



The main principles of working of the new type system for automated projection of optimal foundry technology are described. The examples on development of foundry technology for casting of safety valve body of oil-gas hardware are given.

Е. О. ОЛЬХОВИК, В. В. ДЕСНИЦКИЙ,
Санкт-Петербургский институт машиностроения

УДК 621.74.041

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СРЕДСТВ ОПТИМАЛЬНОГО ПИТАНИЯ ОТЛИВОК НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ ЛИТЕЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Разработка оптимального варианта литейной технологии для стальных фасонных отливок является наиболее сложной задачей. В условиях промышленного производства разработка литейной технологии производится экспериментальными методами, основанными, как правило, только на собственном опыте инженера-технолога. При этом поиск лучших условий формирования металла решается методом проб и ошибок на экспериментальных отливках. Существующие современные системы компьютерного моделирования литейных процессов существенно снижают трудоемкость разработки литейной технологии. При моделировании процесса затвердевания выявляются дефекты в виде усадочной пористости или местной рыхлоты. После их обнаружения технологический процесс перерабатывается, изменяются форма и размеры приливов, местные напуски, производится установка дополнительных средств управления затвердеванием. В результате большого количества таких попыток формируется удовлетворительный вариант литейной технологии, но не всегда оптимальный. Методы численного анализа технологических процессов литья, точность которых постоянно возрастает, в настоящее время позволяют успешно решать задачи оптимизационного формоизменения при условии наличия значительной научной и методической базы.

Настоящая работа направлена на создание альтернативных моделей и методик для системы нового типа, которая в автоматизированном режиме рассчитывает и формирует средства управления затвердеванием, оптимальные для конкретной отливки, при этом учитываются различные технологические условия и факторы. Новый принцип проектирования литейной технологии заключается в следующем: для литой детали численными методами рассчитываются необходимые количественные параметры для обеспечения заданных

условий затвердевания и питания отливки. Затем под эти необходимые условия методом последовательного добавления и оптимизации подбираются средства управления затвердеванием, которые могут обеспечить оптимальную литейную технологию. Основой парадигмы разрабатываемой системы является принцип того, что отливка подбирает для себя требуемые средства управления затвердеванием.

Наиболее успешной схемой проектирования литейной технологии является создание в отливке направленного затвердевания. Для обеспечения плотного строения металла требуется создание необходимых температурных условий затвердевания. Для оценки направленности затвердевания в работе [1] нами был предложен специальный расчетный критерий в виде распределения локального параметра направленности затвердевания:

$$G = \frac{\Delta\tau}{\Delta l \tau_1}, 1/\text{см},$$

где $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$; $\tau_1, \tau_2, \text{с}$ — продолжительность затвердевания металла соответственно в исследуемой точке отливки и в точке, отстоящей на расстояние Δl в направлении питания отливки. Значения локального параметра направленности затвердевания отражают степень питания элемента отливки, тогда распределение параметра направленности затвердевания является аналогом распределения пористости металла в отливке. Полученные нами ранее экспериментальные взаимосвязи [2] изменения механических свойств литого металла от локального параметра направленности затвердевания G позволили разработать критерий для получения плотного металла отливки, а именно при выполнении условия $G > 0,1, 1/\text{см}$, можно достигнуть исключения случая, при

котором внутренние области отливки имеют пониженные механические свойства. Тогда распределение локального параметра направленности затвердевания для всего объема отливки рассматривается как критерий получения плотного строения металла отливки. Для организации режима направленного затвердевания в каждом локальном объеме отливки необходимо создать требуемую величину параметра направленности затвердевания.

Примером группы отливок, где важным является получение плотного строения металла, служат литые детали арматуры для нефтегазовой промышленности. Эти отливки наиболее сложные для разработки литейной технологии, поскольку имеют протяженную или кольцевую форму при больших отношениях длины к ширине или толщине стенки. Для данной группы отливок все массивные узлы должны быть питаемыми, обеспечено также прямое питание стенок отливки при затвердевании.

В качестве объекта для исследований был выбран корпус предохранительного клапана, предназначенного для автоматической защиты оборудования от аварийных изменений параметров рабочей среды. На начальном этапе для поиска мест оптимального расположения и формы прибылей отливка корпуса клапана (без литейной технологии) и окружающая ее форма разбиваются на конечные элементы, предназначенные для численных методов расчета затвердевания. В результате анализа температурных полей формируется расчетное поле продолжительности затвердевания для металла отливки. Анализируя температурные поля рассматриваемой детали без прибылей, выявляются зоны с наибольшей продолжительностью затвердевания. Для корпуса предохранительного клапана расчетное распределение локального параметра направленности затвердевания показано на рис. 1. Отдельные зоны литой детали имеют пониженные значения параметра направленности затвердевания за счет отсутствия питания. В соответствии с выбранным критерием получения плотного строения металла ($G > 0,1$, $1/\text{см}$) около 40% от объема детали не имеет достаточного питания.

