

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛИТЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ ИЗ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА

На фоне закрытия многих литейных заводов в Европе (в Англии их уже единицы, в Германии количество чугунно- и сталелитейных заводов в 1991 - 2006 гг. уменьшилось почти в 2 раза), литейное производство, по информации из технических журналов [1], переносится в Турцию, Украину, Россию. В этой связи IFC (Международная финансовая корпорация, член Группы Всемирного Банка) в 2009 - 10 гг. финансирует проект «Ресурсоэффективность литейного производства в России» с планом инвестиций 250 млн. дол. США в модернизацию как самостоятельных предприятий, так и литейных цехов машиностроительных заводов. Целью настоящей статьи является желание ещё раз обратить внимание на один из ресурсоэффективных литейных процессов, недостаточное внимание к которому отчасти объясняется слабым отражением его особенностей и преимуществ в отечественной технической периодике.

Среди последних промышленных способов получения отливок, созданных во второй половине прошлого века, литьё по газифицируемому моделию (ЛГМ или по англ. термину - Lost Foam Casting Process) уверенно расширяет свои объёмы и географию внедрения. Россия и Украина имеют до двух сотен патентов по разным вариантам этой технологии.

То, что жидкий металл не заливается в пустую полость литейной формы, а замещает пенопластовую модель в форме, чтобы там затвердеть в качестве отливки, составляет ноу-хау способа ЛГМ и меняет технологическое видение процесса литья. Если в традиционных видах литья точность размеров и чистота поверхности отливки являются производными прежде всего процесса формовки, то при ЛГМ-процессе качество пенополистироловой (ППС) модели служит главным определяющим фактором, а понимание этого – ключом к организации производства качественных точных отливок с меньшими трудовыми и материальными затратами. Выполненные во ФТИМС НАНУ в течение ряда десятилетий позволяют сегодня и предложить вниманию литейщиков некоторое обобщение опыта производства моделей из ППС. К тому же при ЛГМ - искусстве формовщика обычно не требуется, так как в большинстве вариантов ЛГМ формовка состоит из засыпки контейнерной опки сухим песком с виброуплотнением. При этом все другие операции на литейном участке ЛГМ (кроме касающихся изготовления моделей и указанной простой операции формовки) аналогичны практически для всех литейных цехов, включая шихтовку, плавку, заливку металла, очистку отливок, и обычно выполняются на стандартном общелитейном оборудовании. При реконструкции литейного цеха с переходом на ЛГМ-процесс планировка этих участков не изменяется.

Для производства ППС моделей имеются четыре основных способа, выбор каждого из них зависит прежде всего от серийности и размера отливки. Исключительно низкая твёрдость и лёгкость обработки ППС плотностью 20...30 кг/м³ как конструкционного материала литейных моделей в сочетании с кратко рассмотренными ниже указанными четырьмя способами объясняет высокую гибкость ЛГМ-процесса, пригодного как для ремонтного, так и для массового литья. Простой и легкодоступный способ изготовления модели на простейшем оборудовании – вырезание из блочного ППС нагретой проволокой. При получении единичной отливки, например, отливки детали для ремонта дорогостоящей или уникальной машины,

этот способ является почти единственно приемлемым по экономическим и технологическим соображениям. Модель необходимой детали с учётом усадки металла весом от десятков грамм до нескольких тонн можно вырезать из ППС плит по шаблонам. Если деталь пространственно-объёмная, то модель изготавливается из частей и собирается в целое.

Специалистами института разработан ряд приёмов для точного изготовления модели по шаблону. Сборку частей осуществляют склеиванием или расплавлением стыка тепловым ножом, контур детали или его частей прорисовывают на плоскостях ППС плиты гелевой ручкой или фломастером. При необходимости изготовления нескольких моделей одной и той же детали с целью повторяемости размеров целесообразно изготовление шаблонов из плотного картона толщиной 1...1,5 мм, которые сверху и снизу ППС плиты закрепляют тонкими гвоздями или специальными кнопками. При изготовлении модели детали с элементами зубчатой передачи по картонным шаблонам необходимо их точное взаимное ориентирование в разных плоскостях. Для этого шаблоны могут иметь средства совмещения типа шип - паз и др.

