

граничного условия // Теплопередача. – 1961. – № 4. – С. 158–159. 5. Дю з и н б е р г Г.М. Замечания о невязном методе конечно-разностного расчета теплопроводности // Теплопередача. – 1962. – Т. 83. – Сер. С. № 1. – С. 121–122. 6. Н и к и т е н к о Н.И., Н и к и т е н к о Ю.Н. Исследование тепломассопереноса при кристаллизации сплавов с учетом двухфазной зоны // Промышленная теплотехника. – 1983. – Т. 5. – № 6. – С. 7–13.

УДК 621.746

Р.И. ЕСТЬМАН, В.А. АНТОНОВ,
В.М. КАЙНОВ, Ю.П. ЯРМОЛЬЧИК,
А.Н. ИВАНИСОВ

РАСЧЕТ ДВУМЕРНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ОТЛИВКИ И ПРЕСС-ФОРМЫ НА ЭВМ

Температурное поле потока жидкого металла в процессе заполнения пресс-формы определяется гидродинамикой впрыска и прессования, а также условиями теплоотдачи на поверхности пресс-формы. Эксперименты показывают [1], что при заполнении пресс-формы расплав имеет неравномерную температуру по длине отливки, причем в сечении вблизи литника температура близка к температуре заливки $T_{зав}$, а в конечном сечении может приближаться к температуре кристаллизации $T_{кр}$.

При теоретическом изучении процесса задача сводится к решению уравнения теплопроводности в отливке и в форме с учетом фазовых превращений в расплаве при соответствующих граничных условиях. Рассмотрим режим охлаждения плоской отливки неограниченной длины прямоугольного поперечного сечения в пресс-форме с равномерной толщиной стенок (рис. 1). Поместим начало координат в начальном сечении, ось x направим по геометрической оси, а ось y поперек отливки. Тогда задача сводится к решению уравнений:

$$\begin{aligned} c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \right), \quad 0 \leq y \leq a_1; \\ c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \right), \quad a_1 \leq y \leq a_2 \end{aligned} \quad (1)$$

при условиях непосредственного контакта отливки и формы

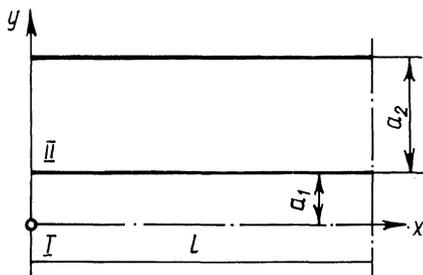
$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}, \quad T_1 = T_2 \quad \text{при } y = a_1$$

и конвективного теплообмена на поверхности формы

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = \alpha (T_2 - T_0) \quad \text{при } y = a_2.$$

На оси x имеем условие симметрии $\frac{\partial T_1}{\partial y} = 0$ при $y = 0$. Здесь индексы 1 и 2

Рис. 1. Область расчета



относят параметры соответственно к отливке и форме; T — температура; λ , c , ρ — коэффициенты теплопроводности, теплоемкости и плотности; a — коэффициент теплоотдачи с поверхности пресс-формы; T_0 — температура окружающей среды. Теплофизические характеристики изменяются с температурой T .

Ограничим область решения задачи сечением, в котором металл имеет температуру кристаллизации, отстоящем от начала на расстоянии l . Теплообмен в начальном и конечном сечениях зависит от условий теплового контакта. Предполагая продолжение пресс-формы за нулевое и конечное сечения и переход отливки непосредственно в литник, оставим граничные условия при $x = 0$ и при $x = l$ свободными. При достаточно большой длине отливки l эти условия слабо влияют на режим охлаждения.

Начальные условия, соответствующие моменту заполнения формы, могут быть определены либо экспериментально, либо теоретически из решения уравнений движения и энергии жидкого металла при его заполнении полости формы.

Пользуясь результатами, полученными проф. А.И. Вейником при приближенном решении гидродинамической задачи и предполагая постоянство температуры по сечению расплава в момент окончания заполнения полости, сформулируем начальное условие для отливки в виде

$$T_1 = T_{\text{зал}} - \frac{\sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2} (T_3 - T_{2H})}{\sqrt{\pi a_1 c_1 \rho_1}} \frac{x}{\sqrt{v(l-x)}} \quad \text{при } t = 0, \quad (2)$$

где v — средняя скорость заполнения полости формы металлом.

Температуру по сечению формы в начальный момент принимаем изменяющейся по линейному закону от значения (2) до температуры окружающей среды T_0 .

В процессе охлаждения отливки металл переходит из жидкого состояния в твердое. В период фазового перехода первое из уравнений (1) распадается на два, определяющие теплопроводность в жидкой и твердой фазах с добавлением условий на границе раздела фаз ξ :

$$\lambda_{1T} \text{grad}(T_1)_{\xi+0} - \lambda_{1Ж} \text{grad}(T_1)_{\xi-0} = -r \rho d\xi/dt,$$

где r — теплота фазового перехода; индекс ж относится к жидкой фазе, а т — к твердой.

