



The new method of choice of vent holes on the basis of numerical modeling, differing from the known ones by accounting of dynamics of gas phase, determined by modeling of the chill filling with metal, what allows to minimize the formation of gas defects in casting, is offered.

А. Н. ЧИЧКО, Т. В. МАТЮШИНЕЦ, С. Г. ЛИХОУЗОВ, БНТУ

УДК 669.27:519

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ К ЗАДАЧЕ ВЫБОРА ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ОТВЕРСТИЙ КОКИЛЬНОЙ ОСНАСТКИ

Выбор положения вентиляционных отверстий при разработке кокильной оснастки является одним из важнейших этапов проектирования кокилей. Известно, что пространственное расположение вентиляционных отверстий обеспечивает выход значительной части газовой фазы из внутренней полости кокиля в условиях кристаллизующегося металла. Формирование усадочной и рассеянной пористости под действием газовой фазы и процесса кристаллизации существенно влияет на качество отливок, получаемых литьем в кокиль. Поэтому разработка методов расчета диаметра (сечения) и пространственного положения вентиляционных отверстий — важная научно-техническая задача. Существующие методики расчета вентиляционных отверстий основаны на эмпирических подходах и практически не учитывают пространственную конфигурацию кокиля, а также перемещение расплава при его заполнении. Невозможность учета этих факторов делает существующие инженерные методики неэффективными, особенно когда речь идет об изготовлении сложных фасонных отливок. Число отверстий, их положение и диаметр могут изменять газовый режим течения воздуха в кокиле и вызывать брак в отливках по газовым дефектам.

Методы выбора вентиляционных отверстий могут быть усовершенствованы, если в них использовать методы компьютерного моделирования процессов заполнения форм, которые позволяют рассчитывать динамику изменения свободной поверхности расплава, что может быть использовано для развития новых подходов по расчету вентиляционных отверстий. Вместо эмпирических данных в проведении расчетов можно использовать результаты моделирования процесса заполнения отливок, которые могут являться исходными данными при проведении методов расчета вентиляционных отверстий кокилей. К

таким исходным данным можно отнести поле температур в кокиле и отливке, а также поле скоростей расплава, которые рассчитываются с помощью пространственной конфигурации кокиля и отливки, а также тепловых режимов в металле и кокиле. Такой подход позволяет с новых позиций взглянуть на методы выбора вентиляционных отверстий в кокильной оснастке.

В настоящей работе предлагается метод выбора вентиляционных отверстий кокильной оснастки, который отличается от известных учетом особенностей распределения температур и скоростей в системе «отливка—кокиль».

Анализ существующих методов расчета вентиляционных каналов [1, 2] показывает, что расчет газового режима основывается на балансе массы газа в полости кокиля:

$$dM = dM_{\Gamma} - dM_B, \quad (1)$$

где dM — изменение массы газа в рабочей полости кокиля; dM_{Γ} — приращение массы газа вследствие газификации облицовки; dM_B — масса газа, утекающего через вентиляционные отверстия.

Дальнейшее преобразование уравнения (1) с конкретизацией взаимосвязи давления, температуры, массы и объема с учетом уравнения Менделеева—Клапейрона приводит к формуле

$$\begin{aligned} (V_{IH} - V(t)) \left[\frac{dp_1}{dt} - \frac{p_1}{T_1} \frac{dT_1}{dt} \right] = \\ = \frac{m(t)}{\rho_0} + q_{yo} \frac{T_1}{k} \frac{dS_{\phi}}{dt} - ap_1(p_1 - p_c), \end{aligned} \quad (2)$$

где V_{IH} — объем рабочей полости кокиля; $V(t)$ — объем залитого расплава в момент времени t ; p_1 — давление газа в рабочей полости кокиля; T_1

– температура газа; $m(t)$ – массовая скорость заливки; ρ_0 – плотность заливаемого металла; $q_{\text{зд}}$ – массовая газотворная способность единицы поверхности покрытия формы; S_{ϕ} – площадь поверхности контакта заливаемого металла и кокиля; k – параметр, определяемый начальным

состоянием газа ($k = \rho_{1H} \frac{T_{1H}}{p}$, где ρ_{1H} – плотность газа; T_{1H} – начальная температура газа); a – обобщенная характеристика вентиляционной способности формы; p_c – давление газа в окружающей среде.

