

УДК 53.084.823

ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В ЛИТЬЕ ПОД НИЗКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Татьяна Игоревна Сивурова

Студентка 5 курса,
кафедра «Литейные технологии»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: В.А. Рыбкин,
доктор технических наук, профессор кафедры «Литейные технологии»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Основы литья под регулируемым давлением

К литью под регулируемым давлением относят способы литья, сущность которых заключается в том, что заполнение полости формы расплавом и затвердевание отливки происходит под действием избыточного давления воздуха или газа.

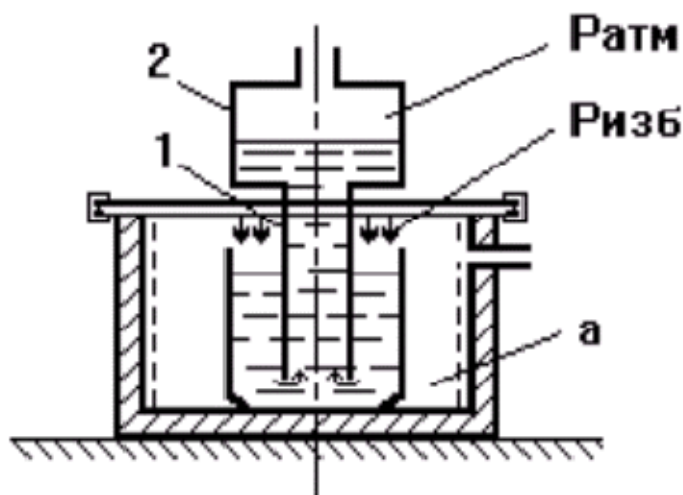


Рис. 1. Способ заполнения - литьем под низким давлением

Литье под регулируемым давлением создает широкие возможности для управления заполнением формы расплавом. Если внутрь герметичной камеры а подавать сжатый воздух или газ под давлением $P_{изб} > P_{атм}$, то за счет разницы давлений расплав поднимется по металлопроводу 1 и заполнит форму 2 до уровня, соответствующего $H = (p_{изб} - p_{атм}) / \rho \cdot g$. Такой способ заполнения называют **литьем под низким давлением** (рис. 1). Термин "низкое давление" используется потому, что для подъема расплава и заполнения формы требуемое избыточное давление менее 0.1 МПа.

Если в герметичной камере б установок создавать вакуум, а в камере а давление поддерживать равное атмосферному, то заполнение формы произойдет за счет разницы давлений $P_{атм} - P$. Такой способ заполнения называют **литьем вакуумным всасыванием** (рис. 2).

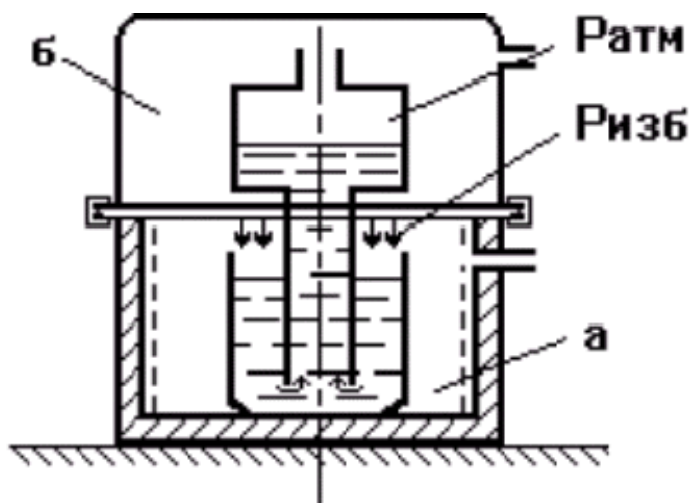


Рис. 2. Способ заполнения - литьем вакуумным всасыванием

Используя схему установки аналогичную данной можно осуществить заполнение формы иначе. Положим, что в камерах а и б вначале создано одинаковое, но больше атмосферного давление воздуха или газа $P_k > P_{атм}$. Затем подача воздуха в камеру б прекращается, а в камеру а продолжается; давление в камере а повышается до $P_k + \Delta P$. Тогда металл будет подниматься по металлопроводу вследствие разницы давлений $P_a - P_b$, т.е. аналогично тому, как и при литье под низким давлением. Того же результата можно достичь, если понижать давление в камере б, оставляя постоянным давление в камере а. Такие процессы называют **литьем под низким давлением с противодавлением**.

