

УДК 621.74

В.Е.Хрычиков, Л.Х.Иванова, С.И.Решетняк, А.Ю.Хитько

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА И ПЛАВЛЕНИЯ МОДИФИКАТОРА В ОСЕВОЙ ЗОНЕ ЧУГУННОГО ПРОКАТНОГО ВАЛКА

Существующая номенклатура сплавов на основе железа для прокатных валков не в полной мере удовлетворяет потребности современной металлургии в материалах, сочетающих высокую износостойкость со способностью выдерживать ударные нагрузки и обладающих хорошими технологическими свойствами.

Проблема и ее связь с научными и практическими результатами

Модифицирование чугунов является эффективным способом повышения механических и эксплуатационных характеристик чугуна прокатных валков. Основной причиной, которая сдерживает широкое применение внутриформенного модифицирования в практике литейного производства, является нестабильность результатов, обусловленная недостаточной изученностью влияния их на процессы кристаллизации, структуру и свойства чугунов.

Анализ достижений и публикаций

С целью совершенствования процесса производства валков авторами [1, 2] впервые были разработаны алгоритмы и программа расчета на ЭВМ процессов затвердевания и охлаждения валков различных типоразмеров. Н.П.Котешов рекомендовал с целью изготовления валков с регламентированными служебными характеристиками, снижения легирующих элементов и сокращения цикла их производства организовать литье прокатных валков с регулируемым теплоотводом в литейной форме в период их затвердевания и последующего охлаждения, а также разработать эффективные способы модифицирования жидкой сердцевины валков в литейных формах.

Целью работы была разработка математической модели технологического процесса внутриформенного графитизирующего модифицирования легкоплавкими модификаторами и затвердевания литого валка в литейной форме.

Основные результаты

Для описания рассматриваемого вопроса было разработано четыре варианта физической модели процесса затвердевания чугунного прокатного валка в литейной форме. На рис. 1 приведена схема разных элементов собранной литейной формы: - рассматривается затвердевание расплава в шейке валка до и после ввода модификатора, а также литейная форма до заполнения расплавом (см. рис. 1, а, б, в); - рассматривается процесс образо-

вания рабочего слоя, в бочке валька, из чугуна базового состава, ввод модификатора и затвердевание осевой зоны отливки (см. рис. 1, г, д, е);

