



The methods, algorithm and recommendations on optimization of gas regime of foundry modes for production of castings with developed relief are worked out.

О. И. ПОНОМАРЕНКО, И. С. ПЕЛЫХ, НТУ «ХПИ»

УДК 621.74 (083.3)

УПРАВЛЕНИЕ ГАЗОВЫМ РЕЖИМОМ ФОРМЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКОСТЕННОГО ЛИТЬЯ

При движении расплава в литниковых каналах и полости литейной формы происходит снижение его температуры и нагрев литейной формы и находящихся в ней газов. Вследствие этого возникают и развиваются следующие процессы: выделение газов из жидкого металла, нагрев и расширение газов литейной формы, испарение воды при нагреве формы, термодеструкция связующих и органических добавок формовочной смеси, фильтрация газов через вентиляционные каналы и толщину формы, формирование газового давления на границе металл – форма.

Теоретическое и экспериментальное изучение, а также разработка на этой основе рекомендаций по оптимизации газового режима литейной формы являются одними из важных направлений совершенствования технологических процессов изготовления отливок. В настоящее время сложилось три направления исследования термогазового режима литейной формы: классическое, ориентированное на решение задачи предупреждения газового характера в песчаных формах [1, 2], исследование особенностей формирования термогазового режима при изготовлении отдельных видов отливок [3, 4], разработка мер по управлению газовым режимом с целью повышения качества тонкостенного тонкорельефного литья [5, 6].

Одним из важных направлений развития литейного производства является снижение металлоемкости и штучной массы отливок. Ввиду этого имеет место тенденция к увеличению доли тонкостенного промышленного литья с развитым рельефом. К этому виду относятся художественные, ювелирные и зуботехнические отливки. На формирование уровня их качества большее влияние оказывают параметры термогазового режима литейной формы, однако на данный момент их влияние на качество литья изучено недостаточно.

В данной работе излагаются результаты решения задачи по разработке математической модели газового режима литейных форм для изготовления тонкостенного литья с развитым рельефом и оптимизации процесса фильтрации газов из замкнутых жидким металлом элементов литейной формы.

Выступы и впадины различной формы на поверхности отливки относительно реальной или воображаемой линии фона образуют рельеф поверхности. Рельеф промышленных отливок представляет собой совокупность элементарных геометрических фигур, образующих ребра, бобышки, платики, приливы и другие выступы и впадины на ее поверхности, выполняющие заданные эксплуатационные функции.

Элементы рельефа художественных и ювелирных отливок создаются автором изделия и несут основную художественную нагрузку, а степень их воспроизведения в литом изделии является важнейшим показателем качества художественного литья. Для количественного измерения степени воспроизведения рельефа отливок используется критерий потери профиля, представляющий собой отношение размера незалитой части элемента рельефа к его общей высоте.

Основным фактором, противодействующим заполнению элементов рельефа жидким металлом, является образование газовых «карманов» в незаполненной части макрорельефа. Практика показывает, что среди разнообразных макроэлементов рельефа литейной формы наихудшую воспроизводимость имеют элементы конусного характера. Величина, определяемая отношением:

$$q = \frac{\Delta y}{h} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где Δy – высота незалитой части элемента рельефа; h – общая высота элемента рельефа, называется потерей профиля.

Движущей силой фильтрации служит давление в полости литейной формы, которое состоит из металлостатического давления металла и газового давления:

$$P(\tau) = h\gamma + P_r(\tau), \quad (2)$$

где $P_r(\tau)$ — величина газового давления; h, γ — величина металлостатического напора и объемный вес металла.

Для производства высококачественного тонкорельефного литья необходимо оптимизировать параметры технологических процессов таким образом, чтобы величина потери профиля была минимальна. В обычных условиях среднее значение потери профиля составляет 20–30%, а ее колебания находятся в интервале 3–80% в зависимости от геометрии отливок, вида литейного сплава и технологических параметров процесса литья. Такой широкий и уникальный диапазон изменения этого параметра показывает, что на практике существуют возможности сведения этого литейного дефекта практически к нулю на основе оптимизации параметров технологического процесса. Для этого нужно найти параметры газового режима литейной формы, которые обеспечивают эвакуацию газа через поры формовочной смеси и (или) специальные вентиляционные каналы.

Большую роль в формировании рельефа играет кинетика формирования газового давления в литейной форме, описываемого функцией $P_r(\tau)$. Существующие экспериментальные данные показывают, что величина газового давления в литейной форме скачкообразно повышается в момент соприкосновения расплава с литейной формой до величины 20–40 г/см², а затем быстро снижается [1]. Количественно эти данные могут быть представлены как:

$$P_r(\tau) = P_{\max} \exp(-c\tau), \quad (3)$$

где P_{\max} — максимальная величина газового давления; c — константа.