Для осуществления наилучшего питания необходимо добиться, чтобы жидкий металл подавался в отливку по кратчайшему пути, что обеспечивается использованием прибылей прямого действия. Размер основания прибылей определяется геометрией горизонтальных сечений отливки и объемом термического центра, при этом термический центр выявляется в виде набора элементов, имеющих продолжительность затвердевания более 60% от времени полного затвердевания отливки. Такое процентное соотношение для установления термического центра соответствует моменту затвердевания, когда сформировался дендритный каркас отливки и дальнейшее питание жидким металлом уже затруднительно. Расчет размеров основания прибылей также основывается

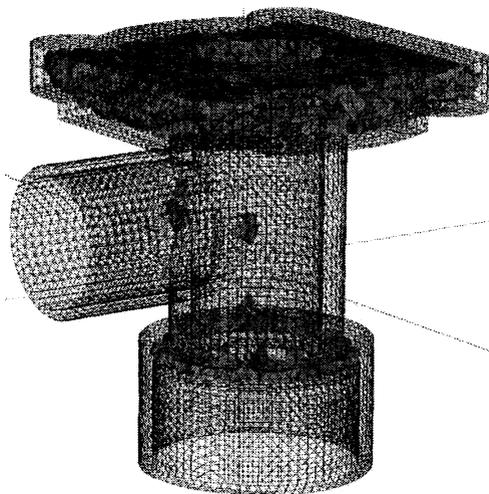


Рис. 1. Корпус клапана

на модели ее работы, где главным является соотношение продолжительности затвердевания участка отливки и прибыли. Модель теплового действия прибылей построена на создание направленного затвердевания за счет теплового влияния прибылей на термические центры отливки. Установка прибылей на выявленные термические центры определяет область теплового влияния и соответственно будет усиливать степень направленности затвердевания. В результате расчетов обеспечивается точное перекрытие прибылями наиболее горячих зон, обнаруживаемых в литой детали.

Для обеспечения плотного строения тела отливки после определения мест установки прибылей выполняется анализ поля локального критерия направленности затвердевания и выявляются элементы с его пониженными значениями. Этот анализ служит основой для подбора требуемых средств управления затвердеванием. Если величина параметра затвердевания не ниже определенной величины, то исследуемый элемент отливки имеет достаточное питание и соответственно плотное строение. Задача системы – обеспечить в отливке, в ее каждом элементе, уровень локального параметра направленности затвердевания достаточной величины. Целесообразно определять поле градиентов направленности затвердевания по термической оси отливки. В сложных отливках образуется несколько термических осей, по которым поступает питающий металл из прибылей. Прекращение работы этих питающих каналов вызывает образование пористости в отливке. Анализ величин локального параметра направленности затвердевания, взятого на термической оси, происходит методом перебора по слоям отливки снизу вверх.

Для того чтобы увеличить объем прибылей, система на каждом шаге наращивает дополнительный слой над основанием прибылей или предыдущем слоем. Такое увеличение объема прибылей будем в дальнейшем называть итерацией. Выполнение каждой итерации вызывает изменение темпе-

ратурных полей при затвердевании отливки и соответственно происходит поэтапное перемещение термического центра из отливки в прибыль. Необходимым условием работы прибыли является постоянная подпитка отливки жидким металлом, т.е. организация работы питающих отливку каналов.

При анализе простой отливки проводится сравнение величины осевого параметра направленности затвердевания по слоям снизу вверх. При значениях параметра направленности затвердевания больше критической назначение каких-либо средств управления затвердеванием не требуется. В случае обнаружения локального параметра затвердевания ниже критической величины в простейшем случае может быть назначен напуск на этом уровне в виде изменения индекса принадлежности элемента, принадлежащего форме, на индекс, принадлежащий металлу. Таким образом, происходит местное увеличение толщины стенки отливки. В следующем по высоте слое, если имеется низкая величина параметра направленности затвердевания, автоматически происходит такое же увеличение толщины стенки отливки. Такой проход, снизу доверху, и назначение местного увеличения толщины отливки позволяют поэтапно создать режим направленного затвердевания. При каждой итерации на отдельном слое отливки изменяется только один индекс принадлежности элемента к тому или иному материалу, участвующему в теплообмене между металлом и формой. Такое изменение теплообмена в свою очередь вызывает изменение положения расчетных термических осей и градиентов параметра направленности затвердевания.