Установки для литья под регулируемым давлением - сложные динамические системы, позволяющие в широких пределах регулировать скорость заполнения формы расплавом. Использование таких установок позволяет заполнить формы тонкостенных 9600 оливок, изменить продолжительность заполнения отдельных участков формы отливок сложной конфигурации с переменной толщиной стенки с целью управления процессом теплообмена расплава и формы, добиваясь рациональной последовательности затвердевания отдельных частей отливки.

Приложение давления на затвердевающий расплав позволяет улучшить условия питания, усадки отливки, повысить ее качество - механические свойства и герметичность. В рассматриваемых процессах после заполнения формы давление действует на расплав, который из тигля через металлопровод поступает в затвердевающую отливку и питает ее. Благодаря этому усадочная пористость в таких отливках уменьшается, плотность и механические свойства возрастают.

Литье под регулируемым давлением осуществляется на установках так, что процесс заполнения формы расплавом - самая трудоемкая и неприятная с точки зрения охраны труда и техники безопасности операция - выполняется автоматически. Конструкции установок и машин для этих литейных процессов обеспечивают также автоматизацию операций сборки и раскрытия форм, выталкивания отливки и ее удаления из формы. Таким образом, процессы литья под регулируемым давлением позволяют повысить качество отливок и обеспечить автоматизацию их производства.

В практике наибольшее применение нашли следующие процессы литья под регулируемым давлением: литье под низким давлением, литье под низким давлением с противодавлением, литье вакуумным всасыванием, литье вакуумным всасыванием с кристаллизацией под давлением (вакуумно - компрессионное литье).

Литье под низким давлением

Тигель с расплавом в раздаточной печи (камере) установки герметично закрывают крышкой в которой установлен металлопровод, изготовленный из жаростойкого материала. Металлопровод погружают в расплав так, что конец его не достает до конца тигля на 40...60 мм. Форму, установленную на крышке, соединяют с металлопроводом литниковой втулки. Полость в отливке может быть выполнена металлическим, оболочковым или песчаным стержнем.

Воздух или инертный газ под давлением до 0.1 МПа через систему регулирования поступает по трубопроводу внутрь камеры установки и атмосферным давлением расплав поступает в форму снизу через металлопровод, литник и коллектор со скоростью, регулируемой давлением в камере установки. По окончании заполнения формы и затвердевания отливки автоматически открывается клапан, соединяющий камеру установки с атмосферой. Давление воздуха в камере снижается до атмосферного и незатвердевший расплав из металлопровода сливается в тигель. После этого форма раскрывается, отливка извлекается и цикл повторяется.

Основными преимуществами процесса литья под низким давлением являются: автоматизация трудоемкой операции заливки формы; возможность регулирования скорости потока расплава в полости формы изменением давления в камере установки; улучшение питания отливки; снижение расхода металла на литниковую систему.

Основные недостатки невысокая стойкость части металлопровода, погруженной в расплав, что затрудняет использование способа литья для сплавов с высокой температурой плавления; сложность системы регулирования скорости потока расплава в форме, вызванная динамическими процессами, происходящими в установке при заполнении ее камеры воздухом, нестабильностью утечек воздуха через уплотнения, понижением уровня расплава в установке по мере изготовления отливок; возможность ухудшения качества сплава при длительной выдержке в тигле установки; сложность эксплуатации и наладки установок.

Преимущества и недостатки способа определяют рациональную область его применения и перспективы использования. Литье под низким давлением наиболее широко применяют для изготовления сложных фасонных и особенно тонкостенных отливок из алюминиевых и магниевых сплавов, простых отливок из медных сплавов и сталей в серийном и массовом производстве.

Особенности формирования отливки при литье под низким давлением. Заполнение форм расплавом при этом способе литья может осуществляться со скоростями потока, которые можно регулировать в широком диапазоне. Для получения качественных отливок предпочтительно заполнять форму сплошным потоком, при скоростях, обеспечивающих качественное заполнение формы и исключающих захват воздуха расплавом, образование в отливках газовых раковин, попадание в них окисных пленок и неметаллических включений. Однако уменьшение скорости потока, необходимое для сохранения его сплошности может вызвать преждевременное охлаждение и затвердевание расплава, т.е. до полного заполнения формы. Поэтому, как и в других литейных процессах, важно согласовывать гидравлические и тепловые режимы заполнения формы расплавом.

В зависимости от сочетания конструктивных и пневматических параметров установки движение расплава в металлопроводе и литейной форме при заполнении может происходить как при возрастающей скорости потока, так и при колебательном ее изменении. Колебательный характер изменения скорости отрицательно влияет на качество отливок, поэтому конструкция установки и режим работы ее пневмосистемы, а также конструкция вентиляционной системы формы должны способствовать гашению колебаний скорости.