Особенности получения отливки по моделям, изготовленным резанием проволокой: 1) невысокая точность размеров; 2) шероховатость поверхности ППС модели в точности переходит на поверхность отливки; 3) сложность получения тонкостенных рёбер (тоньше 3 мм); 4) узкие пределы выбора ППС по плотности, которая может отличаться для отливок из разных сплавов, т.к. блочный ППС в основном выпускается для строительной отрасли и имеет небольшую плотность; 5) сложность совмещения в единую конструкцию элементов модели, изготавливаемых по частям, особенно крупногабаритных и пространственно - искривлённых; 6) возможность изготовления отливки с толстыми стенками и элементами (толщина свыше 40 мм), что часто трудно получить другими способами. На рис. 1 показаны примеры изготовления моделей вырезанием нагретой проволокой.

При изготовлении модели или ее частей, имеющих различные толщины, необходимо следить за скоростью резания и температурой проволоки, от которых зависит точность размеров и чистота поверхности реза. Для устранения залипания мест реза необходимо предварительно габариты ППС приблизить к контуру будущей отливки, особенно при изготовлении крупномерной модели. Оптимальный диаметр применяемой

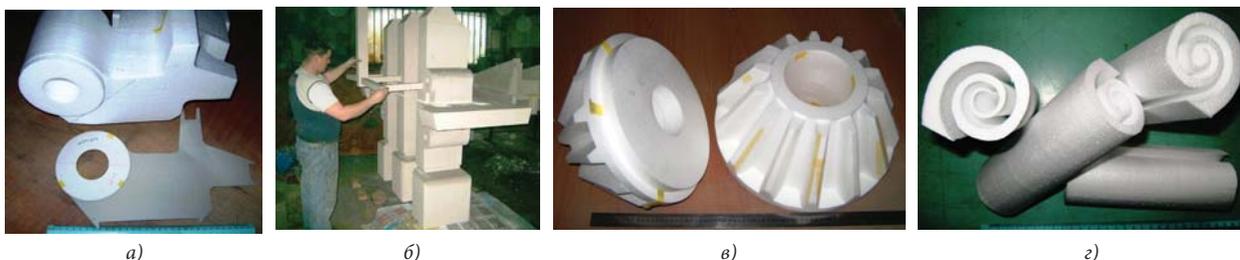


Рис. 1. Примеры изготовления моделей вырезанием проволокой: а) торец модели и картонный шаблон, б) модель детали МНЛЗ (машины непрерывного литья заготовок) для формовки способом Full Mould – в песчаной смеси со связующим, в) конические шестерни, г) витые модели деталей кресла.

нихромовой проволоки 0,6...1,2 мм. Для изготовления тонкостенной модели плотность ППС плиты должна быть большей, чем для толстостенной. Использование плиты с мелкозернистой структурой, что даёт экструзионный ППС, позволяет получить отливки с поверхностью низкой шероховатости. Также определённой сложностью является выполнение мелкоразмерных элементов поверхности модели (до 2 мм), таких как отверстия, пазы, зубья, шлицы и др. Модельщики опытного производства института в таких случаях используют специальные инструменты.

Изготовление из плиты ППС с использованием трёхкоординатного фрезерного станка с ЧПУ (3-D фрезера) является самым современным и универсальным способом получения резанием моделей крупногабаритных, сложных и точных отливок как при единичном, так и при мелкосерийном производстве. Модели, изготовленные фрезерованием, обеспечивают повторяемость размеров, повышенную чистоту поверхности модели, соответственно, и отливки. На рис. 2 показаны примеры моделей, полученных на 3-D фрезере.

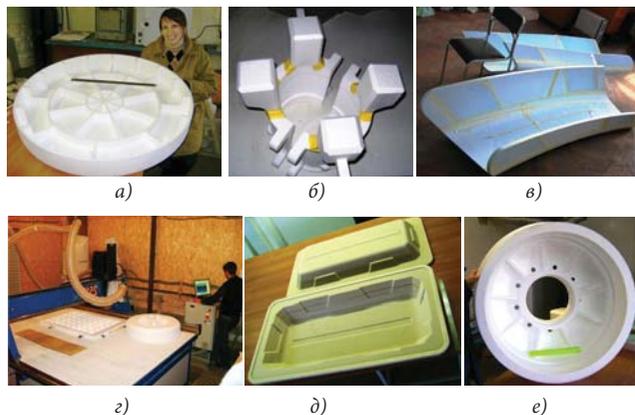


Рис. 2. Примеры моделей, полученных на 3-D фрезере: а) крышка контейнера для захоронения радиоактивных отходов, б) элемент конвейера, в) жёлоб с габаритными размерами больше 2 м, г) 3-D фрезер в работе, д) лоток, е) колесо.