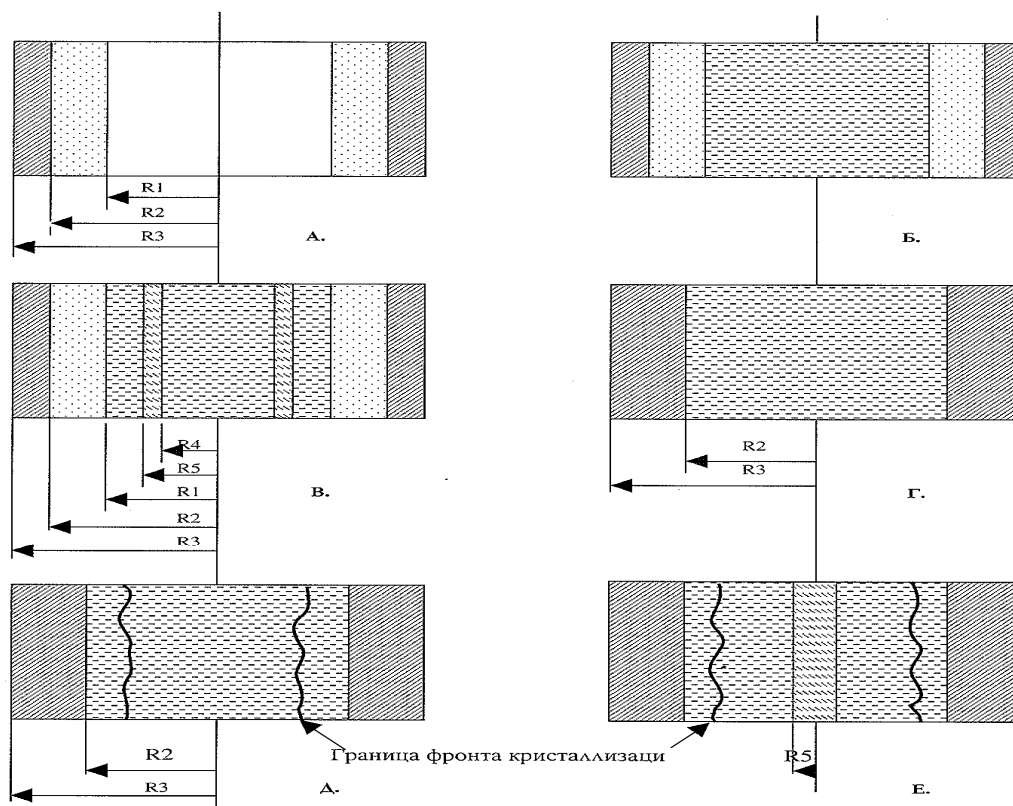


Рисунок 1 - Схема формы для литья валька на на различных этапах моделирования: А - Исходные размеры шейки прокатного валька; Б - Этап заполнения формы в шейках отливки; В - Вариант погружения в расплав плавкого модификатора трубчатого сечения; Г - Этап заполнения формы в зоне бочки отливки; Д - Этап формирования рабочего слоя валька; Е - Момент ввода модификатора на штанге

В первой модели рассматривается затвердевание жидкого чугуна в шейке валька, покрытой песчано-глинистой формовочной смесью. Для этого случая принимаем следующие исходные условия: наружная часть формы (см. рис. 1, а) выполнена из серого чугуна с наружным радиусом R_3 и внутренним – R_2 . Внутренняя часть формы заполнена однородной формовочной смесью с внутренним радиусом R_1 .

Моделирование процесса заполнения литейной формы и прибыли валька (см. рис.1, б) производили при условии нахождения расплава в форме при постоянной температуре t_3 в течение заданного промежутка времени τ и отсутствия затвердевания металла на стенках формы.

Предполагался только прогрев формы при идеальных условиях контакта материала формы с жидким металлом.

Следующим этапом моделирования является погружение в расплав модификатора, отлитого в форме трубки с целью обеспечения максималь-

ной реакционной поверхности взаимодействия плавящегося модификатора и расплава (см. рис. 1, в) с внутренним и наружным радиусами R_4 и R_5 после выдержки необходимой для формирования рабочего слоя вала.

Начальная температура модификатора принимается равной t_x^0 .

Процесс затвердевания происходит в интервале температур ликвидус t_L – солидус t_s . В зависимости от исходных теплофизических параметров модификатор может расплавиться или оставаться в твердом состоянии. Окончанием процесса является полное затвердевание металла.

Во второй модели исходные условия первого этапа моделирования соответствуют этапам первой модели, приведенной выше (см. рис. 1, а, б).

Однако, рассмотрена возможность ввода модификатора после необходимой выдержки залитой формы (см. рис.1, в) до момента образования дендритных «мостиков» внутри шеек вала и прибыли.

В третьей модели рассматривается процесс образования рабочего слоя отливки в металлической части формы, где процесс теплоотвода и кристаллизации идет значительно интенсивнее и, следовательно, время процесса до образования дендритных «мостиков» через ось отливки при прочих равных условиях значительно меньше. Теплофизические константы и параметры расплава и формы принимаем такие же, как и для первых двух случаев, при этом в форме отсутствует слой песчано – глинистой смеси (см. рис. 1, д) и $R_1 = R_2$.

В четвертой модели рассматривается момент ввода модификатора в расплав со снятой теплотой перегрева и образовавшейся коркой заданной толщины на стенках кокиля, плавление модификатора и окончательное затвердевание всей отливки (см. рис. 1, е). При уменьшении радиуса R_4 до нуля моделируется процесс модифицирования легкоплавким модификатором, отлитым в форме цилиндра не имеющего внутреннего отверстия.

Для описания процесса теплообмена в рассмотренной выше системе (с учетом фазовых превращений) использовали подход, основанный на изучении метода энтальпии [3]. Были сформулированы уравнения теплопроводности, начальные и граничные условия для различных элементов формы.

Для решения поставленной задачи использовали метод конечных разностей. Построение разностных уравнений выполняли с помощью метода интегральных тепловых балансов [4].

Каждый элемент расчетной области разбивается на элементарные объемы (рис. 2). Шаг разбиения постоянный внутри каждого элемента, но разный для расплавов, модификатора, смеси и формы. Внутри каждого элементарного объема вводится узел, к которому относятся все его теплофизические параметры. Число узлов N выбирается отдельно для каждого элемента.