Основными конструктивными параметрами установки являются: объем рабочего пространства камеры, площадь поперечного сечения отверстия металлопровода, площадь зеркала расплава в тигле.

Увеличение объема рабочего пространства камеры установки увеличивает скорость потока, способствует гашению колебаний, но полностью их не исключает.

Уменьшение площади сечения отверстия металлопровода в установках с объемом рабочего пространства менее 0.07 м^3 приводит к резкому гашению колебаний и увеличению скорости течения расплава, в установках с объемом рабочего пространства более 0.4 м^3 увеличение площади сечения отверстия металлопровода не влияет на характер движения потока и скорость расплава на входе в форму.

Увеличение площади зеркала расплава в тигле при условии постоянства массы расплава в нем способствует спокойному заполнению. Поэтому установки с тиглем ванного типа, в которых зеркало расплава достаточно велико, более предпочтительны, так как обеспечивают устойчивый режим работы.

Увеличение гидравлического сопротивления на входе расплава в металлопровод приводит к снижению ускорения расплава в начале заполнения и гасит возникающие колебания.

Важное значение для обеспечения постоянства заданной скорости от заливке к заливке, т.е. по мере понижения уровня расплава в тигле, имеет система управления подачей воздуха в камеру установки. Системы регулирования по величине давления целесообразно использовать только в установках ванного типа. При этом точность регулирования должна быть в пределах $0.01 \dots 0.05 \text{ МПа}$; это обеспечивает поддержание скорости заливки с погрешностью $10 \dots 15 \%$. Для установок ванного типа используют дроссельные системы регулирования.

Конструкция полости формы и конструкция ее вентиляционной системы также оказывают влияние на характер движения расплава в полости формы. При заполнении форм сложных отливок с ребрами, бобышками создаются условия для захвата воздуха потоком расплава. Гидравлическое сопротивление полости формы оказывает существенное влияние на характер движения потока. Конструкция вентиляционной системы влияет на характер движения потока расплава в полости формы и металлопроводе. Уменьшение площади вентиляционных каналов приводит к возрастанию противодавления воздуха в полости формы, способствует гашению колебаний и снижает скорость потока расплава.

Тепловые условия формирования отливки создают возможность направленного затвердевания отливки и питания ее усадкой. Части формы, расположенные на верхней плите рабочей камеры установки нагреваются до температуры большей, чем верхняя часть формы. Кроме того, через нижние сечения полости формы, расположенные ближе к металлопроводу, проходит большее количество расплава, чем через сечения, расположенные в верхней части, что существенно увеличивает разницу температур в нижней и верхней частях отливки. Поэтому массивные части отливки, требующие питания, располагают внизу формы, соединяют их массивными литниками с металлопроводом; сверху же формы располагают части отливки, не требующие питания.

Статическое давление на расплав по окончании заполнения формы улучшает контакт затвердевающей корочки и поверхности формы, вследствие чего увеличивается скорость затвердевания отливки. Вместе с тем давление воздуха на расплав в тигле способствует постоянной подпитке усаживающейся отливки, в результате чего уменьшается усадочная пористость, возрастает плотность и повышаются механические свойства отливки.

Избыточное давление в потоке расплава при заполнении формы больше, чем при гравитационной заливке, и гидравлический удар, который может возникнуть при окончании заполнения формы, приводит к прониканию расплава в поры песчаного стержня, появлению механического пригара на отливках.

При литье под низким давлением стремятся заполнить форму расплавом с возможно меньшим перегревом, достаточным для хорошего заполнения формы. С уменьшением толщины стенки отливки и увеличением ее размеров температуру заливки принимают большей. Литниковые системы конструируют с учетом литейных свойств сплава и конструкции отливки. Для отливок простой конфигурации литниковая система может состоять из одного литника, непосредственно примыкающего к массивной части, для более сложных тонкостенных отливок - из литника, литниковых ходов, коллектора и питателей.

Литье с противодавлением

Развитие литья под низким давлением является литье с противодавлением. Установка для литья с противодавлением состоит из двух камер. В камере, устройство которой подобно герметической камере установки литья под низким давлением, располагается тигель с расплавом. В камере находится форма, обычно металлическая. Камеры разделены герметичной крышкой, через нее проходит металлопровод, соединяющий тигель и форму. Эти камеры прочно соединены друг с другом зажимами.

Давление воздуха, под которым происходит заполнение формы расплавом, будет соответственно равно разнице давлений в нижней P_a и верхней P_b камерах установки: $P = P_a - P_b$. Скорость подъема расплава в металлопроводе и полости формы так же, как и при литье под низким давлением, будет зависеть от всей совокупности рассмотренных выше конструктивных и пневматических характеристик системы, определяющих скорость нарастания разницы давлений P , во время работы установки.