Этим способом легко выполнить объёмные стыковочно-маркерные элементы при изготовлении составных моделей. Выполнение стыковочных элементов с возможностью центровки и замыкания частей модели различной конфигурации и размеров позволяет изготовить точные сплошные модели из составных частей, уменьшить использование клея и вероятность образования зазоров, что помогает обеспечить качественную покраску и снизить затекание противопожарной краски в возможные зазоры по стыку под действием капиллярного эффекта.

Управляющие программы большинства 3-D станков адаптированы к различным конструкторским программам, работающим в среде Windows: «Компас», «Солид-веркс», «3-D», «Инвентор» и др. Оператор-конструктор при изготовлении крупногабаритных моделей определяет плоскости, разделяющие её на части, и обеспечивает при этом возможность изготовления элементов, например, пазов, отверстий, рёбер усиления, площадок и т. п., расположенных на различных стыковочных плоскостях и в теле модели. Ещё одним преимуществом 3-D фрезеров является большая скорость резания, обеспечивающая гладкость поверхности резания, в том числе из-за расплавления тонкого слоя поверхности ППС.

При проектировании изготовления составных моделей, для получения качественной отливки, необходимо минимизировать количество и длину линий стыка, а также делать поверхности

стыковки в одной плоскости без закругления кромки края, что исключает затекание защитной краски в стыки. Такой методики следует придерживаться как для горизонтальных, так и для вертикальных стыковочно-сборочных мест, последние желательно размещать в шахматном порядке для придания жёсткости сборной модели. При изготовлении крупногабаритных отливок с толстыми стенками и элементами предпочтительно их делать составными (из половинок) и в местах утолщения модели делать пустоты, оставляя стенки толщиной не более 10 - 15 мм. Это даёт уменьшение газотворности при газификации ППС. Меньший объём газов легче утилизировать (дожигать), при этом уменьшаются науглероживание поверхности и количество газовых дефектов в отливке, а также экономятся время и энергия на откачку газов. Предпочтение при этом способе изготовления моделей отдаёт применению ППС плит с повышенной плотностью и мелкой зернистостью, отражаемой на поверхности модели малой шероховатостью. Защитная краска на модели, изготовленной из такого блочного ППС, легко наносится ровным слоем.

Изготовление ППС моделей автоклавным способом или на полуавтоматах технологически отличается от выше рассмотренных методов тем, что исходный гранулированный ППС необходимо подготовить к использованию, подвспенить или активировать гранулы для получения модели необходимой плотности и качества. Рекомендации к применению марки ППС в зависимости от вида материала отливки составлены по результатам многолетних исследовательских работ, которые велись с материалами отечественного и зарубежного производства для получения отливок различного развеса из различных металлов. Проведённые работы позволили внедрить ЛГМ-процесс на различных предприятиях и получить положительные результаты, подтвердившие его преимущества перед традиционными видами литья как по экономическим показателям, так и по качеству отливок. При тщательном соблюдении технологических инструкций ФТИМС, начиная от выбора марок ППС, режимов подвспенивания, хранения, изготовления модели, сборки, окраски, и включая весь литейный цикл до выбивки, возможно, получение до 97 % годных отливок.

