



The analysis of calculation methods of the casting moulds filling process is presented. It is shown that the main formulas for calculations of the moulds filling processes are empiric and correct for concrete technological conditions. The conclusion on necessity of using of computer models for developments of gating systems is made.

Ф. С. ЛУКАШЕВИЧ, О. И. ЧИЧКО, В. Ф. СОБОЛЕВ, БИТУ

УДК 519:669.27

О ПРОБЛЕМАХ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВОВ В ЛИТЕЙНЫХ ФОРМАХ

Известно, что технологический процесс заполнения литейных форм является сложнейшим с точки зрения математического описания процессом, основанным на гидродинамических и тепловых уравнениях. Основными параметрами процесса заполнения являются температура заливки, температура формы, время заполнения формы и литниковой системы, начальное давление металла, определяемое гидравлическим набором, теплофизические свойства сплава и формовочной смеси, динамические функции полей скоростей $v = f_1(x, y, z)$, давлений $p = f_2(x, y, z)$, температур $T = f(x, y, z)$. Все отмеченные параметры определяют технологию получения и качество отливки. Среди перечисленных следует выделить время или продолжительность заполнения форм, которая взаимосвязана с характеристиками скорости движущегося расплава. Экспериментально установлено, что продолжительность заливки металлом форм существенно влияет на качество отливки. Для различных времен заполнения в работе [1] установлены различные пределы прочности отливок. Одной из основных проблем разработки технологий литья является расчет временных и скоростных режимов течения металла в литниковой системе. Анализ многочисленных публикаций показывает, что вопросы расчета литниковых систем по-прежнему волнуют теоретиков и практиков литейного производства.

Цель настоящей работы — анализ состояния проблемы расчета литниковых систем.

Известно, что при движении расплавов в литниковой системе могут возникать два вида течений: ламинарное течение, при котором соседние слои расплава не смешиваются между собой, и турбулентное течение, характеризующееся смешением и завихренностью скоростных потоков, т. е., когда слои расплава перемещаются по сложным траекториям. Переходы между ламинарным и

турбулентным движением расплава характеризуются числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{vd}{\nu}, \quad (1)$$

где v — средняя скорость по течению; d — параметр литникового канала; ν — кинематическая вязкость расплава.

Если $Re < Re_{кр1}$ (критическое значение Рейнольдса на нижнем уровне), то формируется ламинарный режим течения расплава, а если $Re > Re_{кр2}$ — то турбулентный ($Re_{кр2}$ — критическое значение Рейнольдса на верхнем уровне). В случае выполнения условия $Re_{кр1} < Re < Re_{кр2}$ образуется переходная зона, в которой могут существовать как ламинарный, так и турбулентный режим течения металла [2]. В работе [3] указывается, что значение $Re_{кр1} = 2320$ для воды, а верхнее число Рейнольдса находится в пределах $4500 \leq Re_{кр2} \leq 50000$. Разброс чисел Рейнольдса связан с тем, что экспериментальные измерения характеристик, влияющих на число Рейнольдса, проведены в различных условиях.

В работе [4] установлено, что ламинарное движение жидкости характерно для пристеночных областей формы и литниковой системы. Причем для алюминиевых сплавов число Рейнольдса не должно превышать для стояка $Re = 10\,000$, для коллектора $Re = 7000$, для питателей $Re = 1100$ и для формы $Re = 280$ [4, 5]. Многочисленные исследования на прозрачных моделях позволили выявить турбулентные потоки в стояках, зумфах, а также в областях встречи потоков в форме [6]. Возникновение турбулентности исследовали в каналах литниковых систем и полости формы с помощью метода рентгенофлуороскопии [7], что дало возможность установить сложнейший характер турбулентности, зависящий от сечения и размеров литниковой системы и формы.