Литье с противодавлением позволяет уменьшить выделение газов из расплава, улучшить питание отливок и вследствие этого повысить их герметичность, а также механические свойства. Этот способ литья дает наибольший эффект при изготовлении отливок с массивными стенками равномерной толщины из алюминиевых и магниевых сплавов, кристаллизующихся в широком интервале температур. Использование второй стадии процесса - кристаллизации под всесторонним избыточным давлением для тонкостенных отливок не всегда приводит к заметному улучшению свойств. Это объясняется тем, что продолжительность кристаллизации тонкостенных отливок мала и отливка затвердевает прежде, чем давление в верхней камере установки достигнет необходимой величины.

Литье вакуумным всасыванием

Сущность процесса литья вакуумным всасыванием состоит в том, что расплав под действием разряжения, создаваемого в полости формы, заполняет ее и затвердевает, образуя отливку. Изменением разности между атмосферным давлением и давлением в полости формы можно регулировать скорость заполнения формы расплавом, управляя этим процессом. Вакуумирование полости форм при заливке позволяет заполнить формы тонкостенных отливок с толщиной стенки 1...1,5 мм, исключить попадание воздуха в расплав, повысить точность, и механические свойства отливок.

В производстве используют установки двух основных разновидностей.

Установки первого типа имеют две камеры: нижнюю и верхнюю. Нижняя камера представляет собой раздаточную печь с электрическим или газовым обогревом, в которой располагается тигель с расплавом. Верхняя камера расположена на крышке нижней камеры, в крышке установлен металлопровод. Форму устанавливают и

закрепляют в камере так, чтобы литник соединялся прижимами с крышкой. Полость верхней камеры через вакуум-привод соединена с ресивером, в котором насосом создается разрежение, регулируемое системой управления. В начальный момент клапан управления открывается, в верхней камере создается разрежение, и расплав вследствие разницы давлений в камерах по металлопроводу поднимается и заполняет полость формы. После затвердевания отливки клапан системы управления соединяет полость верхней камеры с атмосферой, давление в обеих камерах становится одинаковым, а остатки незатвердевшего расплава сливаются из металлопровода в тигель. Верхняя камера снимается, форма с отливкой извлекается и цикл может повторяться.

Установки такого типа используют обычно для улучшения заполнения форм тонкостенных сложных фасонных отливок из алюминиевых и магниевых сплавов с толщиной стенки 2...2.5 мм, а иногда и до 1...1.5 мм.

Установки второго типа используют для отливки втулок, слитков и заготовок простой конфигурации в водоохлаждаемых системах кристаллизаторы. Носок металлического водоохлаждаемого кристаллизатора погружается в расплав, находящийся в тигле раздаточной печи. Рабочая полость кристаллизатора, образующая отливку, соединяется вакуумом-проводом с вакуумным ресивером. Разрежение в системе создается вакуумом-насосом и регулируется натекателем. Поворотом распределительного крана рабочая полость кристаллизатора соединяется в вакуумным ресивером. В полости кристаллизатора создается разрежение, и расплав всасывается внутрь кристаллизатора, поднимаясь на высоту, пропорциональную разрежению $h_{рт}$ и обратно пропорционально ее плотности. После затвердевания отливки носок кристаллизатора извлекают из ванны расплава, поворотом крана, рабочую полость соединяют с атмосферой и отливка выпадает из кристаллизатора в приемный короб.

Особенности формирования отливки. Форма может заполняться расплавом с требуемой скоростью, плавно, без разбрызгивания, сплошным фронтом; расплав, заполнивший форму, затвердевает в условиях вакуума; газы, содержащиеся в расплаве, могут из него выделяться, благодаря чему создаются условия для получения отливок без газовых раковин и пористости. Для получения плотных отливок без усадочных дефектов необходимо согласовывать интенсивности затвердевания и питания отливки.

Обычно при литье вакуумным всасыванием слитков, втулок, расплав засасывают в тонкостенный металлический водоохлаждаемый катализатор, благодаря чему отливка затвердевает с высокой скоростью.