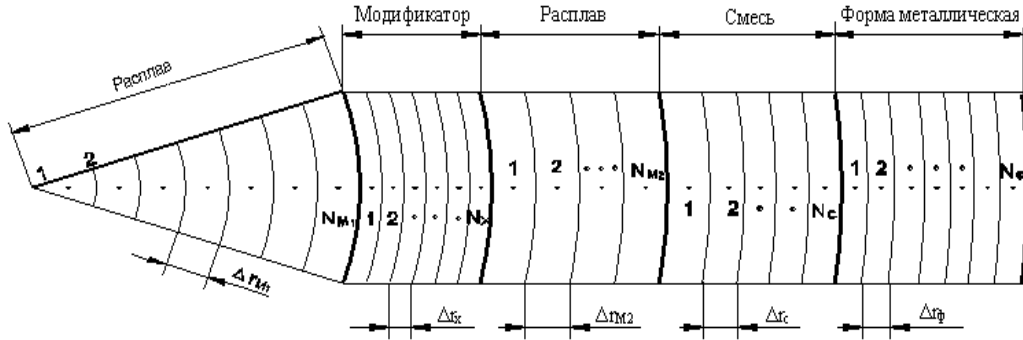


Рисунок 2 - Порядок и шаг разбиения элементов расчетной области на элементарные объемы

Из-за нелинейности, вносимой уравнением энтальпии, использовали явную схему расчета, что позволяет избежать итерационных процедур. В этом случае при расчете граничных узлов удобно использовать форму записи краевых условий, включающую тепловые потоки в явном виде. Тогда уравнения, описывающие теплообмен в различных элементах, становятся идентичными и их конечно-разностное представление примет следующий вид:

1) уравнение теплопроводности для смеси и формы

$$\frac{\tilde{t}_j^{n+1} - \tilde{t}_j^n}{\Delta \tau} = a \left(\frac{\tilde{t}_{j-1}^n - 2\tilde{t}_j^n + \tilde{t}_{j+1}^n}{\Delta r^2} + \frac{1}{r_K} \frac{\tilde{t}_{j+1}^n - \tilde{t}_{j-1}^n}{2 - \Delta r} \right) \quad (1)$$

где \tilde{t}_j – температура в j -ом узле; n – номер шага по времени; $\Delta \tau$ – шаг по времени; Δr – шаг по координате; r – радиус; $j = 2, 3, \dots, n-1$;

2) уравнение теплопроводности (энтальпии) для расплава и модификатора

$$\rho \frac{\tilde{i}_K^{n+1} - \tilde{i}_K^n}{\Delta \tau} = \lambda \left(\frac{\tilde{t}_{K-1}^n - 2\tilde{t}_K^n + \tilde{t}_{K+1}^n}{\Delta r^2} + \frac{1}{r_K} \frac{\tilde{t}_{K+1}^n - \tilde{t}_{K-1}^n}{2\Delta \Delta} \right) \quad (2)$$

где \tilde{i}_K – энтальпия в k -ом узле, $k = 2, 3, \dots, N-1$.

Для аппроксимации граничных условий используем фиктивные температуры в узлах, находящихся за пределами рассматриваемой области:

– на внутренней границе произвольного элемента

$$-\lambda \frac{\tilde{t}_1^n - \tilde{t}_{Z1}^n}{\Delta r} = q_1^n, \quad (3)$$

где \tilde{t}_{Z1}^n – температура в фиктивном узле, расположенном за внутренней границей элемента; q_1^n – плотность теплового потока на внутренней границе; q_2^n – на внешней границе элемента

$$-\lambda \frac{\tilde{t}_{Z2}^n - \tilde{t}_1^n}{\Delta r} = q_2^n \quad (4)$$

где \tilde{t}_{Z2}^n – температура в фиктивном узле, расположенном за внешней границей элемента; q_1^n – плотность теплового потока на внешней границе.

Заменяя в уравнениях (1) и (2) температуры в узлах, выходящих за границы при $k, j = 1, N$, на соответствующие им значения фиктивных температур, определяемых из уравнений (4) и (5), после несложных преобразований получим следующие расчетные формулы

$$\tilde{t}_1^{n+1} = \tilde{t}_1^n + F_0 \left[(1 + \xi_1)(\tilde{t}_2^n - \tilde{t}_1^n) + (1 - \xi_1) \frac{\Delta r}{\lambda} q_1^n \right]; \quad (6)$$

$$\tilde{t}_j^{n+1} = \tilde{t}_j^n + F_0 [\tilde{t}_{j-1}^n - 2\tilde{t}_j^n + \tilde{t}_{j+1}^n \xi_1 (\tilde{t}_{j+1}^n - \tilde{t}_{j-1}^n)]; \quad (7)$$

