

Однако температурный интервал разложения веществ при скорости нагрева 10 °С/мин (соответствует скорости нагрева руды в шахтных печах) повышается на 100 – 150 °С по сравнению с порошками.

Характерно, что несмотря на более раннее, как и в порошках, начало реакции в нейтральной среде, процесс заканчивается при более высокой температуре. Причина заключается в дополнительном подводе теплоты за счет окисления монооксида железа диоксидом углерода и кислородом.

Во время декарбонизации доступ кислорода и диоксида углерода из атмосферы печи во внутренние области куска затруднен из-за газодинамического подпора выделяющихся продуктов реакции. Следовательно, в обоих случаях реакцию необходимо рассматривать как протекающую в одинаковой атмосфере, близкой по составу к диоксиду углерода с небольшими примесями оксида углерода, образующегося по реакции



Этот вывод подтверждается идентичными кинетическими закономерностями декарбонизации в атмосферах воздуха, He и CO_2 . Как и для порошков, закономерности во всех случаях описываются кристаллохимическими уравнениями Авраама (функция A_3 в работе [6]), о чем свидетельствует линеаризация термогравиметрических кривых в координатах $\lg A_3 - T^{-1}$. Количественный расчет кинетических параметров – энергии активации и предэкспоненциального множителя (A) по дериватограммам в случае кусковых образцов значительно затруднен по двум причинам. Во-первых, большая (6 – 8 г) навеска вызывает сильную асимметрию теплового поля внутри куска вследствие поглощения теплоты при эндотермической реакции и тепловой инерции материала. Это приводит к нелинейной зависимости температуры от времени в области протекания диссоциации. Во-вторых, в отличие от порошка при исследовании кускового материала невозможно проконтролировать величину поверхности, на которой протекает реакция в рассматриваемый момент времени.

В процессе разложения поликристаллических кусков величина реакционной поверхности зависит от глубины частично диссоциированной зоны и меняется в зависимости от изменения микроструктуры куска. Поэтому используемое для описания термогравиметрических кривых уравнение типа (3) при $g(\alpha) = A_3 = [-\ln(1 - \alpha)]^{1/3}$ имеет сугубо формальный характер, а параметры A и E нельзя использовать для расчета степени диссоциации кусков другого размера.

Количественно описать кинетику диссоциации кусковых материалов с использованием данных по порошкам можно только при раскрытии физической сущности макроструктурных изменений в ходе декарбонизации.

Выводы. Изучен механизм процесса диссоциации сидеритовой руды и определены кинетические параметры разложения при неизотермическом нагреве с использованием комплексного метода. Получены кинетические уравнения диссоциации порошков из бакальской сидеритовой руды в разных газовых атмосферах. Рассмотрены закономерности декарбонизации кусковой сидеритовой руды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пирометаллургическая переработка комплексных руд / Л.И. Леонтьев, Н.А. Ватолин, С.В. Шаврин, Н.С. Шумаков. – М.: Металлургия, 1997. – 432 с.
2. Юрьев Б.П., Меламуд С.Г., Шацилло В.В. // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». 2007. Вып. 7. С. 7 – 13.
3. Юрьев Б.П., Костоусова Т.И. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1999. № 3. С. 17 – 23.
4. Юрьев Б.П. // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». 2007. Вып. 6. С. 25 – 29.
5. Юрьев Б.П., Меламуд С.Г., Шацилло В.В. // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». 2006. Вып. 9. С. 16 – 33.
6. Уэндлант У. Термические методы анализа. – М.: Мир, 1978. – 526 с.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1970. – 832 с.

© 2012 г. Б.П. Юрьев, С.Г. Меламуд, Н.А. Спирин
Поступила 13 декабря 2011 г.

УДК 669.14.018.8

Г.В. Оглоблин¹, В.В. Стулов²

¹ Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет (г. Комсомольск-на-Амуре)

² Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН (г. Комсомольск-на-Амуре)

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА РАСПЛАВА СО СТЕНКОЙ КРИСТАЛЛИЗАТОРА

В существующих установках непрерывной разливки стали жидкий металл подается в кристаллизатор через погружной разливочный стакан. В работах [1, 2] приведены результаты моделирования на воде гидродина-

мики жидкой стали, истекающей из выходных каналов погружных разливочных стаканов, установлены картины течения жидкости в плоскостях кристаллизатора и скорости потоков. Недостатком этих работ является

отсутствие методики визуализации на стенках тепловых полей, образующихся при заполнении жидкостью кристаллизатора, не рассмотрено влияние конструкции погружного стакана и его расположения в кристаллизаторе на теплообмен со стенкой.

