

Аддитивные технологии и литейное производство

Выбираем отечественное оборудование для производства литейных форм методом послойной печати

Денис БЫЧКОВСКИЙ, к. ф.-м. н., генеральный директор, Александр НЕТКАЧЕВ, технический директор ООО «Аддитивные технологии» (add-technology.com)

Отечественное литейное производство является базовым элементом машиностроительного комплекса. Перспективы его развития определяются потребностью в литых заготовках, динамикой их производства, уровнем развития литейных технологий и конкурентной способностью отечественных машиностроительных предприятий.

По данным 2017 года в России действует около 1250 предприятий, которые производят отливки, оборудование, сопутствующие материалы. При этом уровень автоматизации литейного производства в России крайне низок – 78% отливок производятся на механизированных линиях и машинах, а также вручную. И потому разработка автоматизированных методов создания литейных форм является одним из приоритетных направлений развития отрасли.

ПРОБЛЕМА И РЕШЕНИЕ

В транспортном машиностроении сегодня широко используются высокотехнологичные двигатели внутреннего сгорания. В их конструкцию входят сложные по форме и зачастую крупногабаритные блоки цилиндров и головки блоков цилиндров, которые изготавливаются российскими предприятиями

по традиционным технологиям литья. Одна из них – это литье в одноразовые формы, сделанные вручную с использованием физических мастер-моделей. Для этого требуется длинная технологическая цепочка изготовления мастер-модели, подготовки смеси, формовка частей формы, их сушка, места для хранения моделей и так далее. Другая – литье в кокиль (металлическую форму), что является очень долгим (от 6 месяцев до 1-2 лет), затратным, трудоемким и экономически невыгодным способом, сопряженным с высоким риском брака при изготовлении кокиля. Оба подхода имеют технологические ограничения на сложность внутренней конфигурации отливки. Используя эти традиционные технологии, невозможно или крайне затруднительно выполнить сложные каналы охлаждения, оптимизировать конструкцию и снизить припуск на последующую

обработку. Все вместе это значительно ограничивает потенциал разработки новой продукции и затрудняет выпуск новых моделей, увеличивает сроки выхода новинок на рынок и стоимость запуска в производство, что в свою очередь негативно сказывается на конкурентоспособности конечной продукции. Невозможность реализации наилучших расчетных конфигураций конструкции традиционными технологиями обуславливает снижение эксплуатационных характеристик продукции.

В последнее время для преодоления технологических ограничений и ускорения сроков проектирования и производства мировыми лидерами машиностроения активно применяются аддитивные технологии. Создание литейных форм с использованием методов послойного синтеза позволяет обойти технологические ограничения традиционных технологий и сократить технологическую цепочку, отказавшись от таких операций, как изготовление мастер-модели из металла или композитных материалов, изготовление литниковой системы и прирублей, формовка частей формы (установка мастер-модели и литниковой системы в опоку и засыпка смесью). Это позволяет сократить время производства и снизить стоимость формы на порядок.

Для примера рассмотрим изготовление литейного стержня для формирования внутренних каналов охлаждения двигателя

Изделие – литейный стержень для формирования внутренних каналов охлаждения двигателя

Объем стержня – 300 см³

Материал – удаляемый из отливки песок (гипс)

Линейные размеры стержня – 300×216×85мм



Технология	SLA и SLS 3D-печать	Станок с ЧПУ	Песчано-полимерная 3D-печать
Стоимость, руб.	46 560	21 560	45
Время, дней	9	24	1

Рис. 1. Сравнение методов изготовления литейного стержня

различными методами (рис. 1). Как видно из приведенного примера, стоимость изготовления формы с использованием разрабатываемой технологии на три порядка меньше, чем по любой другой технологии. Такой экономический эффект достигается за счет того, что 3D-принтер создает литейную форму сразу по цифровой модели. Цифровая модель литейной формы разбивается на слои и передается в 3D-принтер, в котором отвердитель наносится согласно цифровой модели литейной формы на предварительно подготовленный слой песчаной смеси. В результате работы в зоне построения создается отвержденная часть песчаной смеси, точно повторяющая цифровую модель.

ТЕХНОЛОГИИ ПЕЧАТИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ

Для производства литейных форм методом послойной печати могут использоваться две технологии: струйная печать и спекание плакированного песка.

