



УДК 621.744.072

Поступила 14.07.2013

И. М. ТИХОМИРОВА, Е. В. КЛИМЕНОК, БНТУ

Научный руководитель – канд. техн. наук А. Н. КРУТИЛИН, БНТУ

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВКИ ЛИТЬЕМ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

*В ходе выполнения работы разработаны основные детали литейной оснастки. На основе методов математического моделирования литейных процессов проведен анализ процесса заполнения и затвердевания отливки «Подвес ПМД», определены места наиболее вероятного образования пористости. Скорректированы основные детали литейной оснастки и технологические параметры процесса.*

*In the course of the work the basic details of foundry equipment were developed. On the basis of mathematical modeling of casting processes the filling and solidification «Suspension of PMD» were analyzed, the most portable places of pore formation were identified. Basic details of foundry equipment and process parameters were adjusted.*

Наиболее существенные изменения в литейном производстве связаны с усовершенствованием существующих технологических процессов и разработкой принципиально новых специальных способов литья. Одним из наиболее важных вопросов является выбор оптимальной технологии изготовления отливки. Необходимо обращать внимание не только на обеспечение специальных требований к качеству получаемых отливок, высоких физико-механических и эксплуатационных свойств, но и на технико-экономические показатели технологии изготовления отливок, включая механическую обработку. К сожалению, в настоящее время не существует универсальных правил для выбора оптимального технологического процесса изготовления той или иной отливки, так как одинаковые по качеству отливки можно получать различными способами. Выбор наиболее рационального технологического процесса получения литой заготовки определяется конструктивной сложностью детали, ее габаритами, требованиями к качеству, условиями эксплуатации, видом сплава, объемом и серийностью производства, степенью механизации и автоматизации используемого на данном предприятии оборудования. Основным фактором, определяющим выбор технологического процесса, является обеспечение минимальных припусков под механическую обработку, что в свою очередь зависит от точности изготовления отливки.

Среди специальных способов литья в последние годы широкое распространение как в промышленно развитых странах, так и в Республике

Беларусь получил технологический процесс производства отливок по газифицируемым моделям.

Достоинствами данного способа литья являются:

- применение в качестве материала формы сыпучих материалов и упрочнение формы вакуумом;
- использование неизвлекаемой из формы модели, обеспечивающей прочность формы при ее заливке металлом;
- значительно уменьшается, а иногда и полностью исключается стержневое, формовочное и смесеприготовительное оборудование;
- существует возможность комплексной автоматизации всего технологического процесса.

Все перечисленные достоинства, а также повышение коэффициента использования металла, уменьшение массы литых заготовок, снижение трудоемкости изготовления отливки определяют рациональную область использования литья по газифицируемым моделям. Способ может использоваться как в единичном, так и в серийном и массовом производствах отливок из различных сплавов массой от нескольких грамм до десятков тонн [1–4].

Существует несколько разновидностей технологических процессов производства отливок по газифицируемым моделям, которые отличаются в основном способом изготовления литейной формы. Выбор того или иного технологического процесса зависит главным образом от объемов производства, массы и конфигурации отливки, технических требований к качеству литья. Так, например, способ литья по газифицируемым моделям – Гамолит наиболее рационально применять при се-

рийном производстве отливок из чугуна массой до 2000 кг. Отличительная особенность способа Гамодар – применение вакуума и регулируемого давления при заливке металла. Технологический процесс Policast (модели собираются в куст на стояке, без шлакоулавливателя и коллектора) рекомендуется использовать для серийного и крупносерийного производств отливок в основном из алюминиевых сплавов. Для серийного и крупносерийного производств отливок из черных и цветных сплавов рекомендуется использовать способ Replicast. Отличительной особенностью технологического процесса Replicast – CS является использование пенополистироловой модели, которая предварительно удаляется из керамической формы при ее прокаливании, оболочка заформовывается в песке и форма вакуумируется. Возможны комбинации, при которых часть формы изготавливают из пенополистирола, а основную модель выполняют из традиционных материалов, что позволяет значительно расширить возможности процесса.

В единичном производстве подбор номенклатуры для литья по выжигаемым моделям необходимо проводить на основе конструктивной сложности отливки, вида сплава, трудоемкости изготовления модели и формы, наличия необходимого оборудования и материалов.