Вводя в рассмотрение δ -функцию и разрывные теплофизические коэффициенты, процесс фазового перехода можно описать с помощью одного уравнения:

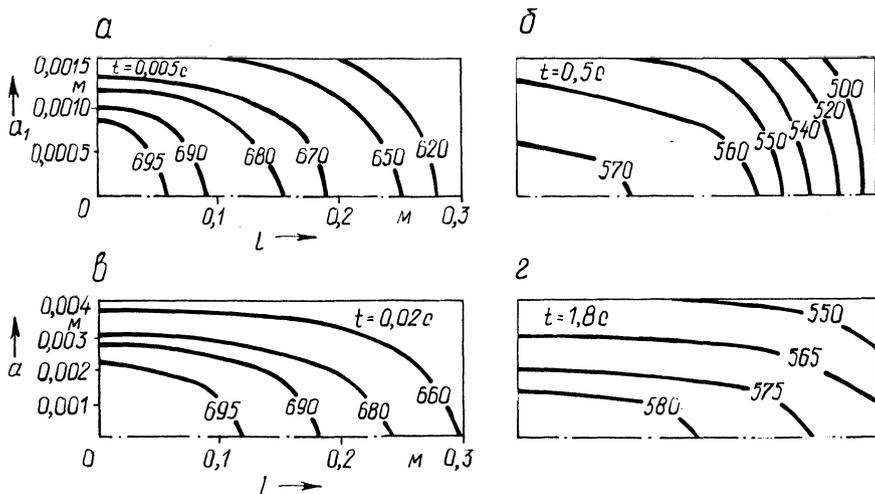


Рис. 2. Температурные поля отливки в различные моменты времени:

а, б – тонкостенная отливка $a_1 = 0,0015$ м; в, г – толстостенная отливка $a_1 = 0,004$ м

$$\rho_1 (c_1 + r\delta (T_1 - T_3)) \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \right); \quad (3)$$

$$\rho_1, c_1, \lambda_1 = \begin{cases} \rho_{1г}, c_{1г}, \lambda_{1г} & \text{при } T_1 < T_3; \\ \rho_{1ж}, c_{1ж}, \lambda_{1ж} & \text{при } T_1 > T_3. \end{cases}$$

При решении уравнения (3) применяется метод сглаживания [1].

Решение поставленной задачи производилось на ЭВМ ЕС-1035. Результаты расчета полей температур представлены на рис. 2.

Анализ результатов показывает, что независимо от толщины отливки поле температур в процессе охлаждения носит двумерный характер. Причем с течением времени закономерность в распределении температур по сечению отливки неодинакова. Начальное поле формируется по условиям выпрыска в пресс-форму. В этот момент градиент температур по длине отливки наибольший. Параметр его увеличивается с увеличением толщины отливки $2a_1$. Так, при $2a_1 = 0,003$ м перепад температур ΔT на длине $l = 0,3$ м несколько больше 100 К, в то время как при $2a_1 = 0,008$ м ΔT на той же длине около 50 К отливки имеет тенденцию к выравниванию, и в период кристаллизации перепад температур $\Delta T \leq 10$ К независимо от толщины отливки.

Дальнейшее охлаждение затвердевшего металла сопровождается восстановлением практически первоначальной неравномерности поля температур. Объясняется это равномерностью начала и окончания фазового перехода вдоль оси отливки. Расчеты показывают, что на конечном участке отливки фазовый переход происходит в период 0,1–0,23 с при $2a_1 = 0,003$ м и в период 0,8–

1,8 с при $2a_1 = 0,008$ м; соответствующие моменты времени на начальном участке имеют значения 0,25–0,5 с и 1,2–2,4 с. Длительность фазового перехода возрастает от периферийных участков к началу отливки. Анализ законов изменения температуры в охлаждаемой отливке по различным направлениям показывает, что поперечные усредненные градиенты температур превосходят соответствующие продольные значения в 80–100 раз в начальный период охлаждения и в 500–1000 раз в период кристаллизации. Здесь большие числа соответствуют большей толщине отливки. В связи с этим потоки теплоты вдоль оси пренебрежимо малы в сравнении с потоками теплоты к стенке пресс-формы. Для расчета процесса затвердевания с достаточной точностью в каждом поперечном сечении отливки может быть использована одномерная модель теплопроводности. Предполагаемый метод расчета на основе двумерной модели теплопроводности предназначен для анализа неравномерности охлаждения отливки по длине с учетом характера впрыска и заполнения металлом пресс-формы.

ЛИТЕРАТУРА

Г сь м а н Р.И., Ж м а к и н Н.П., Ш у б Л.И. Расчеты процессов литья. – Мн.: Выш. шк., 1977. – 261 с.

УДК 621.1.016.4

Е.В. КРАВЧЕНКО, Г.Г. ТЮХАЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ НАМОРАЖИВАНИЕМ

Как известно, на процесс формирования отливки значительное влияние оказывает протекание больших масс металла через рассматриваемое сечение формы. Если форма служит для подвода жидкого металла, как это имеет место при непрерывном литье намораживанием [1], то течение его приводит к разогреву этой формы и изменению теплового режима системы отливка–форма. Случай, когда расплавленный металл передается по каналу литниковой системы, относится к наиболее простому случаю течения металла с малой интенсивностью охлаждения. При этом неметаллическая форма может прогреваться с любой интенсивностью – все зависит от свойств самой формы.

Важным фактором, влияющим на ход непрерывного литья, а также на температурное поле отливка–форма, является затвердевание металла в процессе течения. Условия кристаллизации металла при движении значительно отличаются от условий затвердевания неподвижного металла: рост твердой корки затрудняется вследствие смыва ее движущимся металлом. Жидкое состояние металла ограничивается для чистых металлов и эвтектических сплавов интервалом температур кристаллизации. В пределах этого интервала расплав находится в двухфазном состоянии.

С точки зрения процесса непрерывного литья представляют интерес установившееся температурное поле формы при течении металла в литниковом канале и момент, когда происходит "схватывание" потока.