

От редакции

Кафедра «Литейное производство и материаловедение» МГТУ им. Г.И. Носова была образована в 2013 году путем слияния кафедр «Электрометаллургия и литейное производство» и «Материаловедение и термическая обработка металлов». В настоящее время на кафедре ЛП и М работает 8 докторов технических наук, из них 7 профессоров, 7 доцентов, старшие преподаватели, ассистенты и учебно-вспомогательный персонал. Научные разработки коллектива кафедры выполняются в рамках научной школы «Развитие теории и технологий металлургического производства», по научным направлениям: «Развитие теории и технологии литейных сплавов и процессов» (руководители – д-р техн. наук, проф. Колокольцев В.М., д-р техн. наук, проф. Вдовин К.Н.) и «Повышение эксплуатационной стойкости деталей и оборудования, работающих в условиях абразивного изнашивания и агрессивного воздействия окружающей среды» (руководитель – д-р техн. наук, проф. Емельюшин А.Н.).

Лаборатории кафедры оснащены современным оборудованием для обеспечения учебного процесса и выполнения научно-исследовательских работ. Для научных исследований широко привлекаются студенты 3-5 курсов. Лучшие студенты продолжают научную работу в аспирантуре. Обобщенные результаты исследований представляются в виде монографий, учебников, учебных и методических пособий, изобретений, статей, отчетов и используются в процессе обучения студентов.

УДК 669.01 / 669.018.28

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ СИСТЕМЫ ОТЛИВКА–ЛИТЕЙНАЯ ФОРМА В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОВЕСНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ КОМПЛЕКСНОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ

Колокольцев В.М., Вдовин К.Н., Савинов А.С., Сеницкий Е.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы расчета температурных полей в системе расплав – отливка–литейная форма, тепловая задача в системе расплав – затвердевший сплав – литейная форма рассматривается в аспекте постановки и решения нестационарной задачи Стефана.

Ключевые слова: отливка, сплав, литейная форма, температура, теплоемкость, теплопроводность.

Введение

Основную роль в формировании отливки и ее свойствах играют химический состав сплава и теплофизические характеристики технологических процессов получения отливок. Для литья сплавов со специальными свойствами – износостойких, теплостойких, коррозионностойких тепловые процессы играют главенствующую роль. Это объясняется тем, что для этих типов сплавов необходимо учитывать широкие возможности управления макро- и микроструктурой, а как следствие, механическими, специальными и служебными свойствами [1]. В связи с этим исследование теплообмена между отливкой и формой с целью определения и прогнозирования температурных полей имеет важное значение как с теоретической, так и практической точки зрения.

Основная часть

К теоретическим и практическим задачам производства отливок из сплавов специального назначения, которые решают методами тепловой теории литья, можно отнести определение закона изменения температуры и затвердевания отливки в зависимости от характеристик литейных форм, теплофизических свойств их материалов. Решение этих задач позволяет установить закономерности формирования микро- и макроструктуры отливки, прогнозировать режимы

охлаждения отливки и ее взаимодействие с литейной формой, оценивать такие характеристики процессов литья, как линейную скорость затвердевания, перепады температур между элементами отливки. Зная указанные параметры процессов литья, химический состав сплава, можно оценить расчетным путем характеристики формирующейся макро- и микроструктуры, механические, служебные и специальные свойства получаемых отливок [2].

Процессы теплопереноса описываются нелинейными дифференциальными уравнениями, с дополнительным рядом слагаемых и граничными условиями. Классическая задача Стефана рассматривает фазовые превращения с участием твердой фазы: твердое тело – жидкость. В современной интерпретации задача Стефана представляет собой класс математических моделей, описывающих тепловые, диффузионные или термодиффузионные процессы, сопровождающиеся фазовыми превращениями среды и поглощением или выделением скрытой теплоты. Математические модели в этом случае должны учитывать наличие подвижных заранее неизвестных границ фазового перехода.

Зона кристаллизации большинства литейных сплавов представляет собой двухфазную область, для которой четко определить фронт кристаллизации невозможно. Такую область кристаллизации можно отнести к дисперсным средам (рис. 1). Двухфазная зада-

ча Стефана может быть записана и без явного выделения фронта фазового перехода с помощью введения эффективной объемной теплоемкости среды. Теплоту фазового перехода можно учесть, если принять, что внутренняя энергия системы «расплав – затвердевший сплав» представляет собой разрывную функцию температуры и ввести сосредоточенную теплоемкость среды системы.