При заполнении литниковой формы дефекты типа недоливы, спай, неслитины непосредственно связаны с процессами теплообмена между расплавом и литниковой системой, а также с температурой заливки металла и формы. Считается, что указанные выше дефекты не будут образовываться в форме, если выполняется условие

$$v_{\phi} > v_{\min \phi}, \quad (2)$$

где v_{ϕ} – скорость расплава в форме; $v_{\min \phi}$ – минимально допустимая скорость металла в форме.

На скорость в форме v_{ϕ} в процессе заливки оказывают влияние теплофизические свойства формы и металла, а также гидравлические характеристики, связанные с высотой и толщиной стенки отливки, числом отливок в форме, способом подвода металла.

Для расчета скорости v_{ϕ} в работе [8] была предложена формула:

$$v_{\min \phi} = \frac{z\beta}{R_{\text{отл}} c \rho_c \ln \frac{t_{\text{зал}} - t_{\phi}}{t_{\text{см}} - t_{\phi}}}, \quad (3)$$

$$t_{\text{см}} = t_{\text{кр}} + \Delta t_{\text{пер}} = \frac{t_{\text{л}} + t_{\text{с}}}{2} + \Delta t_{\text{пер}}, \quad (4)$$

где z – путь, пройденный потоком металла в форме; β – коэффициент теплоотдачи между формой и металлом; $R_{\text{отл}}$ – приведенный размер отливки, равный $\delta_{\text{отл}}/2$ (толщина стенки отливки); c – удельная теплоемкость расплава; ρ_c – плотность расплава; t_{ϕ} – температура формы; $t_{\text{см}}$ – температура смыкания потоков расплава; $\Delta t_{\text{пер}}$ – перегрев расплава над температурой кристаллизации; $t_{\text{л}}$, $t_{\text{с}}$ – соответственно температура ликвида и солидуса металла.

Применение формул (3) и (4) на практике для фасонных отливок проблематично, так как струя, входящая в форму, распадается на отдельные потоки, которые могут сильно изменить динамику процесса заполнения металлом формы. К тому же несложно видеть, что в (3) и (4) отсутствуют характеристики геометрии формы и литниковой системы, что делает представленные формулы практически бесполезными на практике.

Несмотря на указанные недостатки, современная теория литниковых систем построена именно на таких эмпирических формулах. Например, в работе [9] предлагается следующая формула для расчета скоростей в песчаных формах:

$$v_{\phi}^{\min} = \left(\frac{h_{\text{отл}}}{2,09\delta_{\text{отл}} + 4,2} \right)^{1,25}, \quad (5)$$

где $h_{\text{отл}}$ – высота отливки; v_{ϕ}^{\min} – средняя по высоте отливки скорость подъема расплава в форме.

В работе [10] для песчаных форм предложена формула для вычисления минимальной скорости течения расплава:

$$v_{\phi}^{\min} = \left(\frac{h_{\text{отл}}}{\delta_{\text{отл}}} \right)^{0,270 \ln \frac{\sqrt{2gh_{\text{отл}}}}{100}}. \quad (6)$$

Следует отметить, что формула (6) справедлива для условий $t_{\phi} \geq 300$ °С, $b_{\phi} \leq 1$ кВт · с^{1/2}/(м² · с) и перегрев $\Delta \geq 100$ °С.

Для определения минимальной скорости для промышленных сплавов АЛ2, АЛ4, АЛ9 при $\delta_{\text{отл}} = 4-30$ мм, $h_{\text{отл}} \leq 1500$ мм и $m < 500$ кг предложена эмпирическая формула [11]:

$$v_{\phi \text{ нач}} = \frac{3,0-4,2}{\delta_{\text{отл}}}, \quad (7)$$

где $v_{\phi \text{ нач}}$ – начальная скорость подъема металла в форме.

Формула (7), как указывают авторы [11], получена на основе систематизации промышленных испытаний различных отливок при варьировании толщины стенки, массы и высоты.

