных с конкретной **SLS**-технологией, конкретной **RP**-машиной. Обычно конструктор проектирует изделие, ориентируясь на общие знания литейного производства. Отсутствие же опыта работы с **RP**-машинами вообще и с **SLS**-технологиями в частности обуславливает необходимость привлечения к данной работе весьма дорогостоящих зарубежных технологов, специализирующихся в

этой области. Второй причиной здесь является то, что накопление первоначального опыта и знаний в данной области сопряжено с большими издержками, которые могут себе позволить лишь редкие специализированные на это направление фирмы (например, фирма **ACTec Rapid Casting**, Германия). Обмена же опытом между специалистами разных фирм в связи с высокой стоимостью этих знаний практически нет. Весь обмен опытом ограничивается демонстрацией удачно выполненных отливок и общими сведениями по применению литейного песка в **SLS**-технологии.

Идеальной в этом смысле является ситуация при которой конструктор-разработчик изделия и технолог, работающий с **RP**-машиной, создают вместе и само изделие, и оснастку для его изготовления. Организационная структура Центра быстрого прототипирования НАМИ имеет целью приближение к этому идеалу. Собственно конструкторское и технологическое подразделения Центра имеют тесную взаимосвязь, и разработка конструкции детали ведется с учетом конкретной технологии ее изготовления. При разработке опытного изделия это вполне допустимо и рационально, поскольку заказчика на этом этапе в первую очередь интересует вопрос **получения** кондиционного изделия, а не способ его получения. Безусловно, изделия второй, третьей и последующих серий могут потребовать дополнительной технологической доработки под специфические требования конкретного (уже серийного) производства. Например, **RP**-технология не требует обязательного наличия литейных радиусов и уклонов (они вообще могут быть отрицательными) и такую отливку, строго говоря, нельзя повторить традиционными методами литья. Но эти упрощения не носят критический характер, и все технологические поправки могут быть внесены при создании «полноценной» модель последующих серий после неизбежных в ходе доводки коррекций конструкции.

Ниже на примере головки цилиндров двигателя тезисно приведены этапы изготовления отливки детали в песчаную форму с использованием **SLS**-технологии.

После завершения проектирования детали (рис. 7) начинается процесс разработки литейной формы.

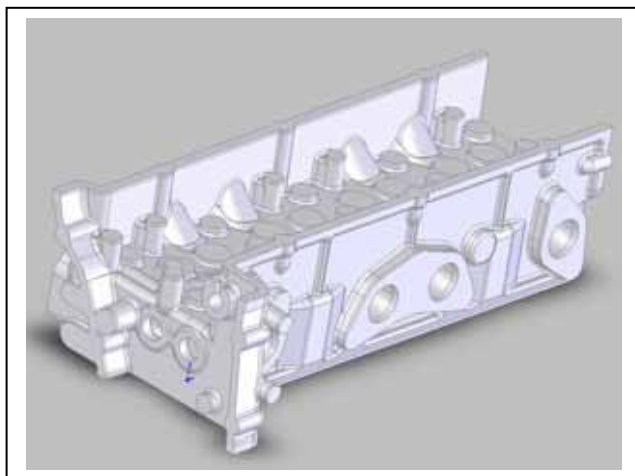


Рис. 7 Исходная **CAD**-модель головки цилиндров

Разрабатывается литниковая система, устанавливаются выпара, грязеуловители, прибыли и т. д. (рис. 8). Отдельно изготавливаются «холодильники» для установки в камеры сгорания, рис. 9.

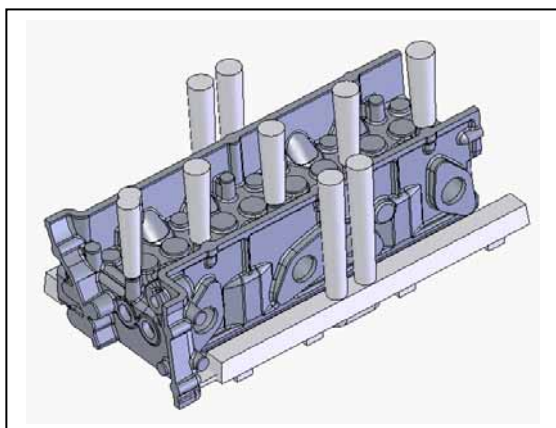


Рис. 8. Проектирование литниковой системы

С учетом размеров рабочей зоны построения RP-машины производится разбиение будущей формы на части и создаются внутренние (стержни) и внешние формообразующие (рис. 10).