При автоклавном способе изготовления моделей подвспененный и выдержанный ППС задувают в пресс-формы и спекают паром с температурой 110...130° С и давлением 110...125 кПа. Модельный ряд стандартных автоклавов по объёму камер составляет: на 100; 400; 700; 1000 дм³ (литров). Последние конструкции автоклавов имеют автоматику для контроля уровня воды в котле, температуры водяного пара, давления в камере, а также рекуператор пара. Среди новых технических решений по этой теме является разработка конструкции проходного автоклава, в котором по ролям пресс-формы проходят 3 камеры, 2 крайние из них служат своеобразными шлюзами для экономии пара как теплоносителя [2]. Следует отметить, что ППС модели с элементами толще 30 мм сложно стабильно пропечь по толщине, что требует выполнения таких мест с пустотами внутри тела модели. Например, конструкторами и технологами института для выполнения модели литого ствола пушки в виде толстостенной трубной заготовки с толщиной более 70 мм были разработаны и изготовлены пресс-формы, в которых изготавливались составные пустотелые модели с толщиной сплошных стенок до 12 - 14 мм и длиной более 4 м.

При изготовлении моделей отливки из низкоуглеродистых (до стали 20) или нержавеющей сплавов желательнее использование пенопластов сополимеров, например, на основе полиметилме-

такрилата (PMMA), в частности содержащего 70% PMMA и 30% полистирола, хотя сополимеры на порядок дороже ППС. PMMA обладает высокой скоростью газификации при минимальном коксовом остатке, который в 20 раз меньше, чем у ППС, что объясняется наличием в молекулярной структуре PMMA связанного кислорода и отсутствием тяжёлых радикалов. Эти два обстоятельства стимулируют быстрое протекание высокотемпературной окислительной термодеструкции с выделением главным образом газов при малом количестве свободного углерода. Чистый PMMA имеет невысокую прочность, добавление к нему 30% полистирола или этилена повышает прочность материала до уровня ППС. Модели для получения тонкостенных отливок обычно изготавливают из более плотного подвспененного ППС, а для обеспечения меньшей шероховатости поверхности отливки применяют мелкозернистый подвспененный полистирол.

При проектировании пресс-формы из алюминия надо стремиться, чтобы её стенки были приблизительно одной толщины и не более 15 мм для равномерного спекания модели. Чем выше чистота формообразующих поверхностей оснастки, тем выше чистота модели и отливки, а также лёгкость извлечения модели из пресс-формы. Получить отливку ЛГМ-процессом с наименьшей возможной шероховатостью, до 6 класса чистоты, можно, если поверхности пресс-формы и, соответственно, модели имеют шероховатость на класс выше. При конструировании пресс-формы учитывают усадку ППС и заливаемого металла.

Изготовленные модели перед окрашиванием и сборкой с элементами литниково-питающей системы (ЛПС) должны быть высушены. Высушенные модели после выхода порообразователя из ППС можно хранить долго (несколько месяцев) без потери технологических свойств и размеров. Для уменьшения прилипаемости и облегчения выемки модели из охлаждённой пресс-формы, поверхность её предварительно, перед задувкой ППС, обрабатывают аэрозольной силиконовой смазкой. Но, в свою очередь, эта смазка, частично переходящая на поверхность испечённой модели, затрудняет нанесение противопопригарной краски. Разработано несколько видов добавок, ПАВ, которые повышают адгезию краски к модели и регулируют её газопроницаемость. Кроме этого, задействуют ряд добавок, которые повышают тепловые характеристики красок, а также способствуют целостности покрытия без растрескивания при сушке и складировании. При изготовлении пресс-форм также учитывают необходимость максимального их облегчения и выполнения в них задувочных и вентиляционных отверстий, от количества которых зависит быстрое и полное заполнение пресс-форм гранулами ППС, что, в конечном счёте, обеспечивает получение качественных моделей или её составных частей и облегчает труд модельщика.

Расстановка технологического оборудования: автоклава, ванны охлаждения, рабочего стола, стеллажей для хранения

пресс-форм и моделей, пневматического задувочного устройства, тары с подвспененным ППС производится в соответствии с эргономическими и санитарными нормами. Установка вентиляционного зонта над автоклавом способствует сохранению гранул ППС сухими. На крупных модельных участках, где используют пневмотранспорт подачи подвспененного ППС из бункера вылеживания до расходной тары, на рабочем месте модельщика необходимо заземление или использование антистатического аэрозоля, иначе назлектризованные гранулы не полностью заполняют пресс-форму. Сжатый воздух давлением 200...250 кПа, необходимый для задувочного устройства, должен быть сухим и без масла. Желательно наличие влаго- и маслоотделителя на пневмотрубопроводе.