Интересные формулы нелинейного вида предложены В.Д. Топоровым [12] для песчано-глинистых форм

$$\lg v_{\text{отл}} = 1,97 - 0,41 \lg V - 0,41 \lg \delta_{\text{отл}} + 1,031 \lg h_{\text{отл}} \quad (8)$$

и для металлических форм

$$\lg v_{\text{отл}} = 1,80 - 0,41 \lg V - 0,151 \lg \delta_{\text{отл}} + 0,911 \lg h_{\text{отл}}. \quad (9)$$

Сравнивая формулы (8) и (9), можно видеть, что по входящим параметрам они идентичны. В то же время в формулах коэффициенты при толщине стенки и высоте отливки различаются, что связано с разными условиями охлаждения в песчано-глинистой и металлической формах.

Необходимость использования эмпирических формул для расчета скорости движения металла в форме связана с минимизацией турбулентности потока, задержания шлаковых включений и положительного давления металла в каналах формы [4, 13]. Причем условия для скоростей расплава должны удовлетворять неравенствам [14, 15]

$$\begin{cases} v_c \leq v_c^{\max}, \\ v_k \leq v_k^{\max}, \\ v_{\text{ш}} < v_{\text{ш}}^{\max}, \\ v_{\text{п}} \leq v_{\text{п}}^{\max}, \end{cases} \quad (10)$$

где v_c^{\max} , v_k^{\max} , $v_{\text{ш}}^{\max}$, $v_{\text{п}}^{\max}$ – предельно допустимые скорости в стояке, коллекторе, шлакоуловителе, питателе, при которых возникает турбулентность металла.

Как видно из формулы (10), скорости в литниковой системе должны быть заниженными с точки зрения критерия чисел Рейнольдса. При-

чем каналы литниковой системы должны быть расширяющимися от стояка к питателю, т. е. для площадей сечений должны удовлетворяться условия

$$F_c < F_k < F_n. \quad (11)$$

Одним из основных этапов расчета литниковой системы является расчет наименьшего сечения литниковой системы из принципов гидравлики по формуле

$$F_c = \frac{Q_\phi}{v_c}, \quad (12)$$

где F_c – площадь стояка; Q_ϕ – объемный расход расплава; v_c – скорость течения в стояке, определяемая как:

$$v_c = \mu \sqrt{2gH_p}, \quad (13)$$

где H_p – расчетный напор металла.

Коэффициенты расхода μ могут определяться либо экспериментально [16, 17], либо теоретически из гидравлических расчетов на основе формулы [18]:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi_1 + \sum \xi_2 \left(\frac{F_c}{F_k}\right)^2 + \sum \xi_3 \left(\frac{F_c}{F_n}\right)^2}}, \quad (14)$$

где $\sum \xi_1$, $\sum \xi_2$, $\sum \xi_3$ – соответственно сумма местных и линейных коэффициентов гидравлических сопротивлений для стояка, коллектора и питателей.

Важнейшей характеристикой процесса заполнения формы является время заполнения. Максимальный предел продолжительности заливки ограничивается незаполнением формы с одной стороны. С другой стороны, минимизация процесса заполнения ограничивается теплофизическими свойствами металла и формы и начальными условиями по температурам формы и металла. Вопрос об определении оптимального времени заполнения – наиболее важный в технологических расчетах. В работе [19] предлагается система неравенств, накладываемая на время заполнения формы:

$$\begin{cases} \tau < \tau_n, \\ \tau > \tau_{\text{газ}}, \\ \tau < \tau_{\text{пов}}, \end{cases} \quad (15)$$

где τ_n – максимальная продолжительность заливки, при которой не происходит образование недоливов; $\tau_{\text{газ}}$ – минимальная продолжительность заливки, при которой воздух и газы успевают удалиться из формы; $\tau_{\text{пов}}$ – максимальная продолжительность заливки, при которой не образуются поверхностные дефекты.

