



The method of physical modeling of hydrodynamic processes of alloys molding is developed. It is shown that as a liquid it is necessary to use water and diethyl ether at molding of steel, silumins, tin-base bronzes and water-glycerine solutions.

В. Ю. СТЕЦЕНКО, ИТМ НАН Беларуси

УДК 001.57:621.74.047

МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЛИТЬЕ СПЛАВОВ

Гидродинамическая обстановка при заполнении литниковых систем и литейных форм носит сложный, нестационарный характер. Кроме турбулентных потоков, в движении участвуют воздушные пузыри и неметаллические включения. Для определения гидродинамических процессов и соответствующих параметров при литье сплавов целесообразно использовать метод физического моделирования на прозрачных моделях и жидкостях. Это позволит не только качественно и количественно определить гидродинамическую обстановку при литье, но и упростить выбор соответствующих уравнений, их решения и проверку на адекватность.

Чтобы выполнялось физическое подобие реального и модельного гидродинамических процессов, необходима инвариантность определяющих критериев подобия [1]. При литье сплавов основными параметрами, от которых зависит гидродинамика процессов, являются: v – кинематическая вязкость, g – ускорение свободного падения, v – скорость, ρ – плотность жидкости, p – давление, l – линейный размер, t – время, $\Delta\rho_0$ – разность плотностей жидкости и воздуха, $\Delta\rho$ – разность плотностей неметаллической частицы и жидкости. Независимые первичные величины: l , t и m – масса. Тогда, согласно Пи-теореме Бэкингема, можно составить шесть определяющих критериев подобия: $\frac{l}{vt} = \text{Sh}$ – критерий Струхала; $\frac{v^2}{gl} = \text{Fr}$ – критерий Фруда; $\frac{p}{\rho v^2} = \text{Eu}$ – критерий Эйлера; $\frac{lv}{v} = \text{Re}$ – критерий Рейнольдса; $\frac{\Delta\rho_0 gl^3}{\rho v^2} = \text{Ar}_1$ – критерий Архимеда для движения воздушных пузырей в жидкости; $\frac{\Delta\rho gl^3}{\rho v^2} = \text{Ar}_2$ – критерий Архи-

меда для движения неметаллических частиц в жидкости. Учитывая, что $\Delta\rho_0 = \rho$, получаем $\text{Ar}_1 = \frac{gl^3}{v^2}$.

Для модельного и реального гидродинамических процессов масштабы моделирования равны: $K_l = \frac{l_2}{l_1}$; $K_v = \frac{v_2}{v_1}$; $K_p = \frac{p_2}{p_1}$; $K_t = \frac{t_2}{t_1}$; $K_{\Delta\rho} = \frac{\Delta\rho_2}{\Delta\rho_1}$. Параметры с индексом 2 относятся к модельному процессу, а с индексом 1 – к реальному процессу. При заполнении литниковой системы и (или) литейной формы свободной струей из ковша или заливочного устройства можно принять $p = \frac{\rho v^2}{2}$. В этом случае инвариантность определяемых критериев подобия, выраженная в масштабах моделирования, приводит к системе уравнений:

$$\begin{aligned} K_l &= K_v K_t, \\ K_v^2 &= K_l, \\ K_l K_v &= K_p, \\ K_l^3 &= K_v^2, \\ K_l^3 K_{\Delta\rho} &= K_p K_v^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Система

$$\begin{aligned} K_l &= K_v = K_l^{1/2}, \\ K_l &= K_v^{2/3}, \\ K_{\Delta\rho} &= K_p. \end{aligned} \quad (2)$$

Основными литейными сплавами являются силумины, сталь, оловянистые бронзы, чугуны. Жидкий силумин при 600–800 °С имеет: $\rho_1 = 2400$ кг/м³ и $\nu_1 = 4 \cdot 10^{-7}$ м²/с [2, 3]. Вода при 20 °С имеет

$\rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3$ и $\nu_2 = 10 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. Тогда в соответствии с (2) получим $K_v = 2,5$, $K_l = 1,84$, $K_{\Delta\rho} = 0,4$. Вода при $70 \text{ }^\circ\text{C}$ имеет $\nu_2 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ [4]. Тогда $K_v = 1$, $K_l = 1$, $K_{\Delta\rho} = 0,4$. Чтобы $K_l < 1$, необходимо в качестве модельной жидкости использовать диэтиловый эфир. При $20 \text{ }^\circ\text{C}$ он имеет $\rho_2 = 720 \text{ кг/м}^3$ и $\nu_2 = 3,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ [4]. В этом случае $K_v = 0,8$, $K_l = 0,86$, $K_{\Delta\rho} = 0,3$.