Таким способом можно получать тонкостенные отливки типа втулок без стержней. В этом случае после всасывания расплава в кристаллизатор и намораживания на внутренних стенках кристаллизатора корочки твердого металла заданной толщины вакуум отключается и незатвердевший расплав сливается обратно в тигель. Таким образом получают плотные заготовки втулок без газовых и усадочных раковин и пористости. Способ позволяет получать отливки из легких цветных и медных сплавов, чугуна и стали. Наиболее часто этот способ используется для литья заготовок втулок, вкладышей, подшипников скольжения из дорогостоящих медных сталей. При этом наиболее ярко проявляются **основные преимущества** данного способа: спокойное заполнение формы расплавом с регулируемой скоростью, сокращение расхода металла в следствии устранения литников и прибылей, автоматизация процесса заполнения формы.

Структура САПР литейной технологии используемой для литья под низким давлением

Для литейного производства и науки современный аппарат исследований органично включает модели, алгоритмы и программы для описания

гидродинамических, тепловых, усадочных и ряда других процессов, происходящих при течении металла, затвердевании и формировании структуры отливки. Программные продукты, содержащие комплекс этих средств, объединенных в технической литературе под термином «Система автоматизированного моделирования» (САМ) и формируют активно развивающуюся область объективного анализа литейной технологии.

Независимое развитие средств синтеза и анализа литейной технологии создает углубляющееся размежевание методологии научной специализации программ для ЭВМ. Синтез ЛТ представляет собой комплекс проектных и расчетных процедур, выполняемых для формирования набора текстовой и графической документации, необходимой для производства отливок. Анализ ЛТ представляет собой систему расчетных процедур, необходимых для оценки качества технологической разработки. Интеграция различных программных модулей, выполняющих функции синтеза и анализа ЛТ, осуществляется в интегрированной САПР.

Основные потребительские функции ИСАПР реализуются с помощью универсальных модулей, которые инвариантны к условиям проектирования и производства (конфигурация отливки, способ литья, технологическое оборудование).

Проектирование технологии производится в несколько этапов:

- этап формирования эскизного варианта в части расположения отливки в пространстве, выбора схемы подвода металла, питания.
- этап проектирования литой детали, определение размерных и режимных параметров технологии.
- этап формирования технологической документации.

В дальнейшем, на основании результатов численного анализа отдельных этапов или сквозного моделирования технологии производится прогнозирование размеров литейных дефектов, механических свойств и структуры, происходит корректировка технологии изготовления отливок. В частности, для изготовления литых заготовок деталей из алюминиевых сплавов, к которым предъявляются повышенные требования по прочности, пластичности, герметичности, гидроплотности, при толщине стенки не более 1,5 мм может быть предложен метод литья под низким давлением.

В настоящее время существуют различные точки зрения относительно структуры и функций САПР литья под низким давлением, в литературе также имеется множество разрозненных моделей, описывающих отдельные процессы, протекающие при формировании отливки, изготавливаемой ЛНД. Однако, численное моделирование любого из процессов, имеющих место при изготовлении отливок, с точки зрения непосредственного использования его результатов в условиях реального производства, технологически и экономически оправданно только в случае, если математическая модель реализована в виде законченного программного продукта, адаптированного к условиям конкретной технологии. В противном случае численное моделирование становится достоянием узкого круга профессионалов-разработчиков, оторвано от условий реального производства и разработки технологии.

Анализ публикаций показывает, что в отечественной литературе отсутствуют описания САПР ЛНД, основанных на детерминированных моделях, описывающих все стадии процесса ЛНД. Имеются лишь описания САПР на основе имперических зависимостей, позволяющие для конкретной отливки подобрать оптимальные режимы заполнения и параметры технологии, обеспечивающие эти режимы.

В последние годы появились публикации болгарских специалистов ведущих работу над разработкой САПР ЛНД на основе дорогостоящего программного продукта MAGMASOFT. Принципиальная схема предлагаемой ими САПР включает следующие блоки:

1. Программный модуль заполнения формы на основе уравнения Навье-Стокса, решение которого дает распределение скоростей и давлений по сечению отливки.

2. Модуль численного расчета формирования дефектов типа газоусадочной пористости, так как считается, что механические свойства отливок зависят от их микроструктуры (модуль построен на основе системы нелинейных диффур, включающих уравнения сплава, междендритной диффузии, массопереноса, уравнения баланса водорода, с его помощью появляется возможность проанализировать влияние параметров процесса ЛНД на образование пористости в отливках).

3. Матмодель, описывающая изменение давления газа над расплавом в амуре установки и в форме, дающая возможность предложить закон изменения давления газа, который обеспечил бы контроль над заполнением формы расплавом и задавал определенную в модуле 1 скорость движения металла.

4. Модуль определения теплофизических характеристик системы форма-металл на основе экспериментов и результатов работы пакета MAGMASOFT.

5. Модуль оптимизации параметров процесса ЛНД.