Данное уравнение позволяет оценить размер вентиляционного отверстия в выделенной области кокиля, однако при этом не учитывается динамика заполнения металлом формы, т. е. выделенная полость кокиля с определенной вероятностью может оказаться заполненной металлом, в результате чего вентиляционное отверстие не выполнит свою функцию. Уравнение не учитывает и пространственную конфигурацию отливки, что также существенно влияет на положение вентиляционных отверстий. Следует отметить, что инженерные методы расчета вентиляционных отверстий были развиты в 70–80-х годах, когда моделирование движения расплава в форме практически не проводилось из-за сложности такого рода расчетов.

Как следует из уравнения (2), традиционный метод не учитывает свойств расплава в расчете давления газа, заключенного в объеме формы. При этом металл рассматривается как движущийся поршень, который сжимает находящийся в полости формы газ. При заполнении кокиля ввиду теплообмена между металлом и газом при заливке более тугоплавкого металла неизбежно повышение температуры и давления газовой фазы. При этом температурный фактор, играющий важную роль в расчетах вентиляционных отверстий, также не мог быть учтен в полной мере из-за проблем расчета динамики температурного поля, зависящей от процесса заполнения.

Один из вариантов учета температурного фактора предлагается в работе А.И. Вейника [2]:

$$T_1 = T_{1H} + (T_{\text{зал}} + T_{1H})t/t_{\text{зал}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{зал}}$ – температура заливаемого металла; $t_{\text{зал}}$ – продолжительность заливки.

Однако несложно видеть, что и в этой формуле не учитываются пространственные размеры как отливки, так и литниковой системы, что оказывает существенное влияние на движение газовой фазы и металла в полости кокиля.

Учет температурного фактора может быть проведен с помощью современных компьютерных систем [3, 4]. В этом случае определение температурного и скоростного поля металла, заполняющего полость формы, позволяет с высокой точностью находить области для положения вентиляционных каналов. Причем, моделируя различные режимы заполнения, можно выделять оптимальные области для положения отверстий кокиля.

Учитывая недостатки, отмеченные в традиционной методологии расчета вентиляционных отверстий, был предложен новый подход, лишенный описанных выше недостатков. На рис. 1 показана общая схема предлагаемого метода выбора и расчета вентиляционных отверстий. Как видно из рисунка, он включает в себя следующие этапы: формирование исходных данных по кокилю и заливаемому металлу; моделирование процесса заполнения кокиля для заданных режимов и определение областей для выбора вентиляционных отверстий; расчет необходимого сечения вентиляционных каналов.

На первом этапе задаются исходные данные: теплофизические свойства металла формы и отливки, 3D-геометрия отливки, модель литниковой



Рис. 1. Общая схема расчета сечения вентиляционных отверстий и определения их положения

системы, начальные температуры металла и формы.

На втором этапе на основе 3D-геометрии отливки (рис. 2) для заданного сочетания отливки и литниковой системы проводится моделирование заполнения полости формы металлом. На этом

этапе визуализируется процесс заполнения полости кокиля через заданную литниковую систему и полость формы от первых порций металла до момента заполнения последних участков формы (рис. 3). Картина распределения металла по объему полости кокиля может существенно меняться при использовании различных литниково-питающих систем. Для одной и той же отливки, используя одно и то же место подвода металла, но принципиально отличные по форме и сечению литниковые системы, можно получить абсолютно различные области установки вентиляционных каналов (области полости формы, заполняющиеся металлом в последнюю очередь). Справедливо и обратное, нет гарантий того, что при использовании одной и той же литниковой системы с идентичными сечениями основных элементов и для отличных по конфигурации отливок одной массы будут совпадать места установки вентиляционных отверстий. Причем инженеру-конструктору, лишенному возможности визуально наблюдать процесс виртуального заполнения полости формы, достаточно сложно интуитивно определить области установки вентиляционных отверстий. Области, которые предположительно должны заполняться последними, в результате оказываются заполненными металлом, а в полости формы еще остается не вытесненный газ. На рис. 3 показан процесс заполнения формы, который является отправной точкой для выбора вентиляционных отверстий. Не видя картины заполнения, можно предположить, что область, которая заполнится последней, будет располагаться на наибольшем удалении от места подвода металла, однако в действительности это предположение не является однозначным. Так, изучив картину заполнения полости формы металлом, нетрудно заметить, что области, заполняющиеся последними (на рисунке они окрашены в синий цвет), лежат на минимальном удалении от места подвода металла и располагаются симметрично слева и справа от него (точки A1 и A2 на рисунке). Именно на этих участках необходимо устанавливать вентиляционные отверстия, через которые воздух будет истекать из полости постоянной формы в окружающую среду. Это объясняется специфическими особенностями распределения скоростного поля жидкого металла, заполняющего полость кокиля, связанными с конструкцией и сечениями литниково-питающей системы, а также геометрией отливки. Предложенный метод отличается от традиционного этапами 1 и 2.