$j = 2, 3 \dots, N - 1;$

$$\tilde{t}_N^{n+1} = \tilde{t}_N^n + F_0 \left[(\xi_N + 1)(\tilde{t}_N^n - \tilde{t}_{N-1}^n) + (\xi_N + 1) \frac{\Delta r}{\lambda} q_2^n \right]; \quad (8)$$

$$\tilde{i}_1^{n+1} = \tilde{i}_1^n + \frac{\Delta \tau \lambda}{\rho \Delta r^2} \left[(1 + \xi_1)(\tilde{t}_2^n - \tilde{t}_1^n) + (1 - \xi_1) \frac{\Delta r}{\lambda} q_1^n \right]; \quad (9)$$

$$\tilde{i}_k^{n+1} = \tilde{i}_k^n + \frac{\Delta \tau \lambda}{\rho \Delta r^2} [\tilde{t}_{k-1}^n - 2\tilde{t}_k^n + \tilde{t}_{k+1}^n + \xi_k (\tilde{t}_{k+1}^n + \tilde{t}_{k-1}^n)]; \quad (10)$$

$k = 2, 3 \dots, N - 1;$

$$\tilde{i}_N^{n+1} = \tilde{i}_N^n + \frac{\Delta \tau \lambda}{\rho \Delta r^2} \left[(\xi_N - 1)(\tilde{t}_N^n - \tilde{t}_{N-1}^n) + (\xi_N + 1) \frac{\Delta r}{\lambda} q_2^n \right], \quad (11)$$

где $F_a = \frac{\alpha \Delta \tau}{\Delta r^2}; \quad (12)$

$$\xi_j = \frac{\Delta r}{2r_j}; \quad (13)$$

$$r_j = R_{BH} + \Delta r \left(j - \frac{1}{2} \right), j = 1, 2, \dots, N; \quad (14)$$

$$\Delta r = \frac{R_H - R_{BH}}{N}, \quad (15)$$

R_H и R_{BH} – соответственно наружный и внутренний радиусы элемента.

Плотности тепловых потоков, входящие в расчетные формулы для граничных узлов, определяются в зависимости от вида элемента и условий теплообмена. Для единообразия записи будем использовать следующий принцип обозначений: любой параметр элемента приводится с соответствующим индексом этого элемента и при необходимости заключается в фигурные скобки, к которым приписывается номер узла и номер шага по времени. Тогда граничные и начальные условия для каждого из элементов в конечно-разностном представлении примут вид.

Форма

а) граничные условия

$$\{q_{\phi}\}_1^n = \frac{\{\tilde{t}_c\}_{N_c}^n - \{\tilde{t}_{\phi}\}_1^n}{R_{c\phi}}, \quad (16)$$

где
$$R_{c\phi} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta r_{\phi}}{\lambda_{\phi}} + \frac{\Delta r_c}{\lambda_c} \right); \quad (17)$$

$$\{q_{\phi}\}_2^n = 0, \quad n = 1, 2, \dots; \quad (18)$$

б) начальные условия

$$\{\tilde{t}_{\phi}\}_j^n = t_{c\phi}^0, \quad j = 1, 2, \dots, N_{\phi}; \quad n = 0; \quad (19)$$

Смесь

а) граничные условия

$$\{q_c\}_1^n = \begin{cases} \frac{t_3 - \{\tilde{t}_c\}_1^n}{R_c}, & \tau \leq \tau_1, \\ \frac{\{\tilde{t}_{M2}\}_{NM2}^n - \{\tilde{t}_c\}_1^n}{R_{cM}}, & \tau > \tau_1; \end{cases} \quad (20)$$

$$R_c = \frac{\Delta r_c}{\lambda_c}; \quad (21)$$

$$R_{cM} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta r_c}{\lambda_c} + \frac{\Delta r_{M2}}{\lambda_M} \right); \quad (22)$$

$$\{q_c\}_2^n = -\{q_{\phi}\}_1^n, \quad (23)$$

б) начальные условия

$$\{\tilde{t}_c\}_j^n = t_{c\phi}^0, \quad j = 1, 2, \dots, N_c; \quad n = 0; \quad (24)$$

Расплав в зазоре между модификатором и смесью

а) граничные условия

$$\{q_{M2}\}_1^n = \frac{\{\tilde{t}_x\} - \{\tilde{t}_{M2}\}_1^n}{R_{xM}}, \quad \tau > \tau_1; \quad (25)$$

$$R_{xM} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta r_x}{\lambda_M} + \frac{\Delta r_{M2}}{\lambda_M} \right); \quad (26)$$

$$\{q_{M2}\}_2^n = -\{q_C\}_1^n, \quad \tau > \tau_1; \quad (27)$$

б) начальные условия

$$\{\tilde{t}_{M2}\}_k^n = t_3, \quad k = 1, 2, \dots, N_{M2}; \quad \tau > \tau_1; \quad (28)$$