Самые недорогие и качественные ППС модели для крупносерийного производства получают методом «теплого удара» на полуавтоматах. Для их эксплуатации и обслуживания требуется квалифицированный персонал. К полуавтомату подводят магистрали сжатого воздуха давлением до 1000 кПа, сухого пара с температурой +135...150 °С и давлением 130...150 кПа, воды для охлаждения с температурой до 30 °С, вакуума с давлением 75...150 мм рт. ст., конденсатоотвода и пневмотранспорта подачи подвспененного ППС из бункера вылеживания до расходного бункера полуавтомата, электропитания 220/380 в, 50 гц.

Технология получения ППС модели методом «теплого удара» не схожа с изготовлением изделий из полиэтиленов, полиамидов и др. пластмасс на пластавтоматах, экструдерах и пресс-машинах. Поэтому для разработки пресс-форм для ППС модели на полуавтомате требуется знание существующих отличий в технологии получения изделий из газонаполненных полимеров, игнорирование которых приводит к излишним финансовым и трудовым затратам, уменьшению производительности и ухудшению качества модели. На рис. 3 показаны типовые примеры отливок и моделей, которые получены в пресс-формах.

Пресс-формы для полуавтоматов бывают двух типов: ящичного и контурного. В контурном нет вент для подачи теплоносителя, охладителя воздуха и создания вакуума в модельной полости. Разновидностью контурного типа пресс-формы является форма с трубчатыми каналами, которые обеспечивают максимальную производительность и экономичность изготовления модели. Самыми оптимальными по стоимости проектирования и изготовления являются контурные пресс-формы. При разработке пресс-формы тщательно согласовывают каналы подачи вышеперечисленных энергоносителей и их отвода, а также герметизации подвижных и неподвижных частей и элементов пресс-формы. Грамотно сконструированная и изготовленная пресс-форма обеспечивает получение качественных моделей с наименьшими затратами.



Рис. 3. Отливки и модели, полученные в пресс-формах: а) впускной коллектор двигателя внутреннего сгорания, модель, полученная методом «теплого удара»; б, в, г) отливки и модели, спечённые в автоклаве; в) статор и ротор гидромuffты; г) танковый трак (на каждом фото показана линейка).

Если модель составная, то конфигурацией полости пресс-формы формируют стыковочные и ориентирующие элементы на частях модели, которые выполняют такими, чтобы нанесение клея при их соединении не представляло больших трудностей. Химический состав клея, используемого для сборки моделей, подобен химсоставу используемого пенопласта или специально рекомендован для этого, что обеспечивает равномерное газовыделение и получение отливки без дефектов. Кроме того, клей на стыкуемых поверхностях наносит равномерным слоем минимальной толщины. Для предотвращения затягивания клея в щели и получения отливок с гладкой поверхностью без отпечатка места стыка составных моделей нередко покрывают клеевые швы узкой бумажной малярной клейкой лентой или синтетической лентой типа «скотч». Бумажная лента предпочтительнее для водной краски, на ней краска держится лучше, а спиртовые краски дают ровный слой на пластиковой плёнке. Сборка сложных составных моделей в стапеле с использованием различных приспособлений (кондукторов) для фиксации и прижимания позволяет повысить качество и жёсткость склеенных швов.

При сборке ППС моделей отливок малых размеров и размеров на общий/один стоек их располагают таким образом, чтобы обеспечивалась равномерность откачки газов при литье, качественное окрашивание и доступность для инструмента при обрубке или отрезке отливок. Опытные модельщики располагают такие модели на разных уровнях с угловым смещением как в вертикальной плоскости, так и в горизонтальной. Места установки моделей, прибылей и выпоров из ППС определяет технолог с учётом их оптимального действия и последующей отрезки. Для получения отливок с залитыми элементами крепления из другого металла (например, защитные плиты дробильных машин из высокопрочного чугуна с резбовыми шпильками из стали) такие элементы (металлические шпильки) устанавливают в требуемые места в тело ППС модели до их покраски. Аналогично изготавливают отливки из алюминиевых или медных сплавов с элементами крепления из другого металла или в случаях установления внутренних или наружных холодильников для направленной кристаллизации металла при заливке. Создано целое технологическое направление введения «имплантантов» в модель для получения биметаллических и армированных отливок.