Анализируя систему (15), можно видеть, что применение ее на практике проблематично из-за

трудностей в определении τ_n , $\tau_{\text{газ}}$, $\tau_{\text{пов}}$. Поэтому наиболее полезными в практическом отношении являются эмпирические формулы по определению времени заливки. Авторы работ [20–22] предлагают оперировать в технологических расчетах формулой

$$\tau = AM^n, \quad (16)$$

где A и n – постоянные, которые в зависимости от типа сплава (сталь, чугун) варьируются в интервале $A=0,06-3,7$ и $n=0,38-0,71$.

В ряде работ рекомендуется формула [23–25], учитывающая толщину стенки отливки:

$$\tau = B\delta_{\text{отл}}^T M^n. \quad (17)$$

Формулы для определения времени заливки формы не являются универсальными и основываются исключительно на обработке экспериментальных данных. В работах [26, 27] приведена формула Соболева, являющаяся одним из вариантов формулы (17):

$$\tau = B\sqrt[3]{\delta_{\text{отл}} M}. \quad (18)$$

Легко видеть, что (18) – частный случай формулы (17). Известная формула Г.Дитерта $\tau = A\sqrt{M}$ по определению времени заливки кристаллизующегося металла в форме является частным случаем формулы (16).

Анализируя многочисленные работы, использующие время заливки, можно сделать вывод о том, что оптимальная продолжительность заливки зависит от гидравлических и физико-химических свойств металла и формы. К сожалению, универсального пути для расчета времени заливки на основе инженерных подходов пока не найдено. Поэтому на практике для расчета литниковопитающих систем пользуются в основном формулами (16)–(18) или их аналогами, используя эмпирические теплофизические коэффициенты для конкретных форм и сплавов [23, 28].

Авторами работ [23, 28] предложен метод, при котором расход расплава определяют из условия полного заполнения формы. При этом площадь сечения стояков (F_c) и расход металла ($Q_{\phi \text{ нач}}$) рассчитывается как [11]:

$$F_c = \frac{(3,0-4,2)M}{\rho_c h_{\text{отл}} \delta_{\text{отл}} v_c}, \quad (19)$$

$$Q_{\phi \text{ нач}} = \frac{(3,0-4,2)M}{\rho_c h_{\text{отл}} \delta_{\text{отл}}}, \quad (20)$$

где ρ_c , v_c – соответственно плотность и скорость сплава.

Предложенный метод учитывает минимальную скорость подъема расплава в форме и обеспечивает ламинарный режим процесса течения расплава с минимизацией турбулентности.

Одним из важнейших факторов, определяющих режим заполнения формы, является способ

и место подвода металла в форму. От места подвода зависит степень разбрызгивания расплава и разрушения форм и стержней. Место подвода определяет распределение температур по всем сечениям отливки. Появление застойных и проточных зон расплава также зависит от мест подвода металла. При одной конструкции литниковой системы на различных местах подвода формируется различная динамика потока расплава в форме [29]. На основе опытных данных при выборе мест подвода [30] рекомендуется следующее.

1. Расплав необходимо подводить в тонкие сечения, а не массивные. Причем во избежание перегревов следует применять рассредоточенный подвод расплава, располагая питатели по возможности равномерно.

2. Во избежание завихрений и высокой турбулентности нужно использовать наклонные питатели. Подвод в нижнюю часть отливки способствует ламинарному режиму заполнения.

3. При уменьшении разбрызгивания металла используют способы подвода металла, максимально учитывающие конфигурацию отливки.

4. Для предотвращения образования неслитин и других дефектов этого типа расстояние между осями питателей находят из выражения

$$l_n = \frac{p}{n} < l_p, \quad (21)$$

где p — наружный диаметр отливки в месте подвода расплава; n — число питателей; l_p — максимальный радиус действия питателей, при котором еще возможно слияние отдельных струй расплава.

Важным фактором, определяющим режим заполнения, является тип литниковой системы, который выбирается с учетом положения отливки в форме и наличия разъема в форме; размеров и габаритов отливки; свойств сплава; эффективности удаления питателей; возможности использования прибылей [11, 31, 32]. При этом выделяют нижнюю, боковую и верхнюю литниковые системы.