Технология струйной печати для производства литейных форм была разработана в Массачусетском технологическом институте (MIT, US) в начале 1990-х годов и носит название Binder Jetting (BJ). Принцип технологии описан в пионерских патентах MIT под названием «3D printing techniques» US5204055 от 20.04.1993, US5340656 от 23.08.1993, US5387380 от 07.02.1995. Технология BJ представляет собой процесс послойного синтеза, в котором жидкий связующий агент избирательно осаждается для соединения частиц порошка. Печатающая головка наносит связующий материал на слой порошка в соответствующих участках. Рабочая камера опускается, и затем наносится следующий слой порошка, в который вновь добавляется связующий состав. Технология имеет возможность печатать большие детали и зачастую более рентабельна, чем другие методы производства.

Для реализации технологии BJ

применяют силикатный песок преимущественно совместно с фурановым связующим. Силикатный песок – один из самых распространенных сортов песка в мире, он получается из кристаллов кварца. Он широко используется в том числе при создании пресс-форм и сердечников для промышленных отливок. Фурановое связующее представляет собой типичное связующее, не требует обжига, является традиционной основой в песчаных отливках, его использование не требует никаких изменений в литейном производстве. Причем напечатанные формы сразу доступны для литья.

Также для печати могут использоваться керамические порошки, состоящие из силиката алюминия и обладающие отличными огнеупорными свойствами, высокой прочностью и низким тепловым расширением. Газы в них легко диспергируются, уменьшая потенциальную пористость при литье. Создание таких газопроницаемых форм, в том числе с применением керамики, описано в патенте EP1773559 от 18.04.2007 «Gas permeable molds». Формы, отпечатанные из таких керамических порошков, особенно рекомендуются для литья стальных сплавов или печатных сердечников, подверженных высоким термическим напряжениям.

Недостаток известного решения – необходимость применения большого количества связующего вещества и активатора для получения достаточной прочности формы. Это ведет к большому выделению вредных веществ в рабочую зону при построении формы и при заливке металла, увеличивает газовыделение, что в свою очередь приводит к появлению дефектов в отливке и увеличивает стоимость изготовления.

Сравним технологию струйной печати при производстве литейных форм с технологией лазерного спекания плакированного песка. В данном случае печать осуществляется за счет спекания песчинок, покрытых тонкой оболочкой смолы. Как и в случае струйной печати, песок наносится последовательно слоями, а каждый слой обрабатывается лазерным



Рис. 2

лучом. Главными параметрами для сравнения следует выбрать скорость построения и себестоимость получаемых форм. По скорости построения лазерные машины сильно уступают струйным. При одинаковых размерах зон построения скорость печати лазером в 10 раз ниже, чем струйной при толщине слоя, близкой к 200 мкм, что находится на грани возможностей технологии. Если толщина слоя будет в пределах 100 мкм, то скорость печати уменьшится еще больше и будет отставать от струйной печати почти в 20 раз. Таким образом, строить большие формы, размеры которых близки к метру или более, по этой технологии просто невозможно.

Теперь сравним себестоимость формы, отбросив для простоты расчетов отчисления на амортизацию, стоимость рабочего времени и сопоставляя только стоимость песка. При струйной печати требования, предъявляемые к песку для печати, практически такие же, что и при классическом процессе с холодно-твердеющими смесями (ХТС). Практически это означает, что физико-химические свойства песка такие

же, что при классическом процессе с ХТС. Однако к песку, используемому в принтерах, предъявляются более жесткие требования в плане однородности. Если при ручной формовке размеры песчинок и их форма не имеют значения, то при использовании песка в принтере следует использовать песок максимально однородный. Это требование критично для равномерного нанесения микроскопических слоев. Речь идет о толщинах в пределах 200-500 мкм. Очевидно, что при таких толщинах слоев размер песчинок становится соизмерим с толщиной слоя, и следует использовать однородный песок для лучшего распределения частиц по объему слоев. Это требование несколько удорожает песок, применяемый в 3D-печати, по сравнению с используемым при ручной формовке, но средняя стоимость за тонну не превосходит 5 тысяч рублей. Стоимость же плакированного песка колеблется в пределах от 170 000 до 340 000 рублей за тонну в зависимости от марки песка. Таким образом, если сравнить стоимость плакированного и литейного песка для 3D-печати, то окажется, что плакированный песок дороже в 30-60 раз! Такая «космическая» стоимость плакированного песка делает производство литейных форм абсолютно не конкурентоспособным. Кроме того, в России такой песок не производится, что

накладывает дополнительные риски, связанные с регулярностью поставок, даже если бы эта технология и получила свое применение.