При массовом и серийном производстве наиболее эффективно использование способа для получения отливок из чугуна массой до 50 кг, стали до 10 кг, отливки должны относиться к 2–5-й группам сложности, толщина стенок детали должна быть в пределах 5–20 мм, но не менее 3 мм на 10-кратной длине. Нецелесообразно применять способ для получения отливок из низкоуглеродистых и легированных сталей.

Окончательное решение о применении способа должно приниматься после технико-экономического обоснования с учетом технических возможностей производства, капиталовложений и экологии.

Главная роль в процессах формирования отливки при литье по газифицируемым моделям принадлежит газовому режиму на границе металл-форма. В процессе литья происходят сложные фазовые и химические превращения, протекающие при термической деструкции модели из пенополистирола, сопровождающиеся образованием жидких, паро- и газообразных, а также твердых продуктов, полнота протекания процессов зависит от температуры заливки металла. В результате взаимодействия между металлом и моделью формируется область повышенного давления, оказывающая влияние на формирование структуры и каче-

ства отливок из различных сплавов. Противодействие газообразных продуктов термодеструкции модели гидростатическому напору металла ведет к ухудшению заполняемости формы при ее заливке металлом.

Усадка отливки определяется химическим составом металла, температурой его перегрева над линией ликвидус, наличием примесей в металле, интенсивностью теплообмена между металлом и формой на всех этапах формирования отливки. В отличие от литья в песчано-глинистые формы усадочные процессы при формировании отливки при литье по газифицируемым моделям протекают в условиях постоянного плотного контакта между отливкой и формой в процессе всего периода кристаллизации металла и охлаждения отливки.

Наиболее трудоемкой и ответственной частью всего технологического процесса производства отливки является изготовление разовой модели, так как ее геометрическая точность определяет качество литой детали.

Материал для газифицируемых моделей при низкой плотности должен обладать достаточной механической прочностью, для того чтобы исключить возможность поломки модели при изготовлении, транспортировке и формовке, кроме того, при заливке формы металлом модель должна полностью газифицироваться.

В единичном производстве для изготовления газифицируемых моделей механической обработкой из пенополистироловых плит используются как литейные (ПСВ-Л и ПСВ-ГМ), так и строительные марки (ПСВ-65С и ПСВ-55С) суспензионного полистирола.

При серийном производстве моделей на первом этапе производят предварительную переработку суспензионного полистирола и далее изготавливают модель в пресс-форме. В массовом производстве применяют специальные модельные автоматы.

Качество модели определяется ее размерной точностью, шероховатостью поверхности, на которую оказывают влияние чистота рабочей поверхности пресс-формы, активность вспененных гранул, термовременные параметры формирования модели в пресс-форме. Необходимо обращать внимание на равномерность структуры пенополистирола, которая оказывает влияние на физико-механические свойства модели и газовый режим при заливке формы металлом, повышенная плотность модели может приводить к появлению дефектов на поверхности отливки. При изготовлении отливок повышенной точности общую усадку моделей из пенополистирола принимают в пределах 0,7–0,8%.

На качество модели из вспененного полистирола существенное влияние оказывают не только содержание мономера, количество порообразователя в гранулах, влажность и размер гранул, относительная вязкость полистирола, но и режим вспенивания гранул полистирола, активность и слипаемость пенополистирола и параметры окончательного спекания модели в пресс-форме. Технологический процесс изготовления моделей включает в себя подготовку пресс-формы, заполнение ее гранулами полистирола, тепловую обработку гранул в пресс-форме и ее охлаждение, сушку моделей и контроль качества изготовленной модели.

Конструкция литой детали должна быть технологичной, ее необходимо увязывать со способом изготовления модели. Основное внимание необходимо обращать на возможность изготовления модели с минимальным количеством ее составных частей. Количество составных частей модели зависит от способа ее изготовления, который, в свою очередь, определяется серийностью производства. Модели можно изготавливать автоклавным или машинным способом, в первом случае пресс-форма может иметь несколько разъемов и отъемных частей, при машинном производстве, как правило, только один разъем.

Сборку моделей производят с помощью жидких и твердых клеев, последние предварительно расплавляют при температурах 110–140 °С. Жидкий клей в большинстве случаев применяют при ручной сборке моделей, расплавленные клеи – при машинной.