При заполнении литейных форм под давлением инвариантность определяющих критериев подобия, выраженная в масштабах моделирования, приводит к следующей системе уравнений:

$$\begin{aligned} K_l &= K_v K_l, \\ K_v^2 &= K_l, \\ K_l K_v &= K_v, \\ K_l^3 &= K_v^2, \\ K_l^3 K_{\Delta\rho} &= K_p K_v^2, \\ K_p &= K_p K_v^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Система (3) имеет следующее решение:

$$\begin{aligned} K_l &= K_v = K_l^{1/2}, \\ K_l &= K_v^{2/3}, \\ K_{\Delta\rho} &= K_p, \\ K_p &= K_p K_l. \end{aligned} \quad (4)$$

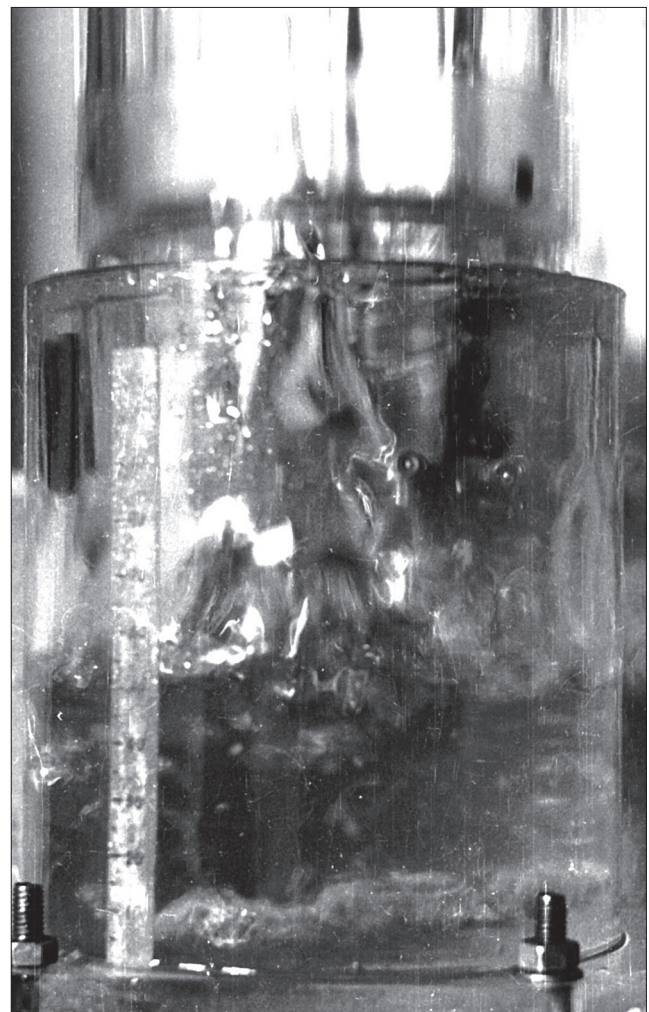
Если в качестве модельной жидкости выбрать воду при $20 \text{ }^\circ\text{C}$, то при физическом моделировании литья под давлением силумина в соответствии с (4) получим $K_l = 1,8$, $K_{\Delta\rho} = 0,4$, а $K_p = 0,74$. Нагретая до $70 \text{ }^\circ\text{C}$ вода, дает $K_p = 0,4$. Если в качестве модельной жидкости выбрать диэтиловый эфир, то $K_p = 0,26$. Это наиболее приемлемо, поскольку модельное давление меньше реального в 4 раза.

При заполнении литниковой системы и (или) литейной формы жидкой сталью 30 свободной струей при $1630\text{--}1700 \text{ }^\circ\text{C}$ $\nu_1 = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $\rho_1 = 6750 \text{ кг/м}^3$ [5]. Если в качестве модельной жидкости выбрать воду при $20 \text{ }^\circ\text{C}$, то в соответствии с (2) получим $K_v = 1,82$, $K_l = 1,5$, $K_{\Delta\rho} = 0,15$. Чтобы уменьшить K_l , необходимо использовать подогретую воду или диэтиловый эфир.

Оловянистые бронзы при $1000\text{--}1200 \text{ }^\circ\text{C}$ в среднем имеют $\nu_1 = 3,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $\rho_1 = 8100 \text{ кг/м}^3$ [6]. Если в качестве модельной жидкости выбрать воду при $20 \text{ }^\circ\text{C}$, то в соответствии с (2) имеем $K_v = 3$; $K_l = 1,8$; $K_{\Delta\rho} = 0,12$. Чтобы уменьшить K_l , необходимо использовать подогретую воду или диэтиловый эфир. Его также целесообразно использовать при физическом моделировании процесса литья оловянистых бронз под давлением.