Рис. 9. Стереолитографическая модель холодильника и его отливка.

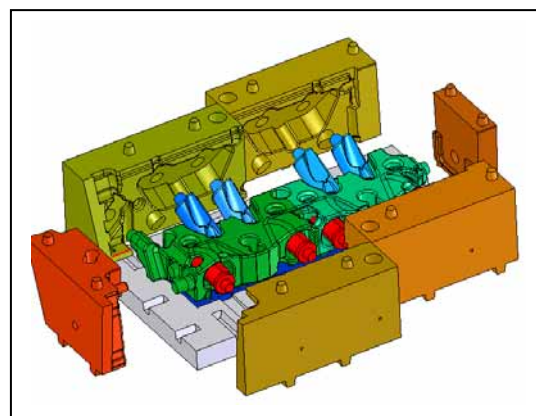
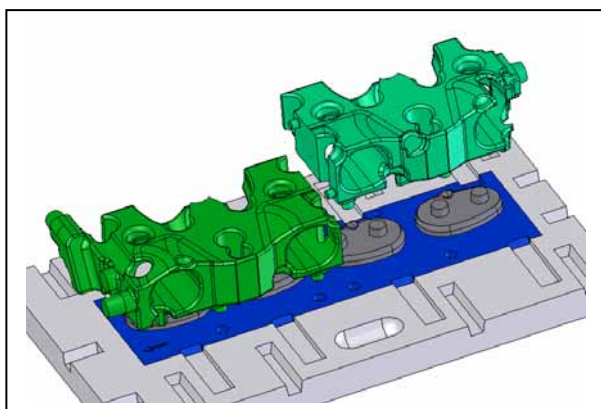


Рис. 10 Проектирование стержней водяной рубашки, каналов и внешних формообразующих.

Методами компьютерного моделирования проверяется собираемость формы. Окончательный сборочный файл формы выглядит, как показано на рис. 11.

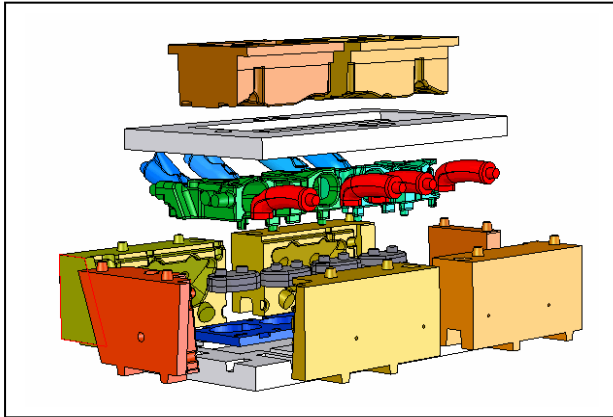


Рис. 11 CAD-модель формы в сборе

Затем производится выращивание отдельных фрагментов песчаной формы, рис. 12.

Собственно, здесь и заканчивается технология быстрого прототипирования. Процесс сборки формы, установка в опоку и заливки формы такой же, как и в работе с обычными песчаными формами, рис. 13.



Рис. 12 Процесс спекания песка, получение фрагментов формы



Рис. 13 Сборка формы и подготовка к заливке металла

Апофеоз всей работы – заливка металла. Так же, как и при работе с обычными песчаными формами здесь требуется определенный опыт и использование технологических приемов для удаления воздуха и газов, предотвращения «вскипания», и т. д. На рис. 14, 15 показана первая кондиционная отливка головки цилиндров, полученная в рамках выполнения совместного проекта с ОАО «Волжские моторы» (Ульяновск).



Рис. 9.13 Остывание формы и извлечение отливки



Рис. 14 Отливка после удаления литниковой системы, термообработки и проверки на герметичность.

Это первый опыт применения **SLS**-технологий с использованием песчаных синтез-форм в отечественной промышленности, который подтвердил высокую эффективность **RP**-технологий в изготовлении литейных деталей. Отливка была получена через два месяца с начала работ по проектированию литейной формы. Работы, связанные с получением первой отливки, с учетом неизбежных в данной ситуации ошибок заняли около одного месяца. Получение второй и последующих отливок потребовало существенно меньшего времени. С учетом накопленного опыта и приобретенных навыков на изготовление, сборку и заливку формы для третьей отливки потребовалось десять рабочих дней.

Использование CAD/CAM/CAE&RP-технологий открывает широкие возможности в ускорении процесса создания опытных образцов автомобильной техники и особенно по таким критичным с точки зрения трудозатрат изделиям, как корпусные детали двигателей и трансмиссий.