Циклическое выполнение описанных итераций с промежуточным расчетом температурных полей, поля продолжительности затвердевания и поля локального параметра направленности затвердевания происходит до тех пор, пока в теле отливки все элементы будут иметь необходимый уровень параметра направленности затвердевания. Для отливки корпуса предохранительного клапана с расчетной прибылью пониженные значения локального параметра направленности затвердевания находятся только уже в объеме прибыли (рис. 2), при этом сама литая деталь в соответствии с выбранным критерием имеет плотное строение металла. Процесс оптимизации литейной технологии может быть закончен при превышении числа итераций выше допустимого или при выполнении условия сходимости целевых функций и переменных проектирования.

В нашем случае в качестве целевой функции мы рассматривали распределение значений продолжительности затвердевания и распределение значений локального параметра направленности затвердевания. В качестве ограничения по количеству итераций в системе предусмотрены параметры, определяемые в процентах от изменений

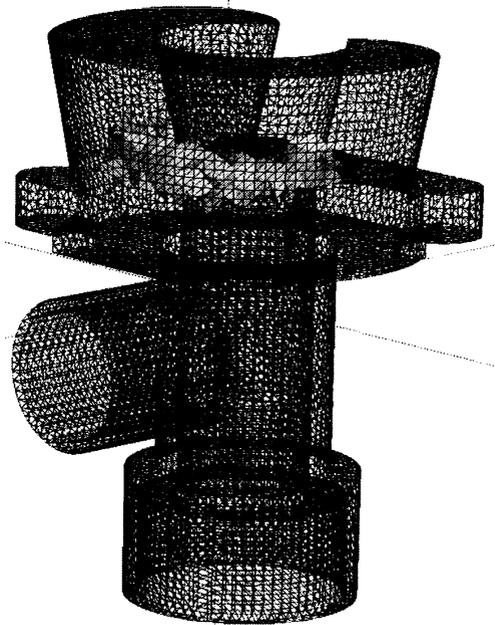


Рис. 2. Корпус клапана с установленной прибылью

объема металла. При использовании системы, возможно, предварительно влиять на ход разработки средств управления затвердеванием. Для того чтобы адаптировать технологию с максимальной вероятностью, предварительно задаются активная конфигурация модели отливки, число итераций, параметры, определяющие окончание процесса разработки технологии.

На рис. 3 показано, как при каждой итерации по добавлению объема происходит изменение темпа образования твердой фазы с одновременным увеличением продолжительности затвердевания. При каждой итерации добавляется 1–3% металла в прибыль или литейный напуск от общего объема отливки. Для отливки корпуса предохранительного клапана выход годного составил 65%. Кинетические особенности процесса затвердевания также могут использоваться для анализа режима питания и направленного затвердевания. На начальном этапе затвердевания 25–30% твердой фазы образуется за счет большого температурного градиента между жидким металлом и формой. Далее в условиях выделения теплоты кристаллизации происходит образование еще около 40% твердой фазы, при этом полностью формируется дендритный каркас отливки. Оставшаяся доля твердой фазы образуется уже в условиях затрудненного питания, при этом подпитка отливки жидким металлом происходит только в междендритных каналах, вместе с тем также происходит и усадка металла, находящегося в зоне околосолидусной температуры. Анализ кинетики образования твердой фазы показал, что итерации по добавлению металла в прибыль вызывают постепенное увеличение продолжительности затвердевания, что способствует наилучшей подпитке жидким металлом дендритного каркаса отливки.

