

ОРГАНИЗАЦИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ГАЗОВОГО РЕЖИМА ФОРМЫ

при изготовлении художественного литья

О.И. Пономаренко, д.т.н.,
профессор кафедры «Литейное производство»,
НТУ «ХПИ»;

И.С. Пельих, инженер-технолог,
ООО «Укрспецмет»

Главной особенностью художественных и ювелирных отливок является наличие на их поверхности значительного количества нерегулярных выступов и впадин различной формы относительно реальной или воображаемой линии фона, которые в совокупности образуют рельеф поверхности. Промышленные отливки, особенно со сложной геометрией, также имеют элементы рельефа, они чаще всего представляют 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 несут основную художественную нагрузку, а степень их воспроизведения в литом изделии является важнейшим показателем качества художественного литья. Для количественного измерения степени воспроизведения рельефа отливок был предложен критерий потери профиля, представляющий собой отношение размера не залитой части элемента рельефа к его общей высоте. В этой и в других работах дана качественная оценка влияния некоторых факторов на потерю профиля рельефа при литье, однако всесторонний количественный анализ этого явления до настоящего времени отсутствует.

Ввиду этого возникает задача количественного анализа закономерностей явления воспроизведения жидким металлом тонкопрофильных элементов литейной формы, известного также под термином «микрорельеф», как базы для решения задач, связанных с повышением качества художественного и тонкорельефного промышленного литья.

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

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

где Δy — высота не залитой части элемента рельефа; h — общая высота элемента рельефа, называется потерей профиля.

Движущей силой фильтрации является давление в полости литейной формы, кото-

рое состоит из металлостатического давления металла и газового давления:

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

где $P_g(\tau)$ — величина газового давления; h, γ — величина металлостатического напора и удельный вес металла; τ — время.

Для производства высококачественного тонкорельефного литья необходимо оптимизировать параметры технологических процессов таким образом, чтобы величина потери профиля была минимальной. 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 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 необходимо 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 $P_g(\tau)$. 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. Количественно эти данные могут быть представлены следующим образом:

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

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. Количество газа, удаляемого фильтрацией через литейную форму, может быть определено на основе решения общего уравнения термогазового режима литейной формы, полученного в работе для варианта, когда уравнение состояния фильтрующегося газа имеет самый общий вид.

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

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

где P, T — давление и температура газа; R, m — газовая постоянная и масса 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. Уравнение может быть решено численным методом на основе использования 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.

Рассматривается процесс заполнения расплавом элемента рельефа в виде срезанного конуса высотой H и радиусами нижнего и верхнего оснований, соответственно, r и R (рис. 1). При $r = 0$ элемент принимает форму конуса. Литейная форма содержит облицовочный слой толщиной b и наполнительный. Для получения отливок с высокой чистотой поверхности облицовочный слой производится на основе высокодисперсных огнеупорных наполнителей и поэтому он имеет низкую, близкую к нулевой, газопроницаемость. В верхней части элемента рельефа имеется вентиляционный канал d .

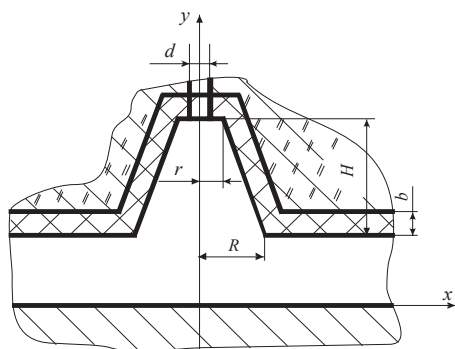


Рис. 1. Элемент рельефа литейной формы

Необходимо 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 так, чтобы обеспечить хорошую жидкотекучесть расплава во время заливки τ (зал). Ввиду этого на время удаления газа из элемента рельефа τ (уд) целесообразно наложить следующее ограничение: $0,5 \tau(\text{зал}) < \tau(\text{уд}) < 1,5 \tau(\text{зал})$.

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

Масса газа $M(\tau)$, который находится в элементе и удаляется истечением через вентиляционное отверстие, находится 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 на основе анализа его геометрии и кинетики заполнения расплавом. Плотность газа определялась по уравнению состояния, а его температура находилась на основе решения вспомогательной задачи о нагреве газа, находящегося в контакте с нагретым твердым телом.

Для определения объема газа, удаляемого фильтрацией при переменном давлении и площади фильтрации, на основании закона Дарси найдено, что к моменту времени τ объем профильтровавшегося газа $Q(\tau)$ 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; $P_{\Gamma}(\tau)$ — величина газового давления.

Полученные соотношения позволяют определить 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. Например, на рис. 2 для конического элемента рельефа медной отливки с геометрическими размерами $R = 10$ мм, $r = 2$ мм, $H = 50$ мм представлены зависимости отношения заполнения к данному моменту части объема (V_3) к общему объему элемента (V_0) в зависимости от газопроницаемости облицовочного слоя.

Результаты расчетов показывают, что изменение диаметра 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.

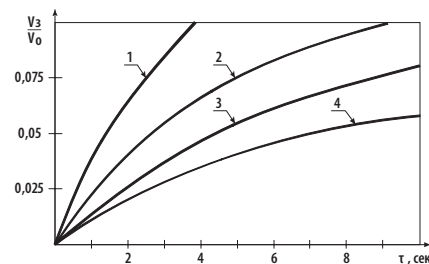


Рис. 2. Влияние газопроницаемости смеси на кинетику заполнения элемента рельефа литейной формы (кривые: 1 → $\Gamma=20$; 2 → $\Gamma=6$; 3 → $\Gamma=4$; 4 → $\Gamma=2$)

1. На отрезке времени $(0, \tau)$ вводится дискретный шаг $\Delta\tau$, изучаемый период времени τ составляет от 30 до 90 секунд, а величина шага по времени изменяется в пределах от 0,001 до 0,1 секунды.

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 ($k = 1, 2, 3, \dots, N$) определяем величину газового давления в элементе рельефа литейной формы.

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

5. Полученные на предыдущем шаге данные 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) определяются оптимальные значения искомых параметров.

Оптимизационная задача решается для каждого типового элемента рельефа. Реализация приведенного алгоритма позволила разработать рекомендации по совершенствованию технологии изготовления тонкорельефных отливок. Так, для изученного элемента рельефа найдено, что для того чтобы обеспечить время удаления из него газа меньше чем за 10 секунд, достаточно обеспечить его газопроницаемость 2 стандартных единиц и диаметр вентиляционного отверстия 2 мм.

Выводы. Организация рационального газового режима литейной формы является необходимым условием получения высококачественных художественных и промышленных отливок с развитым рельефом. Разработано общее уравнение термгазового режима литейной формы и инженерный метод расчета продолжительности фильтрации газа из элементов рельефа литейной формы во время ее заливки. Разработан и реализован метод, алгоритм и рекомендации по оптимизации газового режима литейных форм для изготовления отливок с развитым рельефом.