Модификатор

а) граничные условия

$$\{q_x\}_1^n = \frac{\{\tilde{t}_{M1}\}_{NM1}^n - \{\tilde{t}_x\}_1^n}{R_{Mx}}, \quad \tau > \tau_1; \quad (29)$$

$$R_{Mx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta r_{MI}}{\lambda_M} + \frac{\Delta r_x}{\lambda_M} \right); \quad (30)$$

$$\{q_x\}_2^n = -\{q_{M2}\}_1^n, \tau > \tau_1; \quad (31)$$

б) начальные условия

$$\{\tilde{t}_x\}_K^n = t_x^0, k = 1, 2, \dots, N_{MI}; \tau = \tau_1; \quad (32)$$

Внутренний слой расплава

а) граничные условия

$$\{q_{MI}\} = 0, \tau > \tau_1; \quad (33)$$

$$\{q_{M2}\}_{NM2}^n = -\{q_x\}_1^n, \tau > \tau_1; \quad (34)$$

б) начальные условия

$$\{\tilde{t}_{MI}\}_K^n = t_3, k = 1, 2, \dots, N_{MI}; \tau = \tau_1. \quad (35)$$

Текущее время τ на произвольном шаге расчета n определяется как

$$\tau = n\Delta t = 0, 1, 2, \dots \quad (36)$$

С помощью полученных выше расчетных формул можно моделировать процесс теплообмена и при некоторых изменениях в постановке исходной задачи. Практический интерес представляет случай, когда внутренний слой расплава отсутствует. В математической постановке для остальных элементов системы произойдет только одно изменение – на внутренней границе модификатора тепловой поток должен быть задан равным нулю

$$\left\{ \frac{\partial t_x}{\partial r} = 0 \right\}, r = R_4, \quad (37)$$

а расчетная формула (5.49) для его определения заменится на следующую

$$\{q_x\}_1^n = 0, \tau > \tau_1. \quad (38)$$

Разработаны блок – схема и алгоритм расчета, реализованные в виде программы, написанной на языке Quick Basic Version 8.5. Программа состоит из головного управляющего модуля и семи подпрограмм.

С помощью разработанной модели, моделировали процесс модифицирования затвердевающего валка в литейной форме, определяли момент ввода модификатора, сразу после формирования рабочего слоя отливки, время необходимое для модифицирования и момент вывода штанги для модифицирования. На рис. 3 приведены графические результаты расчетов с помощью разработанной модели, показана величина затвердевшего рабочего слоя отливки, до ввода модификатора.

Как показали расчеты, внутренней энергии расплава достаточно для расплавления и распределения модификатора по всему объему модифицируемой части отливки, что соответственно подтверждено проведенными экспериментами.

Выводы

1. Разработана физическая модель четырех вариантов процесса затвердевания модифицированного прокатного валка в линейной форме. Модель описывает состояние элементов указанной системы после заполнения линейной формы и после модифицирования, а также состояние системы и проходящие в ней тепловые процессы.

Процесс теплообмена в системе описывали с применением метода энтальпии, учитывая фазовые превращения. Представлены уравнения теплопроводности, граничные и начальные условия для формы смеси, модификатора расплава в зазоре между модификатором и формовой смесью внутреннего слоя расплава.

Поставленную задачу следует решать с использованием метода конечных разностей.

2. Получены расчетные формулы, позволяющие моделировать процесс теплообмена, изменяя значения некоторых основных исходных данных. С помощью разработанной модели возможно моделирование процесса затвердевания расплава с различными вариантами конфигурации и размеров модификатора, диаметра валка, теплофизических свойств металла и формы.



Рисунок 3 - Изменение температуры по радиусу валковой формы после модифицирования

Ось валковой формы - № 0; Модификатор - № 1-5; Расплав чугуна - № 5-26; Металлический кокиль - № 26-39

3. Составлен алгоритм расчета процесса затвердевания отливки, который реализован в виде программы, написанной на языке QuickBasic Version 8.5.

Для адаптации модели можно использовать данные экспериментальных исследований процесса нагрева формы и кристаллизации металла в валковой форме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коте шов Н.П. Исследование процес сов теплообмена, формирования структуры и свойств при отливке чугуновых прокатных валков: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.04.– Д, 1979.– 489 с.
2. Хрычиков В.Е. Теплофизические процессы направленного затвердевания чугуновых прокатных валков: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.04.– Д, 1992.– 455 с.
3. Авдонин Н.А. Математическое описание процессов кристаллизации /Авдонин Н.А. - Рига: Знание, 1980. – 177 с.
4. Калиткин Н.Н. Численные методы / Под редакцией А.А.Самарского. – М.: Наука, 1978. – 612 с.