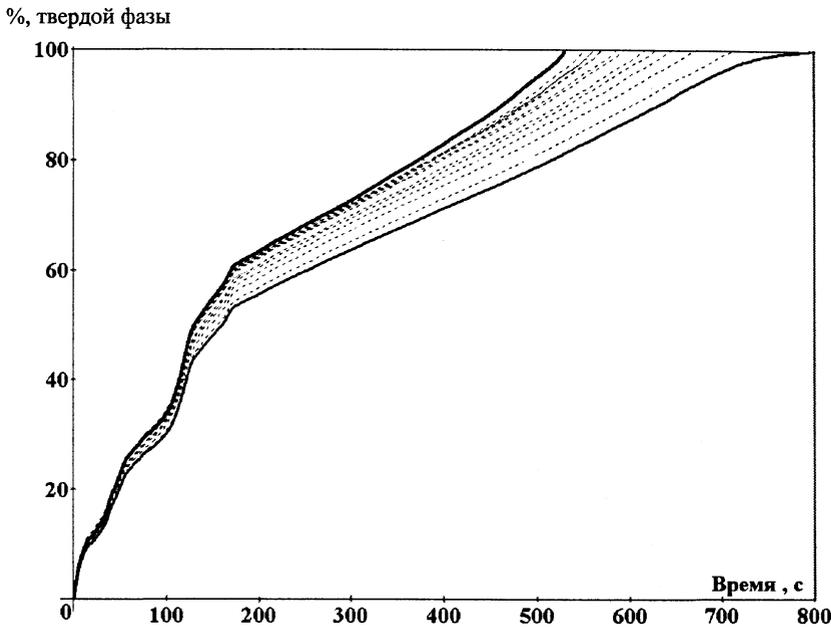


Рис. 3. Изменение общего темпа и продолжительности затвердевания при циклических итерациях по увеличению объема прибыли: — — отливка без прибыли; - - - итерации по добавлению металла в прибыль; — — отливка с установленной прибылью

Установка холодильников, утеплительных вставок и других средств управления затвердеванием определяется аналогичным методом. В результате расчетов находится расположение и размеры средств управления затвердеванием. В ходе расчета образуется напуск требуемой формы и в требуемом месте или же увеличивается ширина прибыли, которая через несколько итераций обеспечивает зону термического влияния необходимой протяженности. Окончательно объем прибыли проверяется и рассчитывается по потребности отливкой питающего металла с учетом установленных средств управления затвердевания.

Другим вариантом разработки литейной технологии является горизонтальное расположение отливки в форме. При вертикальном размещении отливки прибыль имеет наибольшее термическое влияние, но в месте соединения с отливкой возможна сильная подприбыльная усадка с одновременным развитием усадочных дефектов, борьба с которыми весьма затруднительна.

При решении задачи минимизации объема механической обработки может быть рассчитан следующий вариант литейной технологии. В основу решения положен принцип снятия лишнего напуска с поверхностей, подлежащих механической обработке, и расширения зоны действия прибыли. Тогда предварительно наносится большой напуск, который индексируется специальным обозначением элементов, принадлежащих только к нему, при этом уже конструкция литой детали не может быть изменена. В этом случае для решения задачи должны быть получены местные утолщения под прибылями для расширения зоны

их действия. На каждом шаге расчета частично удаляется напуск причем такой же объем закладывается в прибыль. Площадь обрабатываемой поверхности уменьшается и облегчается конструкция литой детали.

Более сложным вариантом задачи является формирование технологического варианта изготовления литой детали, который бы сочетал принцип пониженного объема механической обработки и повышенного ресурса работы литой детали. В этом случае вводится дополнительное ограничение по скорости кристаллизации. Величина скорости кристаллизации для каждого элемента, принадлежащей металлу, должна быть не ниже заданной величины. Причем это ограничение должно распространяться собственно на конструкцию литой детали.

Разработаны принципы расчетного проектирования литейной технологии, основанные на компьютерном назначении необходимых количественных параметров средств управления затвердеванием отливки. Рассчитанный оптимальный вариант литейной технологии корпуса предохранительного клапана позволяет получить качественную отливку с плотным строением металла.

Все принципы и методики, изложенные в работе, реализуются с различной степенью точности для отливок разного вида и назначения, при этом будет получен оптимальный технологический вариант в соответствии с заданными техническими требованиями.

Выводы. Разработаны теоретические модели, охватывающие этапы конструкторской работы, технологической подготовки литейного производства и последующей механической обработки. На основе применения компьютерных технологий и численных методов расчета предполагается разработка оптимальной литейной технологии стальных отливок различного назначения.

Литература

1. Десницкая Л.В., Ольховик Е.О., Кратович Л.Ф., Десницкий В.В. Структурообразование и свойства стали в отливках. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургского института машиностроения, 2004.
2. Ольховик Е.О., Десницкий В.В., Кратович Л.Ф. Влияние структурной неоднородности на сопротивление разрушению в отливках из углеродистой стали // Тр. 7-го съезда литейщиков России. 23–27 мая 2005 г. Т. 1. 2005. С. 173–178.
3. Ольховик Е.О., Десницкий В.В. Разработка методов автоматизированного проектирования литейной технологии изготовления отливок // Заготовительные производства в машиностроении. М.: Машиностроение, 2006.