Цель настоящей работы – отработка методики моделирования теплообмена расплава со стенками кристаллизатора посредством визуализации тепловых полей, определение скорости истечения расплава и времени заполнения кристаллизатора.

На рис. 1 показан внешний вид установки, на которой моделируется процесс заполнения кристаллизатора [3]. Основные элементы установки (погружной стакан и кристаллизатор) выполнены в масштабе 1:7 к размерам натурального образца. Варианты расположения погружных стаканов в модели кристаллизатора приведены на рис. 2. Глубина H_M погружения стакана составляет 80 – 100 мм. Стенки кристаллизатора с внутренней стороны покрывали черной краской, с внешней – жидкими кристаллами холестерического типа с мезофазой 27 – 32 °С. Такая обработка имеет недостаток: слой жидкого кристалла открыт и подвергается воздействию кислорода, ультрафиолетового излучения, а также различных компонентов среды, которые приводят к погрешности визуализации тепловых полей. Наиболее оптимальный вариант – использование жидкокристаллического детектора в виде стеклянной

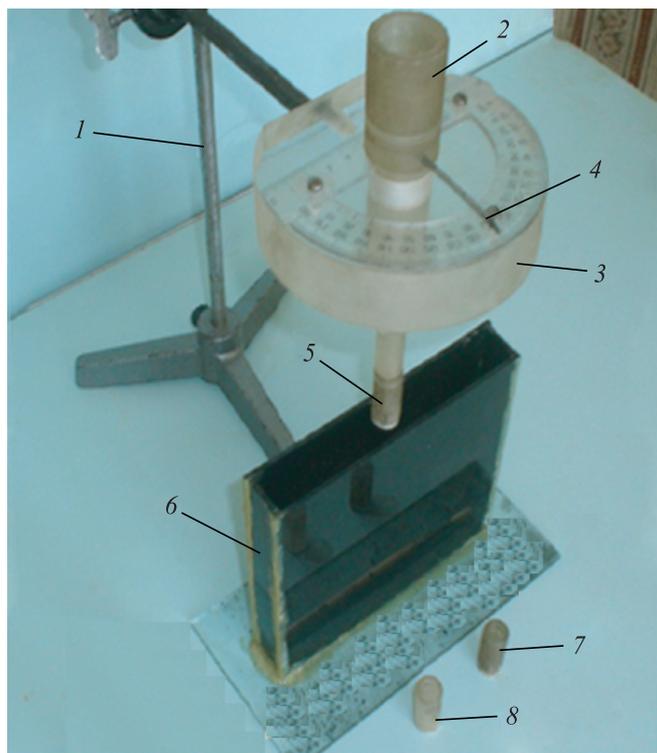


Рис. 1. Установка для моделирования работы погружных стаканов: 1 – физический штатив; 2 – погружной разливочный стакан; 3 – угловое отсчетное устройство; 4 – визор; 5 – насадка с двумя каналами; 6 – модель кристаллизатора; 7 и 8 – четырех- и двухканальная насадки

капсулы (калиброванной полости 10 мкм) по формату широкой стенки модели кристаллизатора; это позволяет в зависимости от чистоты исполнения и заполнения жидкими кристаллами увеличить до года срок службы детектора. В качестве рабочего вещества выбрана вода, которая позволяет вести процесс моделирования в широких пределах чисел подобия. При этом отслеживается гидродинамика струи для ламинарных потоков по числу Рейнольдса.