В настоящее время в результате развития и увеличения количества работ по численному моделированию ряда литейных процессов могут быть получены достоверные представления о гидравлических и гидродинамических параметрах заливки форм, интенсивности теплообмена и распределении температур в отливке при затвердевании и остывании, а также кинематике формирования литой структуры. На основе результатов моделирования разработаны и внедрены в производство системы автоматизированного проектирования литейной технологии для производства отливок из чугуна, стали и ряда цветных сплавов. Однако до сих пор не осуществлен надлежащий системный анализ взаимосвязанных процедур синтеза ЛТ для литья под низким давлением.

Математические модели процесса движения расплава

Анализ литературных данных показывает, что наличие большого количества параметров, определяющих режим течения металла привел к тому, что до настоящего времени отсутствует единая методика подхода к расчету движения расплава. Существующие в настоящее время методы решения условно можно разделить на две группы.

В первой из них используется сложный математический аппарат теоретической гидродинамики, прилагаемый к достаточно простым схемам движения жидкости, при допущениях и предположениях, упрощающих сложную картину течения жидкости. В частности, при таком подходе не водятся усредненные характеристики потока. Интегрированием уравнения Навье-Стокса аналитически или численными методами получается детальная картина течения потока металла. Несмотря на высокую сложность решения, именно эта группа задач переживает в последнее десятилетие свое «второе рождение».

Первой и главной причиной этого является использование возможностей, которые открылись в связи с постоянно прогрессирующим развитием электронно-вычислительной техники. Становятся доступными не только расчеты, ранее немислимые из-за их сложности, но и эксперименты качественно иного типа – эксперименты с использованием ЭВМ, имеющие ряд несомненных преимуществ по сравнению с натурными. Второй причиной служит значительное расширение арсенала математических средств, применяемых в гидродинамике.

Но, как ни странно, именно эти причины, расширяющие границы применения методов гидродинамики, являются в настоящее время своего рода «ограничителями». Высокие требования к вычислительной технике, продолжительные по времени

расчеты, высокоточные геометрические модели – все это зачастую становится препятствием использования этих методов, в особенности, в условиях производства, где это более всего необходимо. Большая продолжительность расчетов по времени делает нерентабельным использование этих методов в условиях быстрой смены номенклатуры выпускаемых изделий.

Все эти причины, очевидно, определили потребность и повсеместное использование другой группы решений гидравлической задачи течения металла, в которой используются методы технической гидромеханики, базирующейся на результатах экспериментальных исследований, существенно упрощенных картинах течения и оценках только главных характеристик изучаемого явления, которые определяются осредненными характеристиками. Эти методы позволяют дать более или менее приближенные ответы на большинство вопросов литейной практики.

В частности, возникающие при математическом описании процесса течения металла в системе тигель-металлопровод-полость литейной формы в установке ЛНД трудности приводят к тому, практически во всех случаях при разработке математических моделей приходится прибегать к их идеализации, внося ряд допущений. Подробный анализ существующих моделей, описывающих этот процесс дан в монографии Г.П. Борисова.

Автор отмечает, что в первых моделях процесса движения жидкого металла при заливке форм ЛНД, представленных в работах 60-70х годов, при описании процесса было принято уравнение Бернулли. Однако автор считает, что применимость этой модели ограничивается тем условием, что на всем протяжении потока его движение должно быть плавно изменяющимся, кроме того, «расчет напора, затрачиваемого на преодоление сил инерции находящейся между рассматриваемыми сечениями жидкости, строго говоря, требует определения направления и длины линий тока между этими сечениями, что определяет весьма сложную задачу».

Дальнейшие исследования авторов Б.К. Уразбаева, Б.С. Чуркина и В.Н. Майорова привели к тому, что для описания движения расплава под действием создаваемого в камере установки избыточного давления p_y было предложено использовать неоднородное нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$(zA_M + B_M) \frac{d^2 z}{dt^2} + D_M \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 + C_M z = p_y,$$

где A_M , B_M , C_M , D_M – коэффициенты, характеризующие соотношения постоянных параметров (ρ , g , F_M – сечение металлопровода, F_T – сечение тигля).

В более поздних работах начала 90-х годов Л.Ю. Тихонравова, Э.Б. Гофмана, В.К. Шнитко и др. исследователей свердловской школы движение расплава было опять таки описано уравнением гидравлики – уравнением Бернулли.