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ 3D-ПРИНТЕРЫ ДЛЯ ЛИТЕЙНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Установки с большой рабочей зоной для одновременной печати нескольких однотипных форм позволяют применять технологию песчано-полимерной печати для производства серийных и крупносерийных партий деталей. Кроме того, использование данной технологии реализует переход к цифровому производству.

На Западе технология для создания песчано-полимерных литейных форм развивается с 80-х годов XX века. Основными игроками на этом рынке являются компании ExOne и Voxeljet. Наряду с неоспоримыми достоинствами, машины этих фирм обладают и некоторыми недостатками, затрудняющими их проникновение на рынок:

- Высокое газовыделение при заливке металла с высокой температурой плавления в песчаные формы, что ограничивает использование установок при литье жаропрочных сталей и сплавов.

- Стоимость оборудования, которая в зависимости от размера камер может колебаться от одного до нескольких миллионов евро.

- Стоимость расходного материала и зависимость от его поставок. Отечественные материалы не могут заместить импортные в силу особенностей технологии, используемой в импортных установках.

Проанализировав эти недостатки импортных установок, мы задались целью создать отечественный принтер, который смог бы конкурировать с западными аналогами. С этой целью в 2015 году была создана компания «Аддитивные технологии». В 2016 году нами была разработана собственная технология послойной печати, на которую были поданы две патентные заявки и получен приоритет. В 2017 году мы собрали первый отечественный песчано-полимерный принтер АТ300. Он имел камеру построения 500x430x430 мм (XYZ) и

обеспечивал рост слоя толщиной 3,2 см в час, что соответствовало скорости построения 4800 куб. см в час, или 45 сек. на один слой по вертикали (координата Z). Скорость, прямо скажем, не высокая, но для первой модификации вполне подходящая. Запуск первой модели АТ300 позволил отточить все аспекты технологии, а также отработать систему управления печатью.

Система состоит из двух основных блоков: управление приводами и управление непосредственно печатью (движение головок, впрыск связующего агента). Усовершенствования системы, полученные в результате опытных работ, позволили сократить время нанесения песка и печати одного слоя до 20 секунд, что обеспечивает рост 7,2 см в час. Мы предпочитаем говорить именно об абсолютной скорости роста по вертикальной оси, поскольку объем построения зависит от горизонтальных размеров камеры построения. Так, для одной и той же вертикальной скорости, скажем, 7,2 см. в час, мы получим разные значения для камер с разными горизонтальными размерами (XY) 300x450 мм и 700x700 мм. Соответствующие значения объемов построения в этом случае составят 10800 куб. см. в час и 35200 куб. см. в час соответственно. Для еще больших размеров камер мы получим еще большие значения объемов при равной вертикальной скорости роста. Таким образом к 2018 году нами была создана обновленная установка АТ300 с прежними линейными размерами 500x430x430 мм (XYZ), но значительно, более чем в два раза ускоренная, обладающая скоростью построения 7,2 см в час или 10800 куб. см в час. Эту установку мы продемонстрировали на выставке «Металлообработка-2018» (рис. 3).

Параллельно с работой над усовершенствованием АТ300 мы занимались созданием принципиально новой установки АТ700 (рис. 4). В основе работы АТ700, безусловно, лежат те же принципы, что и у АТ300, однако она имеет ряд коренных отличий от младшей модели. Впервые, АТ700 оснащена системой



Рис. 3

автоматической подачи песка. Если AT300 предполагает ручную засыпку песка в бункер построения после предварительного ручного смешивания с катализатором, то в AT700 песок подается автоматически в бункер замеса, где происходит впрыскивание катализатора и размешивание его в массе песка. Затем песок из бункера замеса автоматически подается в рабочий портал, который, двигаясь в горизонтальном направлении, обеспечивает послойное нанесение песка. Данный процесс повторяется по мере того, как заканчивается песок.

Во-вторых, AT700 предполагает сменный бункер построения. После окончания цикла печати бункер, в котором проводилось построение форм, можно выкатить, открыв боковые дверцы, а вместо него поставить новый пустой бункер и начать следующий цикл печати. Пока машина строит следующую партию форм, можно заняться выемкой и очисткой уже построенных форм. Это значительно экономит время и позволяет печатать формы практически непрерывно.