В настоящей работе приняты следующие обозначения: A и B – длина широкой и узкой стенки кристаллизатора; H – высота кристаллизатора; $Re = \omega d_3 / \nu$, $Nu = \alpha x / \lambda$, $Pr = \mu c / \lambda$ и $Fo = a \tau / x^2$ – числа подобия Рейнольдса, Нуссельта, Прандтля и Фурье; w – скорость потока, м/с; d_3 – характерный размер, м; α и λ – коэффициент теплоотдачи и теплопроводность, Вт/(м²·К) и Вт/(м·К); x – размер, м; μ и ν – динамическая и кинематическая вязкость, Па·с и м²/с; c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К); a – коэффициент температуропроводности, м²/с; τ – характерное время, с; t – температура, °С; ρ – плотность, кг/м³.

Индексы 1 и 2 обозначают принадлежность к жидкой и твердой фазам; «н», «м» и «с» – к оригиналу (натуре), модели и стенке.

Параметры воды определены из работы [4]:

при $t = 60$ °С: $\rho = 983,1$ кг/м³; $c = 4179$ Дж/(кг·К); $\lambda = 0,659$ Вт/(м·К); $\mu = 470 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $\nu = 0,48 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $Pr = 2,98$; $a = 0,161 \cdot 10^{-6}$ м²/с;

при $t = 50$ °С: $\rho = 988$ кг/м³; $c = 4174$ Дж/(кг·К); $\lambda = 0,648$ Вт/(м·К); $\mu = 550 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $\nu = 0,557 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $Pr = 3,54$; $Pr_c = 5,1$ при $t_c = 33$ °С.

Теплофизические параметры стали 08X18H10T определены из работы [5]: $\rho = 8 \cdot 10^3$ кг/м³; $\lambda = 28$ Вт/(м·К); $t_n = 1446$ °С; $c = 756$ Дж/(кг·К); $a = 4,63 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

В работе рассмотрена модель, размеры выходного отверстия которой $(1 \times 7) \cdot 10^{-3}$ м. Характерный размер d_3 выходного отверстия стакана $2,05 \cdot 10^{-3}$ м. Скорость w истечения воды из отверстия стакана составляла 0,178 м/с. Размеры модели кристаллизатора $A_M \times B_M \times H_M = 0,221 \times 0,229 \times 0,171$ м.

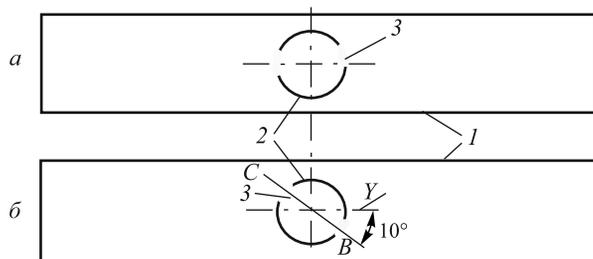


Рис. 2. Варианты расположения погружных стаканов в модели кристаллизатора:

a – оси выходных отверстий погружного стакана параллельны широким стенкам кристаллизатора; b – оси выходных отверстий погружного стакана расположены под углом 10° к широким стенкам кристаллизатора; 1 – широкие стенки кристаллизатора; 2 – модель погружного стакана; 3 – выходные отверстия модели стакана

Размеры натурального кристаллизатора: $A_n \times B_n \times H_n = 1,550 \times 0,200 \times 1,2$ м. Диаметр d_n погружного стакана составляет 0,145 м.

Результаты моделирования

На рис. 3 приведены картины температурных полей в модели кристаллизатора при заливке в него воды через модель погружного разливочного стакана (варианты 1 и 2). Граница раздела в кристаллизаторе жидкость – воздух представлена семейством изотерм красного, зеленого и синего цветов. Расположение осей выходных отверстий стакана под углом к широким стенкам кристаллизатора может приводить к неравномерности распределения скорости и температур жидкости в пристеночных слоях кристаллизатора (рис. 3). При уменьшении ($\gamma < 2^\circ$) угла установки оси выходных отверстий модели стакана с широкой стенкой кристаллизатора ухудшается перемешивание жидкости в горизонтальной плоскости модели. При увеличении угла ($\gamma > 10^\circ$) возможно размывание (на практике) корочки стальной заготовки, что увеличивает степень ее разнотолщинности по периметру кристаллизатора. При этом