Для изготовления пресс-форм применяют алюминиевые сплавы АМг5, 2,6 Д16, 18К6, которые имеют хорошую теплопроводность, высокую коррозионную стойкость в атмосфере пара и воде, достаточную механическую прочность и хорошо обрабатываются.

Перед формовкой на модель или модельный блок наносят противопопригарное покрытие, которое должно хорошо смачивать материал модели, образуя с поверхностью модели прочную адгезионную связь, кроме того, покрытие должно повышать прочность и жесткость модели и элементов литниковой системы при формовке. Противопопригарное покрытие не только обеспечивает хорошее качество поверхности отливки, но и оказывает влияние на заполняемость формы, выбор оптимальной скорости заполнения формы металлом, температуры заливки расплава. С увеличением металлостатического напора и температуры заливаемого металла, а также пористости формы из песка толщину противопопригарного покрытия необходи-

мо увеличивать. Однако с увеличением толщины покрытия снижается его газопроницаемость, что ведет к увеличению поверхностного науглероживания отливок из стали. Рекомендуемая толщина покрытия составляет 0,25–1,5 мм.

В серийном производстве гранулометрический состав сыпучего огнеупорного материала должен после вибрации обеспечить высокую газопроницаемость и максимальную плотность формы при минимальной пористости. Содержание фракций размером менее 0,05 должно быть предельно минимальным (не более 0,5%). Влажность материала не более 1%. При использовании кварцевых песков в наибольшей степени этим требованиям удовлетворяет кварцевый песок класса 061К-063К и 1К-3К зернистостью 0,2 и 0,16 (ГОСТ2138-74) категории А или Б с остроугольной или округлой формой зерна. Для повышения плотности формы применяют смешанные пески двух фракций 0,315 и 0,16 мм в соотношении 1:1, в этом случае при низкой пористости сохраняется высокая газопроницаемость. Однако кварцевые пески имеют повышенный коэффициент расширения при нагревании, что оказывает влияние на точность изготовления отливок.

Цирконовые пески применяют при производстве отливок из стали, они имеют более высокую огнеупорность, низкий коэффициент термического расширения и более высокую по сравнению с кварцевым песком теплопроводность.

Технология формовки определяется серийностью производства и степенью механизации и автоматизации формовки. На автоматических линиях рационально использовать заливочные установки на базе индукционных тигельных и канальных печей, обеспечивающих постоянство температуры и весовой расход металла. Температуру металла выбирают с учетом потерь тепла на термодеструкцию модели, отклонение от заданной температуры допускается в пределах 10 °С.

Важным фактором является обеспечение оптимальной и максимально допустимой скорости заливки формы металлом, так как несоблюдение этих параметров приводит к ухудшению качества отливок. Из тех же соображений необходимо обращать внимание на минимально допустимые скорости подъема металла в полости формы.

На получение качественной отливки при литье по газифицируемым моделям влияет хорошая вентиляция формы, обеспечивающая свободный выход газа при термодеструкции модели в процессе заливки, а также фильтрацию от твердых продуктов (сажи), выделение которой при заливке формы металлом недопустимо, так как это приводит

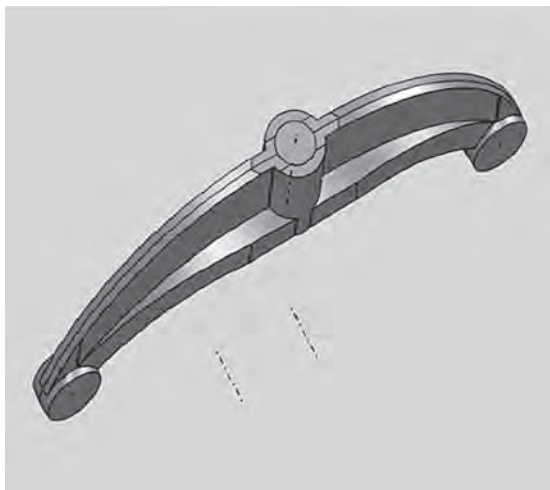


Рис. 1. Трехмерная модель отливки «Подвес ПНД»

к значительному ухудшению экологической обстановки в цехе.