В-третьих, AT700 оснащена четырьмя головками вместо одной, как у AT300, и для нее создана другая версия системы управления печатью. AT700 обеспечивает вертикальную скорость печати 7,2 см. в час, что соответствует 35200 куб. см. в час. И, наконец, в-четвертых: процесс печати на AT700 также полностью автоматизирован. На входе мы имеем STL-файл, который загружа-

ется в компьютер принтера. Далее машина все делает автоматически: разбивает файл на слои, подает их на систему управления, определяет необходимое количество катализатора и смолы, время замеса песка и оптимизирует процесс построения. Управление принтером может осуществляться как с выносной консоли принтера, так и по удаленному доступу через Wi-Fi.

На рисунке 4 представлена литейная форма для отливки гребного винта корабля, спроектированная специалистами государственной корпорации «ОСК» и отпечатанная на принтере AT700. Процесс непосредственной печати формы позволяет сократить процесс изготовления формы и стоимость ее изготовления в несколько раз.

Как выглядят стержни для формирования внутренних каналов охлаждения двигателя, смотрим на рисунке 5. Раньше требовалось изготавливать такие стержни вручную, что было очень трудоемкой и затратной задачей, и только потом использовать их при формовке. Теперь же можно отпечатать форму вместе со стержнями за один цикл печати. Отпечатанная форма для отливки блока головки цилиндров, в состав которой уже входят стержни, представлена на рисунке 6.

Можно без преувеличения утверждать, что AT700 представляет собой уже серьезного конкурента как для VoxelJet, так и для ExOne. Благодаря тому, что наши принтеры на 90% состоят из отечественных комплек-

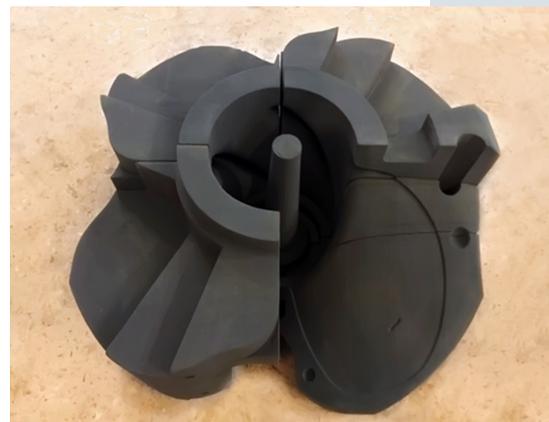


Рис. 4

тующих, их стоимость в несколько раз ниже импортных аналогов. Кроме того, использование отечественных расходных материалов позволяет добиться себестоимости форм в пределах 100 рублей за килограмм или даже меньше при условии оптимальной заполняемости камеры построения.

К настоящему времени нашей компанией разработана линейка отечественных принтеров для производства песчано-полимерных форм, насчитывающая четыре модели: AT300, AT700, AT1000 и AT2000. Номер модели коррелирует с размером камеры построения. Модель AT300 имеет размеры XYZ 500x300x300 мм, модель AT700 – 700x700x450 мм, модель AT1000 – 1000x1000x450 мм, модель AT2000 – 2000x1000-2000x700 мм. Все модели имеют примерно одинаковую скорость построения по вертикали, колеблющуюся в пределах 7 – 9 см, что



Рис. 5

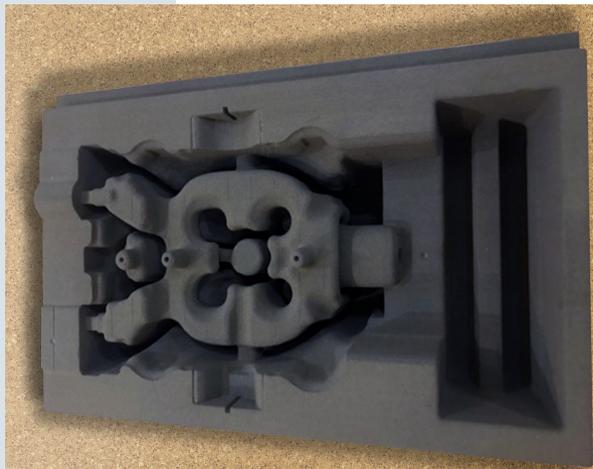


Рис. 6

обеспечивает объем построения до 250000 кубических сантиметров в час у старших моделей. В процессе создания установок мы разработали ряд ноу-хау. Владельцем всех прав как на разрабатываемую установку, так и на технологию (патенты) является компания «Аддитивные технологии». Интеллектуальная собственность включает в себя:

- собственную технологию изготовления песчано-полимерной смеси;
- собственную конструкцию блока управления головками и механикой;
- собственное программное обеспечение и система управления;
- собственную конструкцию блока нанесения песка;
- собственный модуль подготовки песчаной смеси.