Важная технологическая роль при получении качественной отливки ЛГМ- процессом со стороны нанесённого на модель и модельные кусты специального покрытия объясняется тем, что этот слой краски толщиной 0,6 - 1,0 мм после сушки одновременно служит своеобразным фильтром дозированной газопроницаемости для пропуска газов от деструкции ППС модели, а также защитой от попадания формовочного материала в металл и противопопригарной защитой поверхности отливки. Марки готовых красок, рецептура композиций и технология их приготовления в зависимости от вида металла, сложности и серийности отливки приведены в технологических инструкциях и в технической литературе. Чаще всего состав импортных красок не раскрывается, а патентный поиск показывает десятки конкурирующих вариантов без возможности их гарантированного применения, что подтверждает важное (порой определяющее) их значение для обеспечения качества отливок. В зависимости от марки краски выбирается режим сушки для получения ровного и прочного слоя. Модели, окрашенные краской на спиртовой основе, в летнее время не требуется сушить, в отличие от водных красок. Сушильные шкафы обеспечивают осушение моделей без коробления и растрескивания краски в потоке теплого воздуха с температу-

рой не более +(35-40) °С. Краски, в составе которых имеется декстрин, рекомендуется использовать в течение 72 часов после их приготовления.

Плотность краски перед применением должна быть в пределах 1,40...1,65 г/см³ и тщательно перемешанной. Как показали исследования, при плотности больше 1,8 г/см³, краска после высыхания склонна к растрескиванию и осыпанию. Краску на модель можно наносить вручную, кисточкой, пульверизатором или окуранием. При окрашивании окуранием желательна краске придать циркуляционное движение для равномерного покрытия, особенно на внутренних плоскостях модели. Подготовленные модели или модельные кусты с ЛПС подаются к месту формовки в специальной таре, обеспечивающей их сохранность как при транспортировании, так и при хранении.

Интересными и полезными для литейщиков могут быть технологии модифицирования металла отливки (например, высокопрочного и специального чугуна) при ЛГМ-процессе, когда модель в своём объеме или на поверхности содержит модификатор, т. е. служит его носителем. Такой уникальной возможностью подачи на зеркало расплавленного металла модифицирующего материала по мере заполнения этим расплавом формы и газификации модели не обладает никакая другая технология литья. Модификаторы преимущественно в порошковом виде вносятся в объём ППС модели или добавляются в краску для легирования поверхности отливки.

Обнадеживающие результаты получены при подвспенивании исходного ППС в СВЧ-установках и при обработке его ультрафиолетовым облучением. Эти технологии экологически чище действующих, основанных на энергоёмком нагреве гранул в кипящей воде или паре со собственными им потерями тепла в окружающую среду. Новые указанные технологии повышают производительность подвспенивания гранул, позволяют автоматизировать процесс и получать гранулы с размерами в строго заданных пределах. Учёные ФТИМС опытным путём определили оптимальный спектр ультрафиолетовых лучей и скорость перемещения гранул исходного полистирола в зоне облучения. Внедрение этих технологий в производство планируется после полного завершения исследовательских работ и разработки конструкторской и технологической документации, при наличии инвестирования возможно изготовление первых пилотных установок в течение полугода.

Таким образом, приведённые в статье примеры, описания навыков и приёмов, разработанных научно-техническим специалистами ФТИМС НАНУ в течение ряда десятилетий при производстве моделей из ППС, послужат ценным опытом литейщикам для дальнейшего его использования на участках ЛГМ. В целом статья отражает технический уровень развития ЛГМ-процесса как весомый потенциал развития отечественного литейного производства, восстановления его роли в качестве стимулятора роста собственного машиностроения и поставщика отливок на экспорт.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Буданов Е. Н. Семь основных мифов и заблуждений относительно литейного производства // Литейное производство. 2009. №8. С. 3.
2. Бердыев К. Х., Дорошенко В. С. Проходное оборудование для получения пенопластовых литейных моделей // Станочный парк. С-Пб. 2010. - № 1-2. - С. 36-37.

В.С. Дорошенко к. т. н., К. Х. Бердыев.