В качестве детали выбрана типовая отливка «Подвес ПНД», материал – сталь 35Л. На рис. 1 показана 3-мерная модель отливки. Для того чтобы создать базу данных типовых элементов и иметь возможность их редактировать, 3-мерную модель элементов литниковой системы разрабатывали отдельно. Соединение отдельных элементов модели в 3-мерную проводили в системе автоматизированного проектирования SolidWorks (сборка).

К конструкции литниковой системы предъявляются определенные требования, которые обусловлены особенностями данной технологии. Параметры литниковой системы зависят от вида сплава, конфигурации отливки, ее массы и способа формовки. Необходимо обеспечить плоский фронт взаимодействия металла с моделью, при котором происходит постепенное замещение модели расплавом, что возможно при сифонном рассредоточенном подводе металла в полость формы.

Необходимо обеспечить отсутствие разряжения в элементах литниковой системы при заливке формы металлом, а также исключить процесс горения полистирола в полости литейной формы, в противном случае увеличивается выделение газообразных продуктов и сажистого углерода, что ведет к образованию газовых раковин в отливках, а при литье стали – к увеличению объемного науглероживания металла.

В зависимости от объемов производства, массы и вида сплава литниковая система может быть изготовлена из пенополистирола, включая стояк и чашу, или из огнеупорных материалов, возможны и различные комбинации.

На рис. 2 показана 3-мерная модель формы с элементами литниковой системы в сборе. Исходя из геометрических размеров отливки и ее конфи-

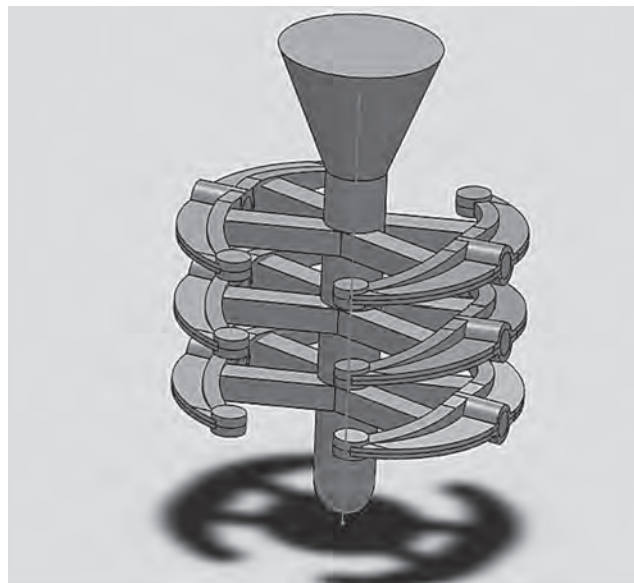


Рис. 2. Форма с элементами литниковой системы

гурации, принято решение изготавливать в одной опоке одновременно шесть отливок.

Расчет параметров литниковой системы проводили на основании рекомендаций, предложенных в работе [5].

Современный этап развития литейного производства характеризуется широким использованием автоматизированных систем моделирования литейных процессов с применением ЭВМ. При разработке технологии изготовления отливок технологические решения, как правило, принимаются на основе многолетнего производственного опыта и интуиции опытных технологов. В производственных условиях разработка технологии в большинстве случаев выполняется методом проб и ошибок, что ведет к значительному увеличению производственных затрат.

В настоящее время на первое место выходит предварительная оценка возможных вариантов изготовления отливок путем математического моделирования сложных гидродинамических и теплофизических процессов формирования отливки. Работу необходимо проводить не только в направлении снижения материалоемкости, создания оптимальной конфигурации изделия, исходя из конкретных условий работы детали, но и с технологической точки зрения литейного производства.