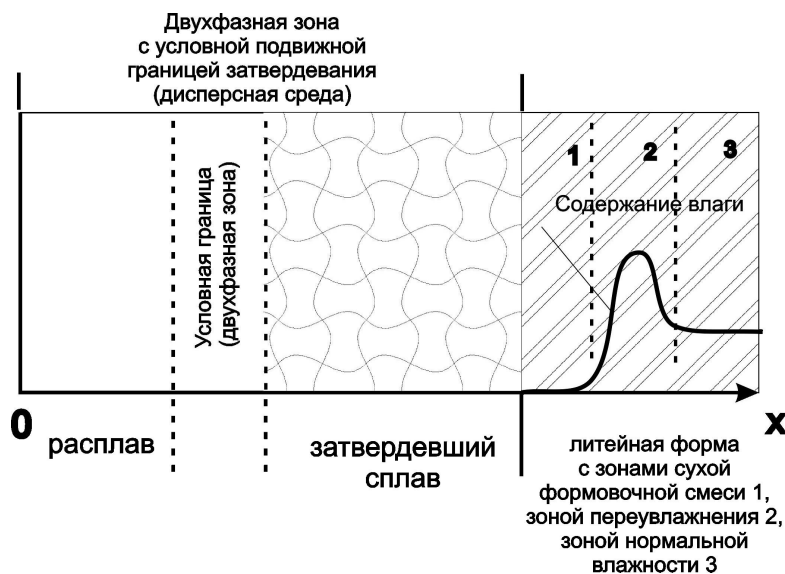


Рис. 1. Схема зон системы расплав – затвердевший сплав – литейная форма

При этом внутренняя энергия единицы объема среды ε как функция температуры при $u = u^* = 0$ скачком меняется на величину теплоты фазового перехода, т.е. [3, 4]

$$\varepsilon = \int_0^u c(u) \rho(u) du + Q\eta(u), \quad (1)$$

$$\eta(u) = \begin{cases} 1, & u > 0, \\ 0, & u < 0, \end{cases}$$

где $\eta(u)$ – функция Хэвисайда, производная которой dn/du есть дельта $\delta(u)$.

Дифференцируя внутреннюю энергию ε по температуре, получим выражение для эффективной объемной теплоемкости среды с учетом теплоты фазового перехода:

$$c_{эф} = c(u) \rho(u) + Q\delta(u). \quad (2)$$

Тепловое состояние системы с учетом фазового перехода при этом описывается уравнением теплопроводности

$$\left(c(\xi, u) \rho(\xi, u) + Q\delta(u - u^*) \right) \frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}(\lambda(\xi, u) \text{grad } u) + s(\xi, t), \quad (3)$$

где $\xi = \xi_1, \xi_2, \xi_3$ – вектор пространственных координат; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность; λ – коэффициент теплопроводности; $u(\xi, t)$ – температура среды; u^* – температура фазового перехода; Q – теплота фазового перехода; s – мощность внутренних источников тепла; $\delta(u - u^*)$ – дельта-функция.

Сложность определения температурных полей в системе отливка – форма определяется наличием, как минимум, трех зон с различными теплофизическими характеристиками, а именно: расплав, затвердевший сплав и материал литейной формы. Также следует учесть, что теплофизические характеристики указанных сред являются функциями температуры. И если систему расплав – затвердевший сплав можно описать в рамках нестационарной задачи Стефана, то процессы, протекающие в материале литейной формы, требуют дополнительного описания.

Рассмотрим вопрос о нахождении теплоемкости формовочной смеси сырой песчано-глинистой формы (ПГФ) как наиболее часто применяемой в условиях литейного производства и наиболее сложной для расчетов, так как необходимо учесть влияние максимального числа факторов [5].

Тепловой баланс i -го элементарного объема формы запишется как

$$Q^i - (Q_{см}^i + Q_{воды}^i + Q_{исп}^i) = 0, \quad (4)$$

где $Q_{см}^i$ – тепло, затраченное на прогрев слоя смеси, Дж/кг_{смеси}; $Q_{воды}^i$ – тепло, затраченное на нагрев воды, содержащейся в 1 кг смеси, Дж/кг_{смеси}; $Q_{исп}^i$ – тепло, затраченное на парообразование влаги в 1 кг смеси, Дж/кг_{смеси}.