После определения областей установки вентиляционных отверстий начинается третий этап — расчет необходимого сечения вентиляционных каналов. Методика расчета базируется на основных закономерностях традиционного подхода. Однако в предлагаемом подходе сделан акцент на отслеживание координат точного положения фрон-

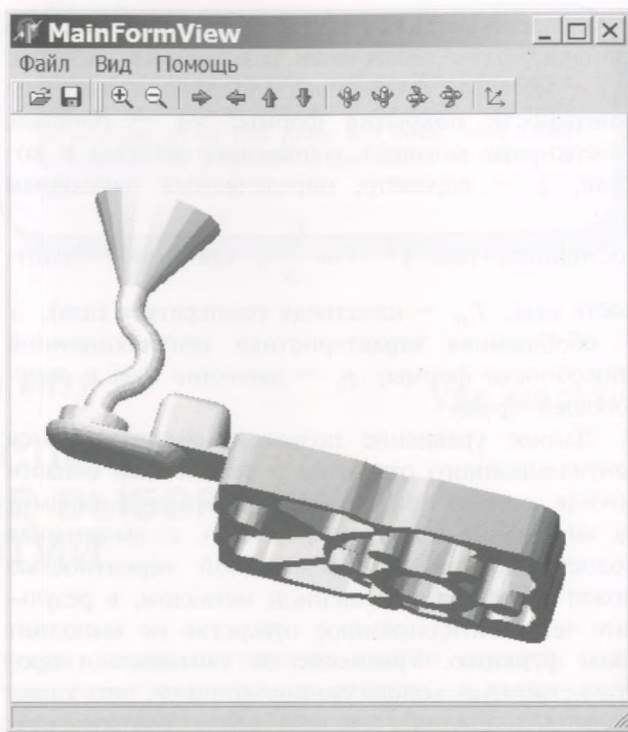


Рис. 2. 3D-геометрия отливки и модель литниковой системы, используемые для расчета вентиляционных отверстий в кокиле

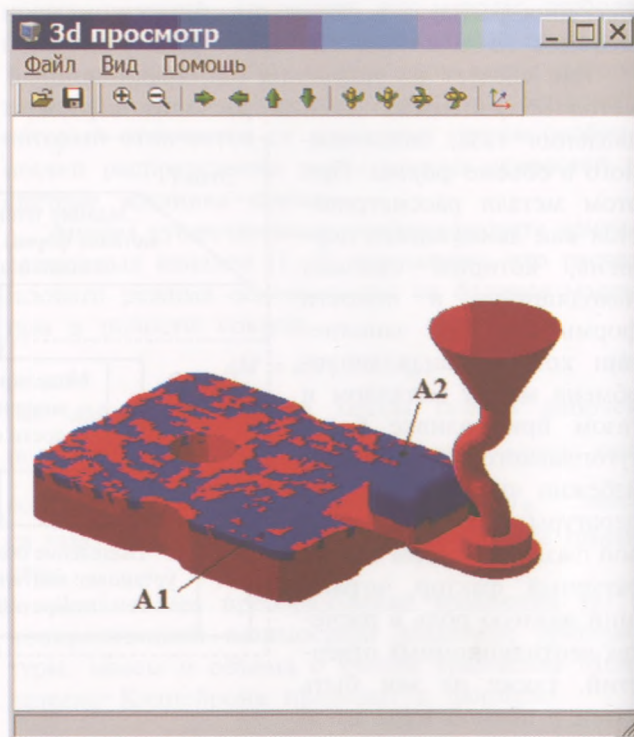


Рис. 3. Фрагмент моделирования в компьютерной системе «ПроЛит» положения фронта металла на последний момент заполнения полости формы

та жидкого металла на каждом итерационном шаге расчета, а также на использовании данных, предоставляемых системой компьютерного моделирования по определению температурного поля как металла, заполняющего полость формы, так и газа, занимающего пространство кокиля, неза-

полненное жидким металлом. На рис. 4 показаны положение фронта жидкого металла в плоскости симметрии отливки, а также картины полей скоростей и температур в выбранных плоскостях. Данные по температурным и ско-

ростным полям, а также положению фронта металла из системы компьютерного моделирования компонуются в таблицы и служат исходными данными для расчета давления газа в полости формы.