Основная задача математического моделирования заключалась в определении мест вероятного образования пористости в теле отливки. Процесс моделирования проводили в системе «Полигон». Коэффициент теплопередачи приняли равным 1000 Вт/(м<sup>2</sup>·С). Для отливок из стали 35Л при литье в формы из песка линейную усадку металла



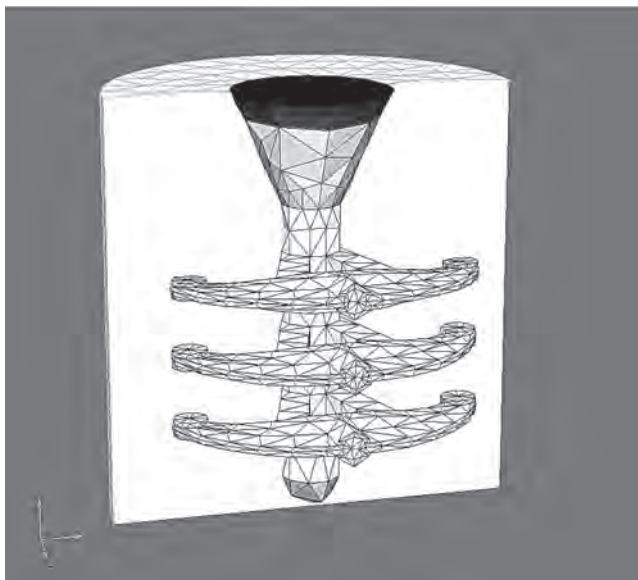


Рис. 3. Моделирование процесса образования пористости

приняли равной 2,2%. Рекомендуемые температуры заливки форм при литье по газифицируемым моделям с толщиной стенки 10–20 мм 1595–1605 °С. Результаты математического моделирования представлены на рис. 3.

Результаты анализа процесса заполнения литейной формы и затвердевания заготовки показали, что разработанная технология литья позволяет вывести усадочную пористость в прибыль.

Для осуществления процесса спроектирована пресс-форма для получения модели из пенополистирола (рис. 4).

В процессе многократного использования формовочных материалов в них происходит накопление продуктов термодеструкции модели, остатков противопожарного покрытия, керамических частиц от литниковой системы, металлических включений и мелкой пылевидной фракции кварцевого песка, как результат его термического разрушения. Все это ухудшает технологические и физико-механические свойства сыпучих формовочных материалов, в частности песка. Поэтому формовочные сыпучие материалы должны подвергаться регенерации. Процесс регенерации включает магнитную сепарацию, просеивание песка и тепловую обработку при температуре 650–700 °С. Одновременно с этим в процессе термической регенерации в кипящем слое из песка удаляются мелкие пылевидные фракции.

Применение регенерации материала формы и каталитического дожига продуктов термодеструкции модели, а также вакуумирование формы в процессе заливки металла и охлаждения отливки позволяет создать экологически чистое производство отливок [6].

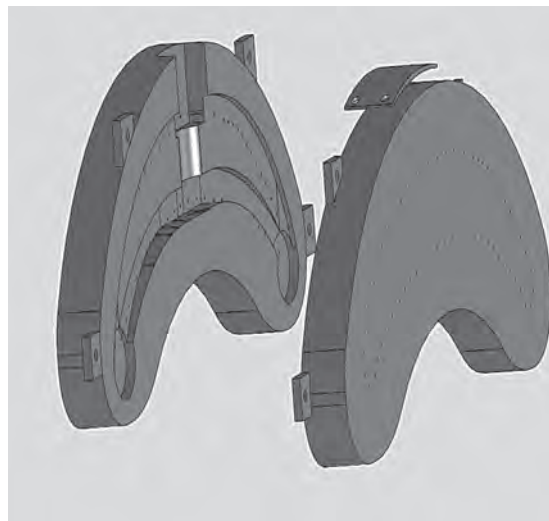


Рис. 4. Пресс-форма для изготовления модели

Необходимо отметить, что в настоящее время на мировом рынке ведущие фирмы стали использовать технологические процессы быстрого прототипирования (RP- Rapid Prototyping), которые наиболее хорошо зарекомендовали себя на начальном этапе разработки технологии. При отработке технологии выявляются недостатки предлагаемой технологии, что влечет за собой изготовление новой усовершенствованной модельной оснастки, а это процесс трудоемкий и занимает длительное время.

Представляют интерес модели, полученные по SLS-технологии (Selective Laser Sintering – селективное лазерное спекание), изготовленные из порошкового полистирола. Такие модели можно получать на SLS-машинах фирмы 3D Systems и EOS. Получаемая полистирольная модель весьма хрупкая и требует аккуратного обращения, поэтому после выращивания модель пропитывают специальным составом на основе парафина при температуре 80 °С. При нагревании модель размягчается, деформируется и требует проведения специальных мероприятий, чтобы деформации не привели к потере модели, что является серьезным недостатком предлагаемой технологии.