Для расчета тепла, затраченного на нагрев формы, требуется найти значение удельной теплоемкости для каждого из слагаемых выражения (4).

Температурное изменение теплоемкости в процессе нагрева сухого слоя смеси в первом приближении можно выразить через удельную теплоемкость основного компонента ПГФ – оксида кремния SiO_2 по следующей формуле [6]:

$$C_{SiO_2} = 925,5 + 184,33T_i^n \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

где C_{SiO_2} – удельная теплоемкость оксида кремния, Дж/кг·К.

Значение теплоемкости, рассчитанное по выражению (5), используется при расчете теплового поля сухих ПГФ.

При расчете температурного поля сырой ПГФ требуется учет теплоты парообразования при выс-

хании слоя смеси под воздействием теплового потока отливки. Этот учет осуществим за счет изменения в сторону увеличения теплоемкости формы на температурном интервале $(T_{исп} - T_0)$ таким образом, чтобы выполнялось условие теплового баланса, отнесенное на 1 кг смеси [6]:

$$\int_{T_0}^{T_{исп}} C_{доб(2)} dT = L \frac{U_0}{100}, \quad (6)$$

где $(T_{исп} - T_0)$ – температурный интервал полного испарения влаги в слое формы, К; $C_{доб(2)}$ – добавочное значение теплоемкости, компенсирующее теплопоглощение при парообразовании и нагреве начальной влажности смеси на температурном отрезке $(T_{исп} - T_0)$, Дж/кг $\cdot$ К; $T_{исп}$ – температура полного испарения влаги в i -м слое смеси, $T_{исп} = 373$ К; U_0 – начальная влажность формы, %; L – теплота парообразования воды, $L = 2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Таким образом, эквивалентная объемная теплоемкость $C_{экв(2)}$ слоя формы с учетом затрат тепла на нагрев и парообразование влаги в i -м слое смеси может быть отобразена следующей зависимостью:

$$C_{экв(2)} = \rho_{сух} C_{SiO_2} + \rho_{формы} C_{доб(2)}, \quad (7)$$

где $C_{экв(2)}$ – эквивалентная теплоемкость, Дж/м 3 К; $\rho_{формы}$, $\rho_{сух}$ – плотность формы и сухого слоя смеси формы при полном испарении влажности, кг/м 3 .

В первом приближении вид функции распределения добавочной теплоемкости $C_{доб(2)}$ по толщине единичного пространственного интервала незначительно влияет на конечный результат расчета [6]. Однако выбранная функция должна учитывать распределение добавочной теплоемкости так, чтобы ее значение в точке полного испарения влажности $T_{исп}$ было равно нулю. Исходя из этого условия, в качестве функции распределения было выбрано следующее выражение [5]:

$$y = 1 - th^a \left(\frac{x}{2} \right), \quad (8)$$

Адаптируя данную функцию к требуемым условиям, было получено выражение добавочной теплоемкости $C_{доб(2)}$ [6, 7].

$$C_{доб2} = K \left(1 - th^{0,672} \exp(2,87 \cdot 10^{-3} U_0^2 + 29,428 \cdot 10^{-2} U_0 - 1,849) \times \left(\frac{T_i^n - T_0}{19,306 - 0,046 U_0 \ln(U_0) - 2,5022 \ln(U_0)} \right) \right) \times \frac{61800}{9,653 - 0,023 U_0 \ln(U_0) - 1,2511 \ln(U_0)}, \quad 2 \leq U_0 \leq 14, \quad (9)$$

где K – поправочный коэффициент ($K = 0,98$).

Учитывая формулы (8), (9), выражение эквивалентной теплоемкости запишется как:

$$C_{экв(2)} = (952,5 + 184,33 \cdot T_i^n \cdot 10^{-3}) \rho_{сух} + K \left(1 - th^{0,672} \exp(2,87 \cdot 10^{-3} U_0^2 + 29,428 \cdot 10^{-2} U_0 - 1,849) \times \left(\frac{T_i^n - T_0}{19,306 - 0,046 U_0 \ln(U_0) - 2,5022 \ln(U_0)} \right) \right) \times \frac{61800 \rho_{формы}}{9,653 - 0,023 U_0 \ln(U_0) - 1,2511 \ln(U_0)}, \quad 2 \leq U_0 \leq 14. \quad (10)$$

Данное выражение учитывает температурное изменение теплоемкости песчано-глинистой смеси, а также тепло, затраченное на нагрев и парообразование влаги в сырой песчано-глинистой литейной форме с влажностью до 14%.