Нижняя литниковая система обеспечивает спокойное заполнение формы, исключая при этом разбрызгивание и окисление расплава. Нижняя литниковая система легко удаляется при обрубке. Верхняя литниковая система обеспечивает хорошую заполняемость при кратчайшем пути движения металла от чаши к форме. Эта конструкция проста и минимизирует местные перегревы формы и связанные с этим дефекты отливки. Но при верхней литниковой системе идет интенсивный захват воздуха и перемешивание, приводящее к турбулентности и пенообразованию. При верхней литниковой системе создается опасность размыва форм и стержней за счет большой кинетической энергии струи. Боковая литниковая

система сочетает в себе достоинства верхней и нижней литниковых систем и является как бы промежуточным («оптимальным») вариантом для получения отливки. Кроме перечисленных выше систем, в литейном производстве используют вертикально-щелевую и ярусную литниковые системы. Вертикально-щелевая литниковая система обеспечивает спокойное заполнение металлом формы, а также хорошо задерживает неметаллические включения путем отшлаковывания их в коллекторе и верхнем колодце, создавая хорошие условия для последовательной кристаллизации снизу вверх. Этот тип литниковой системы наиболее приемлем для тонкостенных отливок, для которых выполняется условие [31]:

$$\frac{h_{отл}}{\delta_{отл}} > 50. \quad (22)$$

Таким образом, анализ литературных данных показывает, что характеристики движения расплава в литниковой системе описываются эмпирическими формулами, позволяющими на полуколичественном уровне провести инженерные расчеты технологического процесса заполнения форм. В этом случае говорить об оптимальности литниковых систем довольно сложно. Это является причиной литейного брака при получении отливок. В связи с этим представляет интерес развитие компьютерных методов и технологий, позволяющих оптимизировать пути выбора литниковых систем.

Литература

1. Чистяков В.В., Барбашин Н.Н. Влияние характера заполнения форм на механические свойства отливок // Литейное производство. 1971. № 2. С. 7–9.
2. Монин А.С. Статистическая гидромеханика. В 2-х ч. Ч. 1. Механика турбулентности. М.: Наука, 1965.
3. Шлихтинг Г. Возникновение турбулентности / Пер. с нем. Г.А. Вольперта; Под ред. Л.Г. Лойтянского. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
4. Ноткин Е.М. Принципы построения литниковых систем для алюминиевых сплавов // Фасонное литье алюминиевых сплавов. М.: Машгиз, 1953. С. 99–141.
5. Черный С.А. Гидромоделирование и расчеты литниковых систем для легких цветных сплавов // Новое в теории и практике литейного производства. Пермь: Машпром, 1966. С. 95–99.
6. Ицкович Е.А. Моделирование заливки алюминиевых и магниевых сплавов // Литейное производство. 1967. № 4. С. 13–16.
7. Middleton J.M., White P. Flow of liquid steel gating systems // Proc. Ann. Conf, Harrogate, 1970, Steel Foundry Practice. S. L., 1970.
8. Степанов Ю.А. и др. Литье тонкостенных конструкций / Под общ. ред. Ю.А. Степанова. М.: Машиностроение, 1966.
9. Дубицкий Г.М., Токарев Ж.В. Конструкции и методы расчетов литниковых систем для отливок из цветных сплавов // XVIII Всесоюз. конф. литейщиков. М.: Машиностроение, 1966. С. 221–234.
10. Чистяков В.В., Воздвиженский В.М. Расчет критической скорости заполнения формы // Литейное производство. 1971. № 3. С. 9–11.