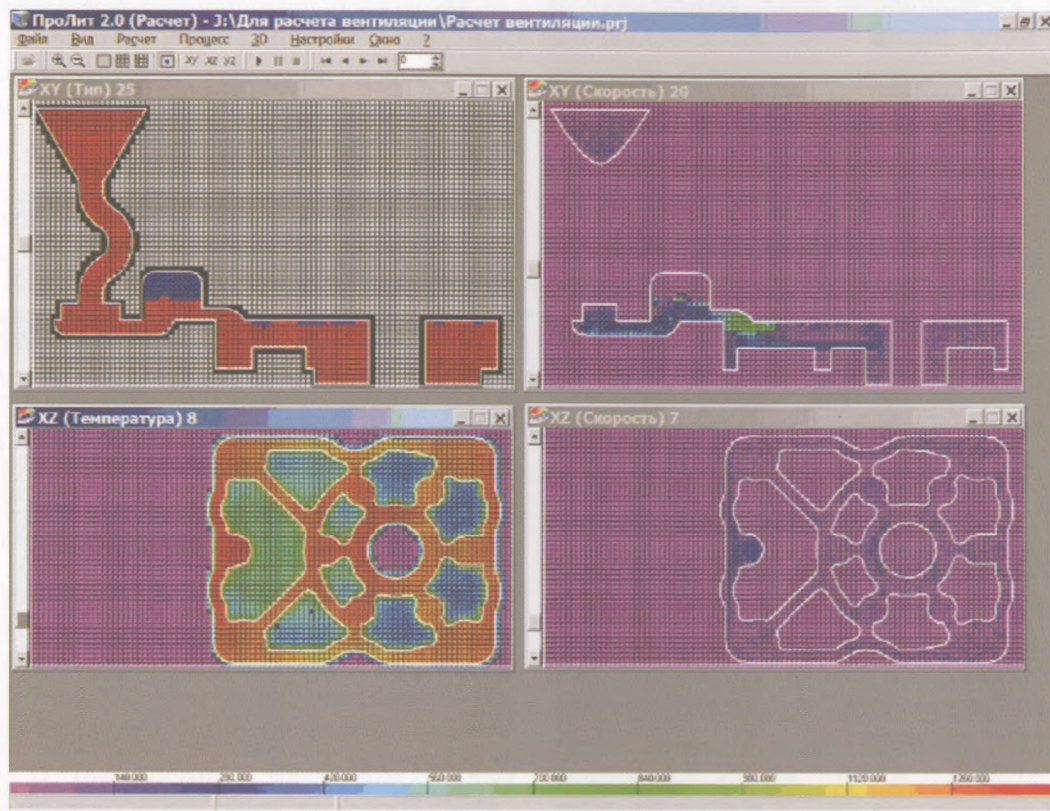


Рис. 4. Фрагмент моделирования в компьютерной системе «ПроЛИТ» положения фронта металла, а также распределения полей скоростей и температур на момент времени, соответствующий окончанию заполнения формы

Преобразуя уравнение (2) с учетом того, что известны функции изменения температуры и объема газа в полости формы по времени, получаем зависимость для определения давления в полости сложной формы в любой момент времени τ :

$$P' = \frac{P_0 V_0 T_1}{T_0 V_1} - S \tau \sqrt{2 P_0 V_0 R T_1 \left(\frac{P_0 V_0}{V_1^4} - \frac{P_{\text{вн}}}{V_1^3} \right)}, \quad (4)$$

где P_0 — давление в полости формы до начала движения металла; V_0 — объем воздуха в полости формы до начала движения металла; T_0 — температура в полости формы до начала движения металла; V_1 — объем воздуха в полости формы на момент времени τ с начала движения металла (данные моделирования); T_1 — температура в полости формы на момент времени τ с начала движения металла (данные моделирования); S — суммарная площадь вентиляционных каналов; R — газовая постоянная; $P_{\text{вн}}$ — давление в окружающей среде; P' — давление воздуха в полости формы на момент времени τ с начала движения металла с учетом истечения воздуха через вентиляционные каналы.

Давление газа P_1 в полости формы — одна из наиболее важных характеристик процесса заливки. Очевидно, что при очень больших значениях противодавления заполнение формы должно протекать неблагоприятно для качества отливки, так как большое количество газа будет переходить в раствор, в результате чего в отливке появится микропористость.

С ростом давления в полости формы увеличивается также масса газа, оставшегося не вытесненным из формы. Этот газ в виде отдельных механических включений создает пористость и газовые раковины. Кроме того, затрудняется заполнение металлом тонких сечений, а также углов формы. В результате в отливке образуются недоливы.