При проведении вычислений целесообразно использовать численные методы и, в частности, метод контрольного объема [4]. В методе контрольного объема расчетная область D делится на параллелепипеды (контрольные объемы), которые характеризуются своим центром. Все теплофизические характеристики материала для каждого КО усредняются по нему. Типичный контрольный объем представлен на рис. 2.

При решении задачи Стефана согласно закону Фурье уравнения теплопроводности (3) можно представить в виде [3]:

$$cp \frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{\partial J_x}{\partial x} - \frac{\partial J_y}{\partial y} - \frac{\partial J_z}{\partial z}, \quad (11)$$

где $J_x = -\lambda \frac{\partial u}{\partial x}$, $J_y = -\lambda \frac{\partial u}{\partial y}$, $J_z = -\lambda \frac{\partial u}{\partial z}$ – плотности теплового потока в направлении осей x , y и z соответственно.

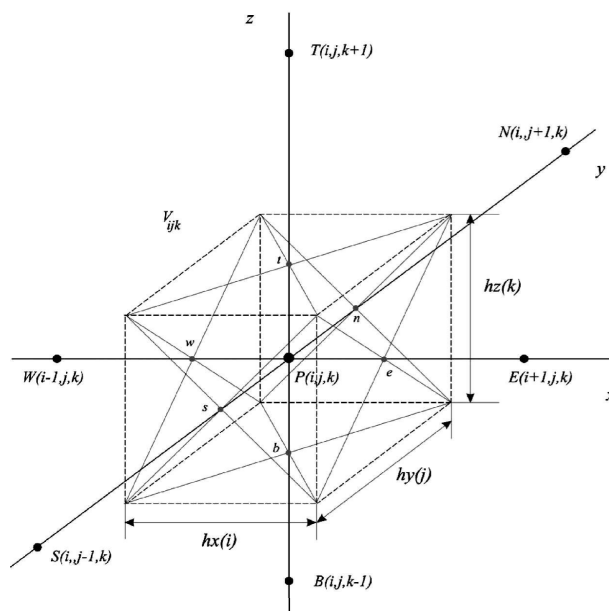


Рис. 2. Расчетная схема метода контрольных объемов

Проинтегрировав уравнение по КО, можно получить:

$$(c\rho)_P \frac{\Delta V}{\Delta t} (u_P - u_P^0) = J_w A_w - J_e A_e + J_s A_s - J_n A_n + J_b A_b - J_t A_t + \bar{s} \Delta V. \quad (12)$$

Верхний индекс «0» обозначает известное значение температуры в начале шага по времени t , J – плотность теплового потока через грань КО, на которую указывает нижний индекс; A – площадь соответствующей грани; $\bar{s}$ – усредненный по объему источниковый член (внутренний источник тепла); V – объем КО, h_x^x , h_y^y , h_z^z – шаги сетки по соответственно по осям x , y , z .

Потоки тепла через грани КО e и w могут быть рассчитаны следующим образом:

$$J_e A_e = D_e (u_P - u_E), J_w A_w = D_w (u_P - u_W), \quad (13)$$

где D_e – проводимость между точками P и E , которая вычисляется по значениям λ в этих точках. Проводимость D_e можно рассчитать по формуле

$$D_e = A_e \frac{2\lambda_E \lambda_P}{\lambda_E h_x(i) + \lambda_P h_x(i+1)}. \quad (14)$$

Подставляя выражения для J и S в (12), можно получить его дискретный аналог:

$$a_P u_P = a_w u_w + a_E u_E + a_N u_N + a_S u_S + a_T u_T + a_B u_B + b, \quad (15)$$

где $a_E = D_e$, $a_W = D_w$, $a_N = D_n$, $a_S = D_s$, $a_T = D_t$,

$$a_B = D_b, b = S_c \Delta V + a_P^0 u_P^0, a_P^0 = \frac{(c\rho)_P \Delta V}{\Delta t},$$

$$a_P = a_W + a_E + a_N + a_S + a_T + a_B + a_P^0 - s_P \Delta V.$$

Для каждого элементарного контрольного объема с внутренней расчетной точкой записывается аналогичный дискретный аналог. С помощью граничных условий в приграничных КО проводятся преобразования, после которых значения u на границе явным образом не будут входить в систему уравнений. В результате получается замкнутая система линейных алгебраических уравнений.