Чугун с углеродным эквивалентом 3,8 при $1280 \text{ }^\circ\text{C}$ имеет $\nu_1 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, а при $1255 \text{ }^\circ\text{C}$ – $20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ [7]. При этом $\rho_1 = 6800 \text{ кг/м}^3$ [8]. Если при физическом моделировании процесса заполнения литниковой системы чугуном с углеродным эквивалентом 3,8 при температуре $1280 \text{ }^\circ\text{C}$ в качестве модельной жидкости выбрать воду при $20 \text{ }^\circ\text{C}$, то в соответствии с (2) получим $K_v = 0,2$, $K_l = 0,34$, $K_{\Delta\rho} = 0,15$. Если моделировать водой гидродинамические процессы в литейной форме (кристаллизаторе) при $1255 \text{ }^\circ\text{C}$, то имеем $K_v = 0,05$, $K_l = 0,063$, $K_{\Delta\rho} = 0,15$. В виду малости линейного масштаба для физического моделирования гидродинамических процессов при литье чугуна целесообразно использовать водно-глицериновые растворы.

Разработанная методика физического моделирования на прозрачных моделях и жидкостях была опробована для моделирования процессов: заполнения литниковой системы, кристаллизатора, извлечения отливки при литье чугуна с углеродным эквивалентом 3,8 методом непрерывно-циклического литья направленным затвердеванием. Сред-



Процесс извлечения отливок из кристаллизатора на модельной установке

няя температура расплава в литниковой системе составляла 1280 °С, а в кристаллизаторе – 1255 °С. В качестве модельной жидкости использовали водно-глицериновые растворы разной плотности и вязкости таким образом, чтобы $K_l = 0,64$. Использовали также и единую модельную жидкость, но в этом случае масштабные коэффициенты для литниковой системы и кристаллизатора были разные.

В качестве материала модельных неметаллических частиц использовали древесину. В результате моделирования было установлено, что открытая литниковая система пропускает в кристаллизатор как воздушные пузыри, так и неметаллические (шлаковые) частицы. Это подтверждается на реальном объекте. Использование в литниковой чаше специального элемента в виде глухонного стакана устраняло брак отливок по газовым раковинам и неметаллическим включениям. Кроме того, исчезал колебательный процесс в системе «литниковая система-кристаллизатор» при их заполнении расплавом. Это также подтверждалось моделированием гидродинамического процесса.

Как показали многочисленные эксперименты на модельной установке, гидродинамические про-

цессы при извлечении отливок в случае непрерывно-циклического литья направленным затвердеванием достаточно сложные (см. рисунок). Качественно их можно разделить на две группы по некоторой критической скорости извлечения. Это такая максимальная величина, при которой не происходит фонтанирование жидкости и проникновения воздушных пузырей в ванну кристаллизатора. С помощью разработанной методики были установлены критические скорости извлечения отливок, определены их реальные значения, которые подтвердились в процессе литья и анализа макроструктуры заготовок. В результате проведенных модельных испытаний были определены рациональные конструктивные параметры литниковой системы, режимов литья и извлечения отливок, повышены стабильность и качество литья.

Таким образом, разработана методика физического моделирования на прозрачных модели и жидкости гидродинамических процессов литья сплавов. В качестве модельных жидкостей целесообразно использовать при литье стали, силуминов, оловянистых бронз воду и диэтиловый эфир, а для чугуновых расплавов – водно-глицериновые растворы.

Литература

1. Г у х м а н А. А. Введение в теорию подобия. М.: Высш. шк., 1963.
2. С т р о г а н о в Г. Б., Р о т е н б е р г В. А., Г е р ш м а н Г. Б. Свойства алюминия с кремнием. М.: Металлургия, 1977.
3. Н и к и т и н В. И., Н и к и т и н К. В. Наследственность в литых сплавах. М.: Машиностроение-1, 2005.
4. Справочник химика. Т.1. Л.: Химия, 1971.
5. Е ф и м о в В. А. Разливка и кристаллизация стали. М.: Металлургия, 1976.
6. Ч у р с и н В. М. Плавка медных сплавов. М.: Металлургия, 1982.
7. Л е в и Л. И., К л е ц к и н Я. Г. Жидкотекучесть чугуна // Литейное производство, 1972. № 3. С. 37.
8. М и л ь м а н Б. С., К л о ч н е в Н. И., И в а х н е н к о И. С. и др. Плотность жидкого чугуна и процессы его структурообразования // Литейное производство. 1969. № 5. С. 26–28.