Анализируя характер влияния на режимы заливки форм изменения давления газа по заданному закону, определяемому значениями исходного давления газа в подводящей давление сети, мы можем наблюдать, что в данном случае характер изменения давления газа в установке подчиняется экспоненциальному закону:

$$P_y = P_{BX} [1 - \exp(-\beta t)],$$

где β – газодинамический фактор, определяющий темп нарастания и перепада давления, описываемый империческим уравнением типа:

$$\beta = A (\mu_d \omega_d)^\alpha Z^\gamma P_{BX}^\chi V_S^\nu,$$

где μ_d - коэффициент расхода газовой системы, ω_d - площадь проходного сечения дросселирующего устройства, V_3 - величина усреднено учитывающая изменение объема воздуха в зависимости от геометрических параметров, A , α , ν , γ - расчетные коэффициенты, для вычисления которых предложены громоздкие имперические формулы с большим количеством трудно определяемых коэффициентов.

Недостатки формулы вполне очевидны. Одним из них является назначение величины β , определение которой связано с расшифрованием назначения входящих в формулу эмпирических параметров. Вторым наиболее существенным недостатком является то, в результате расчета по формуле определяется конечное значение перепада давления, независимо от характера изменения давления газа над расплавом в тигле и форме, и в этом случае характер изменения носит экспоненциальный закон, несмотря на то, что изменение рабочего давления в камере установки может носить более сложный характер.

Диагностика режимов заливки.

Основная цель выбора оптимальных режимов заливки – отсутствие дефектов в отливке, возникающих на стадии заполнения формы. Каждый из гидравлических параметров процесса заполнения формы жидким расплавом может определять возникновение конкретного вида литейного брака. Основной проблемой на этапе анализа гидравлического режима является учет многофакторности процесса. Взаимное влияние параметров течения расплава может определять совершенно противоположные результаты при изменении значения одной из этих величин.

Анализ критериев диагностической оценки гидравлического режима течения расплавленного металла безотносительно от способа литья был проведен в диссертационной работе О.В. Прихожего. Среди же большого количества критериев диагностической оценки процесса ЛНД, как уже отмечалось, следует выделить:

1. Степень турбулентности потока.
2. Скорость, обеспечивающая отсутствие фонтана.
3. Захват плены в тело отливки.
4. Оптимальную продолжительность заполнения литейной формы.

В литературе предложены различные построенные по экспериментальным данным номограммы для определения конкретных параметров получения той или иной отливки при литье под низким давлением, обеспечивающие оптимальные с точки зрения рассмотренных критериев режимы

Проведен обзор существующих методов расчета указанных критериев, а также влияющих параметров, по данным различных авторов для конкретных отливок, выполняемых методом ЛНД из алюминиевых сплавов. Такая привязанность расчетных формул для оценки критических значений параметров гидравлического режима делает актуальной задачу использования принципов, методов и средств фундаментальных и технических наук для преодоления прикладных проблем литейного производства, одним из методов решения которых является построение детерминированных моделей процессов, происходящих в литейной форме и при ЛНД в частности.

Математические модели процесса образования газоусадочной пористости.

Основным дефектом, поражающим отливки из алюминиевых сплавов на стадии затвердевания, является газоусадочная пористость. Склонность литейных сплавов к этому явлению хорошо известна и литейщики имеют с ним дело каждый день. Существуют различные способы борьбы с газовой пористостью в отливках, одним из них является дегазация расплава перед заливкой. Метод ЛНД предоставляет еще один

способ борьбы с этим пороком – повышение газового давления над затвердевающим расплавом в форме, об эффективности этого способа пишут многие авторы.

В литературе не существует диагностических критериев оценки образования газоусадочной пористости, поэтому также как и для диагностики режимов заполнения одним из методов решения этой задачи является построение детерминированной модели. В 80-х годах как в отечественной, так и в зарубежной литературе появляются модели, описывающие процесс порообразования. Все они основываются на том, что пузырьковое выделение водорода возможно лишь на подложке, которой является растущий дендрит, при условии, что действительное содержание водорода в расплаве при данных условиях становится выше критического содержания водорода в сплаве при этих условиях.

Различие в этих моделях состоит в том, что в одних из них рассматривается чисто процесс образования газовой пористости, в других первичным рассматривается процесс образования усадки, а самостоятельное формирование газовой пористости не учитывается, считается лишь, что высвободившийся в ходе кристаллизации водород за счет резкого снижения его растворимости в твердой фазе по отношению к жидкой заполняет образующиеся усадочные поры. Однако, разделение пористости на усадочную и газовую весьма условно, поэтому необходимо рассматривать эти процессы во взаимосвязи как равновероятные.