Задача оптимизации для рассматриваемого случая формулируется следующим образом. Считаем, что отливка изготавливается в двухслойной форме, а эвакуация газа из "газового кармана" осуществляется его фильтрацией через формовочную смесь и удалением через специальные вентиляционные каналы. Расчет количества газа, удаляемого фильтрацией через литейную форму, может быть произведен на основе решения общего уравнения термогазового режима литейной формы, полученного в работе [6] для случая, когда уравнение состояния фильтрующегося газа имеет самый общий вид.

Для реальных газов, состояние которых может быть описано известным уравнением Ван-дер-Ваальса, и одномерного случая уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 - \frac{P}{T} \frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + P \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{I_p RT}{\kappa_r} \right] \frac{\kappa_r}{m} + \frac{P}{T} \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (4)$$

где P, T — давление и температура газа; x, τ — пространственная координата и время; κ_r — коэффициент газопроницаемости; I_p — мощность источника массы газа.

Это уравнение связывает поля температур и давлений газа в любой точке литейной формы в произвольный момент времени. Оно может быть решено численным методом на основе разностной схемы с использованием итерационного цикла вычислений на каждом шаге по времени. Однако нелинейность уравнения (4) вызывает затруднения с его алгоритмизацией. В данной работе предложен метод инженерного решения задачи оптимизации газового режима тонкорельефных литейных форм в следующей постановке.

Рассмотрим процесс заполнения расплавом элемента рельефа литейной формы на примере срезанного конуса высотой H и радиусами нижнего и верхнего оснований, равными соответственно r и R (рис. 1). При $r=0$ элемент принимает форму конуса. Литейная форма состоит из облицовочного слоя толщиной b и наполнительного. Для получения отливок с высокой чистой поверхности облицовочный слой небольшой толщины выполняется на основе высокодисперсных огнеупорных наполнителей, поэтому он имеет низкую, близкую к нулевой, газопроницаемость. В связи с этим в верхней части элемента рельефа необходимо выполнять вентиляционный канал, обеспечивающий эвакуацию газа при образовании в этом элементе "газового кармана".

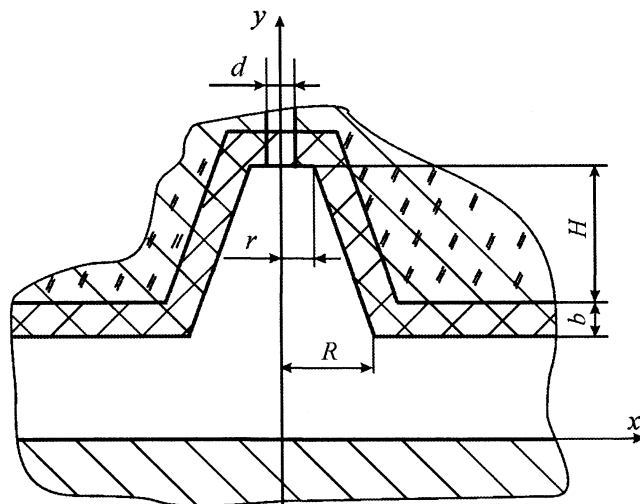


Рис. 1. Элемент рельефа литейной формы

Следует определить оптимальные величины газопроницаемости облицовочного слоя формовочной смеси и диаметр вентиляционного канала, которые обеспечивают удаление газов из элемента

рельефа. На величину диаметра вентиляционного канала из технологических соображений накладываются следующие ограничения. Из условий технологической выполнимости его значение должно быть больше 0,1 мм, а для обеспечения возможности удаления залива, образующегося на месте вентиляционного канала, без искажения рельефа отливки его диаметр не должен превосходить величину, равную 70% величины верхнего диаметра рассматриваемого элемента рельефа.

Литниковая система рассчитывается таким образом, чтобы обеспечить хорошую жидкотекучесть расплава за время заливки $T_{зал}$. Ввиду этого на время удаления газа из элемента рельефа $T_{уд}$ целесообразно наложить ограничение: $0,5 T_{зал} < T_{уд} < 1,5 T_{зал}$.

Таким образом, решение оптимизационной задачи сводится к определению величин диаметра вентиляционного канала d и газопроницаемости облицовочного слоя Γ , обеспечивающих минимум целевой функции $F(d, \Gamma)$, описывающей зависимость время удаления газа из элемента рельефа, т. е. в математическом плане необходимо решить задачу:

$$\text{найти } F(d, \Gamma) = \min_{d, \Gamma} \quad (5)$$

с учетом ограничений на время заливки и диаметр газового канала.

Расчет времени удаления газа из элемента рельефа осуществляли следующим образом. Удаление газа из элемента рельефа происходит одновременно фильтрацией через литейную форму и истечением через вентиляционное отверстие. Скорость истечения газа из элемента рельефа определяли по известной в газодинамике формуле Сен-Венана.

Массу газа, который находится в элементе и удаляется истечением через вентиляционное отверстие, определяем по формуле:

$$M(\tau) = \rho(\tau)V(\tau), \quad (6)$$

где $V(\tau)$ – площадь фильтрации элемента; $\rho(\tau)$ – плотность фильтрующегося газа.