С точки зрения возможности механического проникновения газа в заливаемый металл наиболее опасным участком отливки является зона, примыкающая к зеркалу расплава. Действительно, проникновению газа в расплав на этом участке может противодействовать только поверхностное натяжение металла. Исходя из этого, давление воздуха в полости формы на любой момент времени τ для предотвращения проникновения

воздушных пузырей в металл не должно превышать допустимого значения для данного заливаемого металла.

Таким образом, расчет давления газа в полости формы на каждый момент времени представляет собой итерационный цикл, содержащий в своем теле шесть шагов.

Шаг 1. Найдем начальную массу воздуха, заключенного в полости формы:

$$m_0 = \frac{P_0 V_0}{RT_0}.$$

Шаг 2. По значениям из таблиц данных на момент времени τ рассчитаем давление, которое бы имело место в полости формы на момент времени τ при условии отсутствия вентиляционных каналов:

$$P_1 = \frac{P_0 V_0}{V_1},$$

где V_0 — объем полости формы, незанятой металлом, на предыдущий момент времени; V_1 — объем полости незанятой металлом формы на момент времени τ , определяемый по положению координат точек фронта металла в объеме формы.

Шаг 3. Определим скорость истечения газа из вентиляционного отверстия заданного сечения при найденном давлении:

$$v = \sqrt{2 \frac{(P_1 - P_{\text{вн}}) RT_1^{\text{cp}}}{P_1}},$$

где T_1^{cp} — усредненная температура газа в полости

формы на момент времени τ ($T_1^{\text{cp}} = \frac{\sum T_{\tau}(x, y, z)}{n}$),

где n — общее число точек пространства (при заданном размере сетки), незаполненного металлом, на момент времени τ ; $T_{\tau}(x, y, z)$ — температура газа в точке с координатами x, y, z в момент времени τ .

Шаг 4. Определим объем истекшего газа за время $\Delta\tau$:

$$\Delta V = Sv\Delta\tau.$$

Шаг 5. Определим массу истекшего и оставшегося газа:

$$\Delta m = \frac{P_1 \Delta V}{RT_1^{\text{cp}}}, \quad m_1 = m_0 - \Delta m.$$

Шаг 6. Определим реальное давление в полости формы на момент времени τ :

$$P_1' = \frac{m_1 R_1 T_1^{\text{cp}}}{V_1}.$$

На каждом итерационном шаге расчета давления газа в полости кокиля проводится проверка условия о не превышении рассчитанного давления значения допустимого давления для данного рода заливаемого металла:

$$P_1' \leq P_{\text{доп}}. \quad (5)$$

В случае выполнения условия производится расчет давления в полости формы для следующего момента времени ($m_0 = m_1$, $V_0 = V_1$, $T_0 = T_1^{\text{cp}}$, $P_0 = P_1'$), в противном случае расчет останавливается, производится увеличение сечения вентиляционных каналов и расчет выполняется циклически начиная с момента времени $\tau = 0$.

Следует отметить, что использование системы компьютерного моделирования «ПроЛит» либо любой другой системы того же класса (ProCast, MAGMASOFT и др.) позволяет совершенствовать методы расчета вентиляционных каналов. Причем для каждой отливки индивидуально учитывается как конфигурация самой отливки, так и конфигурация литниковой системы. Кстати, литниковая система в расчетах вентиляционных каналов в традиционных методиках вообще не учитывается.

Таким образом, на основе методов численного моделирования предложен алгоритм выбора вентиляционного отверстия в кокиле, позволяющий учитывать пространственные процессы динамики газовой фазы и минимизировать образование газовых дефектов в отливке. Алгоритм отличается от известных учетом в проводимых расчетах пространственной конфигурации отливки через моделирование процесса заполнения формы металлом.

Литература

1. Руденко А.Б., Серебро В.С. Литье в облицованный кокиль. М.: Машиностроение, 1987.
2. Вейник А.И. Теория особых видов литья. М.: Машгиз, 1958.
3. Чичко А.Н., Соболев В.Ф., Лихоузов С.Г. Комплекс программных средств «ПроЛит» для моделирования процессов течения и охлаждения расплавов // Программные продукты и системы. 2002. №4. С. 47–48.
4. Чичко А.Н., Лихоузов С.Г. Клеточно-автоматное моделирование процесса течения расплава в форме // Докл. НАН Беларуси. 2001. Т.45. №4. С. 110–114.