Заключение

Предложенный в публикации подход позволяет получить модель для расчета и прогнозирования температурных полей отливки при ее охлаждении из жидкого расплава, кристаллизации и дальнейшем охлаждении, а также температурных полей литейной формы. Это позволяет прогнозировать характеристики формирующихся при кристаллизации и дальнейшем охлаждении макро- и микроструктур, и как следствие, механические, специальные и служебные свойства отливок.

Список литературы

1. Колокольцев В.М., Гольцов А.С., Синицкий Е.В. Влияние первичной литой структуры жароизносостойких железоуглеродистых сплавов на их коррозионную стойкость // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №2 (34). С. 18-23.
2. Абразивная износостойкость литых металлов и сплавов / Колокольцев В.М., Вдовин К.Н., Мулявко Н.М., Синицкий Е.В. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2004. 228 с.
3. Патанкар С. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 312 с.
4. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с., ил.
5. Савинов А.С., Тубольцева А.С., Варламова Д.В. Расчет теплового поля сырой песчано-глинистой формы // Черные металлы. 2011. С. 36-38.
6. Определение теплоемкости формовочной смеси при расчете теплового поля сырой песчано-глинистой формы / Савинов А.С., Тубольцева А.С., Радомская В.В. и др. // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. науч. тр. Ч. I. Липецк: ЛГТУ, 2010. С. 32-36.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

TEMPERATURE FIELDS OF THE CASTING – CASTING FORM SYSTEM UNDER UNBALANCED SOLIDIFICATION CONDITIONS FOR COMPLEX ALLOYED STEELS

Kolokoltsev Valeriy Michailovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Rector of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: 8(3519)29-84-02. E-mail: kwm@magtu.ru.

Vdovin Konstantin Nikolayevich – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of Foundry and Materials Science department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: 8(3519)29-84-19.

Savinov Alexander Sergeevich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Head of Theoretical Mechanics and Mechanics of Materials department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: 8 (3519) 29-85-18. E-mail: Savinov_nis@mail.ru.

Sinitskiy Yevgeniy Valerievich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: 8 (3519) 29-85-30. E-mail: e-v-s@mail.ru.

Abstract. The paper considered the calculation of temperature fields in the melt – casting – casting form system and the heat objective of the melt – solidified casting – casting mold system is set up and solved as non-stationary Stefan problem.

Keywords: casting, alloy, casting form, temperature, thermal capacity, thermal conductivity.

References

1. Kolokoltsev V.M., Goltsov A.S., Sinitskiy E.V. The influence of the primary cast structure of heat and wear resistant iron-carbon alloys on their corrosion resistance. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 2 (34), pp.18-23.
2. Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Mulyavko N.M., Sinitskiy E.V. *Abrazivnaya*

iznosostoykost lityih metallov i spлавov [Abrasive wear resistance of cast metals and alloys]. Magnitogorsk: MSTU, 2004, 228 p.

3. Patankar S. Numerical solution of thermal conductivity and convective heat transfer problems during channel flow. Moscow: MEI Publishing house, 2003, 312 p.
4. Patankar S. *Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti: per. s angl.* [Numerical solutions of heat exchange and fluid dynamics problems]. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 152 p.
5. Savinov A.S., Tuboltseva A.S., Varlamova D.V. Temperature pattern calculation for the green-sand mold. *Chernyye metally* [Ferrous metals], 2011, pp. 36-38.
6. Savinov A.S., Tuboltseva A.S., Radomskaya V.V. et al. Determination of molding sand mixture thermal capacity at temperature pattern calculation for the green-sand mold. *Sovremennaya metallurgiya nachala novogo tysyacheletiya: sb. nauch. tr.* [Modern metallurgy of the new millennium: Scientific papers. Part I]. Lipetsk: LSTU, 2010, pp. 32-36.