Функция $V(\tau)$, описывающая изменение незаполненного объема рассматриваемого элемента формы, определялась основе анализа его геометрии и кинетики заполнения расплавом. Плотность газа рассчитывали по уравнению состояния, а его температуру – на основе решения вспомогательной задачи о нагреве газа, находящегося в контакте с нагретым твердым телом.

Для определения объема газа, удаляемого фильтрацией при переменных давлении и площади фильтрации, на основании закона Дарси найдено, что к моменту времени τ , объем профильтровавшегося газа будет равен

$$Q(\tau) = \frac{K_{\Gamma}}{b} \int_0^{\tau} P_{\Gamma}(\tau) F(\tau) d\tau, \quad (7)$$

где K_{Γ} – коэффициент газопроницаемости; b – толщина облицовочного слоя смеси; $F(\tau)$ – величина поверхности фильтрации газа.

Полученные соотношения позволяют найти время фильтрации газа из заданного элемента рельефа при заданных технологических параметрах изготовления отливки и геометрии ее рельефа. Эта задача может быть использована для количественного изучения влияния различных факторов на формирование тонкого рельефа отливок и выбора диапазонов их изменения при решении оптимизационных задач. Так, например, на рис. 2 для конического элемента рельефа медной отливки с геометрическими размерами $R=10$ мм, $r=2$ мм, $h=50$ мм показаны зависимости отношения заполнения части объема (V_3) к общему объему элемента (V_0) от газопроницаемости облицовочного слоя.

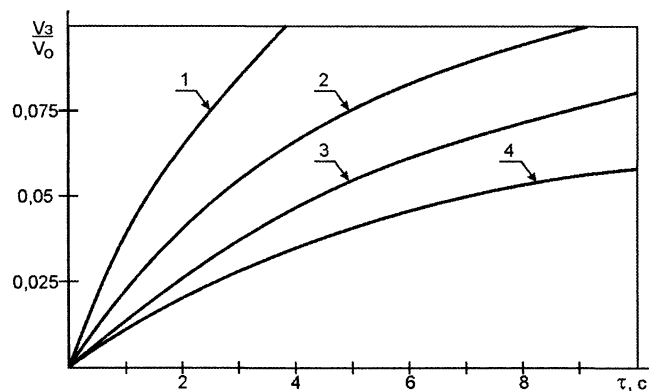


Рис. 2. Влияние газопроницаемости смеси на кинетику заполнения элемента рельефа литейной формы: 1 – $\Gamma=20$; 2 – 6; 3 – 4; 4 – 2

Результаты расчетов показывают, что, изменяя диаметр вентиляционного отверстия и газопроницаемость облицовочного слоя, можно обеспечить необходимое время удаления газа из тонких элементов рельефа литейной формы.

Для численного решения оптимизационных задач этого класса разработан и реализован алгоритм, включающий последовательное выполнение следующих операций.

1. На отрезке времени $(0, T)$ вводится дискретный шаг Δt , изучаемый период времени T составляет от 30 до 90 с, а величина шага по времени изменяется от 0,001 до 0,1 с.

2. Определяются геометрические характеристики системы и ее параметры в начальный момент времени. Величины диаметра вентиляционного канала и значение газопроницаемости принимаем равными их нижним допустимым пределам.

3. По формулам (2) и (3) для k -го шага по времени ($k=1, 2, 3, \dots, N$) находим величину газового давления в элементе рельефа литейной формы.

4. На рассматриваемом отрезке времени численно решаются уравнения (6) и (7).

5. Полученные на предыдущем шаге параметры используются в качестве начальных для расчетов на следующем $(k+1)$ -м шаге.

6. Реализуется циклический перебор параметров d и Γ из их допустимых интервалов и определяется значение времени заполнения элемента рельефа.

7. На основе реализации процедуры (5) рассчитываются оптимальные значения искомым параметров.

Оптимизационная задача решается для каждого типового элемента рельефа. Реализация приведенного алгоритма позволила разработать рекомендации по совершенствованию технологии изготовления тонкорельефных отливок.

Выводы

Организация рационального газового режима литейной формы является необходимым условием

получения высококачественных художественных и промышленных отливок с развитым рельефом. Для решения этой задачи разработаны математическая модель, метод оптимизации и рекомендации по организации термогазового режима тонкорельефных литейных форм.

Литература

1. Серебро В.С. Основы теории газовых процессов в литейной форме. М.: Машиностроение, 1991.
2. Радченко А.А. Газовые процессы в литейной форме // Процессы литья. 2001. № 3. С. 53–56.
3. Heckel T., Klein A. Stromungstechnische Optimierung von Gießbehälter und Gießsysteme durch Simulation // Giesserei – Erfahrungsaustausch. 2001. Vol. 45. N. 3. S. 96–102.
4. Virtual castings – a great come true – or an expensive nightmare // Foundry. 1998. Vol. 21. N. 3. P. 16–17.
5. Барышников Г.П. Технология изготовления тонкостенных отливок // Литейное производство. 2002. № 6. С. 30–31.
6. Пелых И.С. Фильтрационные процессы в литейной форме // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ». 2002. № 6. С. 33–36.