Компания CSoft предлагает 3D-принтеры Contex – полноцветный DesignMate Cx и монохромный DesignMate Mx1. С использованием этого оборудования и специальных материалов возможно изготовление выжигаемых моделей. Компания Contex предлагает два вида материалов для производства выжигаемых моделей: zp14 и zp15e, оба на основе целлюлозы. Предпочтителен порошок zp14, дающий меньшую зольность в процессе выжигания, однако его использование возможно только на монохромных принтерах. В силу конструктивных особенностей принтеров применение

порошка zp14 на полноцветных DesignMate Sx невозможно, а монохромные принтеры имеют заметно меньшие размеры рабочей зоны (250×250×200 мм).

RP-технологии можно использовать для быстрого получения выжигаемой модели без изготовления специальной оснастки. По САД-данным, на прототипирующей установке выращивается модель, которая оборудуется литниковой системой, помещается в опоку и заполняется формовочной смесью. После выжигания модели производят прокатку формы и заливку ее металлом.

Для получения выжигаемой модели могут быть использованы 3D-принтеры типа ThermoJet, InVision, ZCorp или более дорогие SLA-машины типа Objet, NextFactory, Viper и т. д. Основные отличия связаны с качеством, чистотой и точностью модели и соответственно с их стоимостью.

Высококачественные отливки с высокой точностью и чистотой поверхности (Rz20 и менее) могут быть получены с использованием технологии «Quick Cast». При построении модели на SLA-машинах с помощью специального программного обеспечения создается сотовая структура тела модели, при ее выжигании образуется значительно меньше золы. SLA-процесс (Stereo Lithography Apparatus, лазерная стереолитография) позволяет строить модели с шагом 0,1–0,025 мм, что обеспечивает высокое качество поверхности модели.

В процессе отработки технологии литья конкретной отливки можно оперативно изменить конфигурацию элементов формы.

В современном литейном производстве для получения прототипов, опытных образцов существует возможность изготовления выжигаемых моделей без использования дорогостоящей оснастки. Для построения выжигаемых моделей используют

трехмерные принтеры, таких фирм, как 3D System и Voxeljet, в качестве модельного материала – пенополистирол.

Однако технология изготовления моделей для массового или серийного производства на трехмерных принтерах является весьма дорогостоящей, поэтому ее используют в единичном, мелкосерийном производстве для создания экспериментальных образцов.

Обобщая технико-экономические показатели производства отливок по газифицируемым моделям и сопоставляя их с традиционными способами литья, можно констатировать, что за счет отсутствия формовочных уклонов, уменьшения припуска на механическую обработку масса отливок при литье по газифицируемым моделям уменьшается на 10–12%, при этом точность изготовления отливок возрастает в 2–5 раз. Трудоемкость формовки и финишных операций снижается на 10–20% при единичном и на 40–60% при серийном производстве отливок. Уменьшается, а в некоторых случаях полностью исключается использование стержней.

Таким образом, в ходе выполнения работы разработаны основные детали литейной оснастки. На основе методов математического моделирования литейных процессов проведен анализ процесса заполнения и затвердевания отливки «Подвес ПНД», определены места наиболее вероятного образования пористости. Скорректированы основные детали литейной оснастки и технологические параметры процесса.

Использование полученных результатов в производстве позволит получить высококачественные литые детали с заданным уровнем свойств при значительном снижении литейного брака.

### Литература

1. Озеров В. А., Шуляк В. С., Плотников Г. А. Литье по моделям из пенополистирола. М.: Машиностроение, 1970.
2. Степанов Ю. А. и др. Литье по газифицируемым моделям. М.: Машиностроение, 1976.
3. Шинский О. И. Новое в теории и практике литья по газифицируемым моделям // Литейное производство. 1991. № 1.
4. Шуляк В. С., Рыбаков С. А., Григорян К. А. Производство отливок по газифицируемым моделям. М.: Изд-во РИЦ МГИУ, 2002.
5. Шуляк В. С. Литье по газифицируемым моделям. СПб.: Професионал, 2007.
6. Шуляк В. С., Шинский О. И., Хвостухин Ю. И. Экологические аспекты литья по газифицируемым моделям // Литейное производство. 1993. № 7.