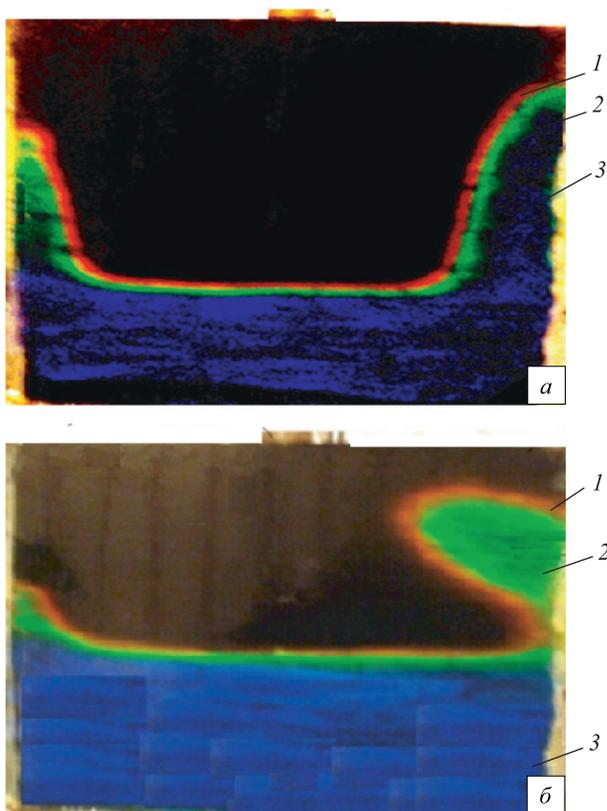


Рис. 3. Картины температурных полей в модели кристаллизатора при заливке жидкости по вариантам 1 и 2 (а и б): 1 – изотерма 27 °С; 2 – изотерма 30 °С; 3 – изотерма 33 °С

температурное поле развивается одновременно на двух широких стенках модели кристаллизатора.

При ламинарном течении жидкости относительно стенки теплообмен описывается критериальным выражением [4]

$$\overline{Nu} = 0,664 Re^{0,5} Pr^{0,33} \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,225}$$

После подстановки в приведенное выражение исходных данных получаем на модели $Re_m = 983$, $\overline{Nu}_m = 26,03$ и $\alpha = 171,5$ Вт/(м²·К). Из условия $Nu_m = Nu_n$ получаем при разливке стали $\alpha_n = 1041$ Вт/(м²·К). Из выражения $\alpha_n = 41\,519 \cdot \omega_n^{0,8}$ [6] скорость расплава ω в натуральных условиях составляет 0,01 м/с.

Время τ_n процесса в натуральных условиях разливки стали определим из условия равенства чисел Фурье: $Fo_m = Fo_n$.

При $\tau_m = 300$ с получаем на модели $Fo_m = 4,83 \cdot 10^{-3}$. Таким образом, после подстановки исходных данных получаем при разливке стали $\tau_n = 511$ с.

Выводы. Предложена установка для моделирования тепловых процессов в кристаллизаторе, получены фотоматериалы динамики развития теплового процесса кристаллизатора в виде изотерм. Определен тип термоиндикатора, на его основе изготовлен жидкокристаллический детектор многоцветного применения. Отработана методика моделирования теплообмена в кристаллизаторе с применением термотропных жидких кристаллов. Установлены значения скорости расплава и время заполнения, обеспечивающие в кристаллизаторе подобие процессов теплообмена на модели и в натуральных условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моделирование современных процессов внепечной обработки и непрерывной разливки стали / О.Б. Исаев, Е.А. Чичкарёв, В.В. Кислица и др. – М.: Metallurgizdat, 2008. – 375 с.
2. Стулов В.В., Горнаков А.И. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 2. С. 12 – 15.
3. Стулов В.В., Одинокоев В.И., Оглоблин Г.В. Физическое моделирование процессов при получении литой деформированной заготовки. – Владивосток: Дальнаука, 2009. – 175 с.
4. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Е.В. Аметистов, В.А. Григорьев, Б.Т. Емцев и др. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
5. Зиновьев В.Б. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справ. изд. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
6. Михневич Ю.Ф. Непрерывная разливка стали. – М.: Металлургия, 1990. – 296 с.

© 2012 г. Г.В. Оглоблин, В.В. Стулов
Поступила 18 января 2012 г.