В моделях авторов показано, как термодинамические данные сплава могут быть скомбинированы с моделью кристаллизации сплава, в ходе которой образуется дендритная структура, для описания условий образования газовой пористости. В частности, для описания дендритной структуры используется понятие первичной оси дендритов, которая определяется через градиент температур и скорость кристаллизации следующим выражением:

$$d_1 = \overline{AG}^\alpha R^\beta$$

где $\overline{G} = \frac{T_L - T_s}{W}$ (-ширина зоны затвердевания), A , α , β - коэффициенты.

Можно с уверенностью сказать, что применение этой формулы достаточно ограничено, так как в нее входят трудно поддающиеся измерению коэффициенты. Поэтому видится необходимым переработать эту формулу таким образом, чтобы в нее входили характеристики, влияющие на величину G и R , и были известны для данного конкретного сплава и формы из справочников.

Недоработкой авторов является также и то, что они рассматривают изменение растворимости водорода в расплаве лишь за счет изменения температуры, не включая во внимание влияние локального давления, которое в свою очередь является функцией многих параметров.

Еще одной слабостью этих моделей является то, что все расчеты характеристик сплавов рассчитываются из равновесной двойной диаграммы состояния (Al-Cu) и не учитывается влияние различных технологических факторов на эти характеристики. Решением этой проблемы может быть создание термодинамической модели многокомпонентного сплава, основанной на фундаментальной физико-химической характеристике – энергии Гиббса, которая бы выступила в качестве информационной базы для тепловой задачи и задачи кристаллизации многокомпонентного сплава.

Постановка задачи

Процесс изготовления отливки определяется в общем виде двумя основными этапами: этапом заполнения полости формы и этапом затвердевания и образования структуры. Значение каждого из них достаточно велико, оба они являются

взаимосвязанными, что обязательно должно быть учтено при формировании технологии получения качественной отливки, особенно это актуально для метода ЛНД.

В этих условиях на первый план выходит задача создания концепции САПР применительно для ЛНД, вторым вопросом является разработка компьютерных моделей, входящих в разрабатываемую САПР.

Процесс заполнения полости формы расплавом изучается довольно давно и является предметом дискуссии не одного поколения литейщиков, но единого мнения по поводу формы математического описания данного процесса не существует. Процесс заполнения форм при ЛНД осложняется тем, что он тесно связан с газодинамическими процессами, протекающими в установке во время заливки формы. Сложность и многофакторность протекающих на этой стадии процессов определяет потребность в формировании отдельных гидрогазомеханической и термогидродинамической математических моделей. До настоящего времени остаются не вполне изученными следующие основные моменты:

1. В каком виде основные уравнения классической гидравлики могут быть использованы для описания закономерностей течения металла в форме при различных способах заливки.

2. В какой мере возможно совместное решение гидрогазомеханической и термогидродинамической задач течения металла, когда выходные параметры первой из них становятся исходными для расчета гидродинамической картины течения и охлаждения расплава в форме при ЛНД.

3. Каковы прикладные аспекты изучения рассматриваемого этапа формирования отливки при ЛНД, как с точки зрения анализа и диагностики гидравлического режима течения металла, так и регулирования оптимальных соотношений технологических параметров установки ЛНД.

Вторым и заключительным этапом формирования отливки является процесс охлаждения расплава в форме и кристаллизация отливки. Именно на этой стадии имеются предпосылки для возникновения газоусадочной пористости, которая поражает отливки и при ЛНД в том числе. Этот процесс определяется как тепловыми так условиями так формирования отливки, так и свойствами сплава и конфигурацией формы. Наиболее результативными с точки зрения полноты анализа процесса представляется совместное решение сопряженных задачи теплообмена отливки с формой, задачи кристаллизации, отягощенной расчетом теплофизических характеристик и параметров кристаллизации в каждый момент времени, и задачи образования пористости.

Литература

1. Ю.А. Степанов, Г.Ф. Баландин, В.А. Рыбкин. Технология литейного производства. - М.: Машиностроение, 1983.

2. Б.С. Чуркин, Э.Б. Гофман, А.Б. Чуркин и др.: - Екатеринбург: Изд-во УГППУ, - 2000. - 662 с. Гриф Минобразования РФ. Чуркин Б.С., Гофман Э.Б., Чуркин А.Б., Категоренко Ю.И. Теория литейных процессов.

3. В.К. Шнитко. Основные технологические параметры процесса получения тонкостенных отливок под низким давлением/ Процессы литья, 1991, 4, 48-52с

4. Э.Б. Гофман, А.Б. Чуркин, А.Ю. Шаболин. Автоматизация технологических расчетов при литье под низким давлением. Сборник научных статей. Свердловск, 1990г.