11. Цветное литье. Легкие сплавы / Под ред. И.Ф. Колобнева. М.: Машиностроение, 1966.
12. Топоров В.Д. О некоторых закономерностях процесса заполнения литейных форм магниевыми сплавами // Совершенствование процессов производства отливок. Пермь: Изд-во ППИ, 1971. № 94. С. 135–138.
13. Галдин Н.М., Шаров М.В. Расчет литниковых систем для алюминиевых сплавов // Литейное производство. 1971. № 2. С. 3–5.
14. Флеминг М.С., Тейлор Г. Применение теории к практике в производстве отливок из легких металлов // Материалы 25-го Междунар. конгресса литейщиков. М.: Машгиз, 1961. С. 156–186.
15. Wallace J.F., Evans E.V. Principles of Gating // Foundry. 1959. Vol. 87. N. 10. P. 74–80.
16. Галдин Н.М., Надежин А.М. Экспериментальное определение коэффициента расхода литниковых систем для отливок из алюминиевых сплавов // Вопросы производства отливок из алюминиевых сплавов. М.: Машиностроение, 1966. Вып. 67. С. 97–112.
17. Галдин Н.М., Шаров М.В., Надежин А.М. Исследование литниковых систем, применяемых при литье алюминиевых сплавов // Исследование процессов литья алюминиевых, магниевых и титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1969. Вып. 70. С. 87–96.
18. Поручиков Ю.П., Опаич П.А. О возможности достижения автотекучего режима течения в литниковых каналах // Изв. вузов. Черная металлургия. 1970. № 11. С. 148–152.
19. Рыжиков А.А. Теоретические основы литейного производства. 2-е изд. М.; Свердловск: Машгиз, 1961.
20. Барбашин Н.Н., Неуструев А.А., Чистяков В.В. Влияние условий заполнения форм на свойства крупногабаритных тонкостенных отливок // Свойства сплавов в отливках / Тр. 17-го совещ. по теории литейных процессов АН СССР. М.: Наука, 1975. С. 144–148.
21. Поручиков Ю.П., Топоров В.Д. О структуре некоторых эмпирических формул для определения оптимальной продолжительности заполнения литейных форм сплавами // Повышение качества и надежности литых деталей. Свердловск, 1971. С. 203–207.
22. Топоров В.Д., Поручиков Ю.П., Топорова Д.В. Разработка многофакторной математической модели оптимальной продолжительности заполнения литейных форм // Технология и организация производства. 1974. № 6. С. 37–39.
23. Чистяков В.В., Воздвиженский В.М. Расчет минимального узкого сечения литниковой системы для отливок коробчатой формы // Известия высших учебных заведений. 1972. № 4. С. 146–149.
24. Чуркин Б.С., Дубицкий Г.М. Расчет минимально допустимых скоростей подъема уровня металла при литье сплавов АЛ2 и АЛ9 в песчаные формы // Исследование процессов формирования отливок. Пермь: Изд-во ППИ, 1969. С. 33–36.
25. Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки. В 2-х ч. Ч. 1. Тепловые основы теории. М.: Машиностроение, 1976.
26. Дубицкий Г.М. Литниковые системы. М.; Свердловск: Машгиз, 1962.
27. Соболев К.А. К расчету литниковых систем // Литейное производство. 1975. № 11. С. 45–46.
28. Рабинович А.Р. Теория и расчет процесса заполнения форм вертикальных тонкостенных отливок при подводе металла сифоном // Литейное производство. 1967. № 3. С. 22–26.
29. Бастратов В.К. Некоторые рекомендации по выбору способа и места подвода металла в полость формы // Совершенствование процессов производства отливок. Пермь: Изд-во ППИ, 1971. С. 19–27.
30. Чистяков В.В., Неуструев А.А., Барбашин Н.Н. Заполнение форм при вертикально-шелловом подводе металла // Литейное производство. 1974. № 3. С. 26–28.
31. Askeland D.R., Patel D.S., Wolf R.V. Wirkung der Anschnittgestaltung auf die Fehlerfreiheit von Kokillenguss aus Aluminiumlegierungen // Gisser – Prax. 1976. N. 18. S. 263–267.