В сентябре 2018 года наша компания выиграла тендер на производство и поставку песчано-полимерного принтера AT1000 на Магнитогорский металлургический комбинат. В тендере принимали участие дистрибьютор компании VoxelJet, производящей аналогичные принтеры, а также несколько компаний, продвигающих на рынке технологию печати литейных форм из плакированного песка. На первом этапе тендера, по сути, проходил выбор технологии путем сравнения основных параметров: скорости построения и себестоимости форм. Поскольку технология спекания плакированного песка отстает по скорости построения от песчано-полимерной технологии более чем в

10 раз, а стоимость тонны плакированного песка почти в 30 раз дороже стоимости песка применимого для VJ, то выбор естественным образом пал на технологию послойной полимеризации, лежащую в основе наших принтеров. Сравнение остальных технико-экономических параметров обеспечило нашей компании победу в тендере.

На основе проведенного нашей компанией маркетингового исследования ведущих предприятий (консультации с главными технологами, директорами по инновационному развитию, техническими директорами), имеющих постоянную потребность в литье, можно сделать вывод, что в настоящее время многие предприятия проводят реконструкцию литейного производства, ориентируясь на новые технологические процессы, материалы и перспективное оборудование. Основной целью реконструкции является расширение объемов производства, повышение качества продукции до уровня, отвечающего современным требованиям заказчика, снижение сроков производства и себестоимости продукции, а также улучшение экологической ситуации и условий труда.

С учетом активно реализуемых программ технического перевооружения промышленных предприятий ОПК с ориентацией на отечественные технологии и сырьевую базу можно прогнозировать высокий платежеспособный спрос. Общий объем программ технического перевооружения на предприятиях ОПК превышает 1 трлн. рублей. Также предполагается наличие спроса и у небольших предприятий, ориентирующихся на мелкосерийное производство литейных изделий, и инжиниринговых компаний, разрабатывающих конструкции литейных изделий и литейной оснастки. Предлагаемая технология позволит им сократить издержки и сроки разработки.

С целью популяризации технологии и предоставления сравнительных данных заинтересованным предприятиям мы проводим демонстрации работы нашего оборудования на своей площадке в Санкт-Петербурге. Мы также производим тестовую печать различных образцов песчаных форм, которые заказчик может протести-

ровать у себя на заводе, проведя соответствующие испытания и отливки, и сравнив полученные изделия с изделиями, выполненными на импортном оборудовании. Сейчас печать осуществляется на двух установках на нашей площадке в Санкт-Петербурге: AT300 и AT700. Мы отпечатали формы для тестирования для «Балтийского завода», авиационной корпорации «Рубин», «Камаз», «ММК», НПО «Электромашина», «КУЛЗ», Госкорпорации «Росатом» и ряда других компаний и холдингов. Помимо тестовых форм мы обеспечиваем выполнение заказов по печати литейных форм. На сегодняшний день есть подтвержденные положительные результаты отливок на наши формы сталей, чугуна, магния, латуни, бронзы.

Мы также заключили дилерское соглашение с компанией «Современное оборудование», входящей в группу компаний «Солвер», и подписали партнерское соглашение о сотрудничестве в области развития аддитивных технологий в России. Наши компании будут вести совместную маркетинговую деятельность и осуществлять внедрение продукции «Аддитивных технологий» на российских предприятиях.

Немаловажным моментом при принятии решения потенциальным заказчиком о приобретении оборудования является наличие у производителя оборудования соответствующих производственных мощностей. Нарастание объема продаж требует соответственного увеличения производственных мощностей, что влечет за собой огромные финансовые затраты и увеличивает финансовые риски. Поэтому мы выбрали основной производственной стратегией контрактное производство. Нами заключен лицензионный договор с компанией Zias Machinery (г. Барнаул), имеющей опыт в производстве подобного вида оборудования и необходимые производственные мощности и кадры для производства принтеров по лицензии «Аддитивного производства». Это позволит нам избежать нежелательных финансовых затрат на создание производства и сконцентрироваться на основных наших компетенциях – разработке оборудования и его модификации. ■