АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ДВУХВАЛКОВОЙ ЗАКАЛКЕ РАСПЛАВА

М. Н. Верещагин, С. П. Пожарков

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

Двухвалковая быстрая закалка интегрирует процессы разливки расплава и прокатку намороженного металла. Непрерывный процесс формообразования металла обеспечивает резкое сокращение энергетических и экономических затрат за счет исключения ряда энерго- и трудоемких операций по переделу слитков. Кроме того, данный процесс позволяет реализовать в изделиях в виде ленты принципиально новые, более высокие эксплуатационные характеристики [1].

Для отработки и совершенствования метода двухвалковой быстрой закалки расплава необходимо проанализировать процесс затвердевания металла. При этом режимы теплопередачи имеют существенное значение в процессе структурообразования, определяющего свойства ленты. Кроме того, на явление теплопередачи между расплавом и валком накладываются фазовые процессы, протекающие в расплаве при перемещении твердожидкой поверхности раздела, и сильная конвекция жидкого металла в клинообразной ванне. Всё это создает неравномерное температурное поле расплава в створе валков, что в конечном итоге оказывает существенное влияние на процесс кристаллизации и непосредственно на конечную структуру ленты.

Для лучшего понимания практических проблем метода 2-х валковой закалки расплава, с точки зрения промышленного его использования, необходим простой и вместе с тем, эффективный инженерный метод моделирования данного процесса.

Процесс затвердевания расплава, в значительной степени, определяется условиями его теплообмена с валковым кристаллизатором, причем тепловые процессы в установившемся режиме работы установки принимаются квазистационарными [2]. С учетом этого объем затвердевающего расплава, находящегося в межвалковом пространстве, можно условно разбить на три зоны (рис.1). В зоне *I* расплав находится в перегретом состоянии, в зоне *II* (зона затвердевания) расплав представляет собой переохлажденную жидкость повышенной вязкости. Начало зоны *II* соответствует окончанию процесса отдачи тепла перегрева и моменту образования корки затвердевшего металла в валках, а в конце зоны *II* происходит встреча фронтов кристаллизации затвердевшего металла, намороженного на левый и правый валки. В зоне *III* металл, находящийся в твердой фазе, подвергается деформации под действием усилий, прикладываемых к валкам-кристаллизаторам.

В межвалковом пространстве при заливке находится определенное количество расплава с изменяющимся по высоте содержанием твердой фазы. Уровень ванны, имеющей клиновидную форму, определяется в основном литейными свойствами сплава, силами поверхностного натяжения, расходом жидкого металла и геометрическими размерами кристаллизаторов [3].

Будем считать, что скорость подачи расплава и скорость вращения валков-кристаллизаторов в процессе прокатки постоянны и таковы, что верхний уровень расплава занимает некоторое установившееся положение, соответствующее координате y_0 (рис. 1). Как будет видно из дальнейшего изложения, координата y_0 существенно влияет на расположение границ всех областей y_1 и y_2 и, тем самым, определяет режим процесса затвердевания металла в валках-кристаллизаторах.

Выделим элементарный слой расплава в области отвода тепла перегрева и будем считать, что отводимое тепло аккумулируется только стенкой валка.

Тогда уравнение теплового баланса для металла в первой области межвалкового пространства имеет следующий вид ($dQ_1 = dQ_2$)

$$C_\rho \cdot \rho \cdot h \cdot \frac{\sqrt{R^2 - y^2}}{R} \cdot dT = 2 \cdot \alpha \cdot (T - T_0) \cdot dt, \tag{1}$$

где C_ρ – удельная теплоемкость; ρ – удельная плотность расплава; R – радиус валка; α – коэффициент теплопередачи между расплавом и валком; T, T_0,– температура расплава (текущая) и валкакристаллизатора соответственно; h – ширина элементарного слоя расплава; dQ_1, dQ_2 – количество тепла, передаваемого слоем расплава и валками от расплава соответственно.

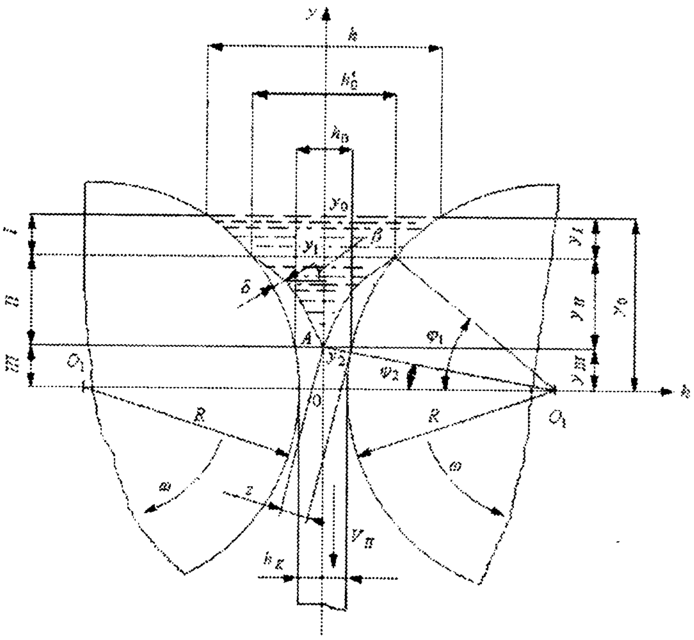

Рис. 1. Схема процесса двухвалковой быстрой закалки расплава

Интегрирование уравнения (1) с учетом того, что верхнее зеркало расплава (y=y_0) в межвалковом пространстве находится при температуре заливки T_1, позволяет найти координату y_1 в зависимости от температуры, теплофизических характеристик расплава и геометрических размеров валков-кристаллизаторов:

$$y_1 = R \cdot \sin\left[\frac{C_\rho \cdot \rho \cdot q}{2 \cdot \alpha \cdot \delta \cdot R} \cdot \ln\frac{T_{KP} - T_0}{T_1 - T_0} + \arcsin\frac{y_0}{R}\right]. \tag{2}$$

Конец зоны *I* отвода тепла перегрева соответствует температуре кристаллизации $T_{кр}$ расплава.

Основной задачей является нахождение координаты y_2, определяющей конец процесса кристаллизации и начало зоны деформации.

Если валки вращаются с угловой скоростью ω, а процесс кристаллизации длится время t_{KP}, то, как видно из рис.1;

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \omega \cdot t_{KP}, \tag{3}$$

где φ_1, φ_2 – углы, соответствующие началу и концу кристаллизации. Углы φ_1, φ_2 связаны с размерами валков R, и геометрическими параметрами клиновидной зоны y_1 и y_2 следующими соотношениями:

$$y_1 = R \cdot \sin\varphi_1; y_2 = (R+z) \cdot \sin\varphi_2,$$

где z – толщина корки металла, намороженной на каждый из валков к моменту встречи фронтов кристаллизации. Отсюда время t_{KP} кристаллизации из уравнения (3) равно

$$t_{KP} = \frac{1}{\omega} \cdot \left(\arcsin\frac{y_1}{R} - \arcsin\frac{y_2}{R+z} \right) \tag{4}$$

С другой стороны, закон продвижения фронта кристаллизации найдём из следующего соображения: на стадии затвердевания температура расплава постоянна и равна $T_{\text{кр}}$.

Рассмотрим процесс увеличения слоя корки от времени в системе отсчета, жестко связанной с плоскостью холодильника. Уравнение теплового баланса для объема dV корки, опирающегося на эту поверхность может быть представлено в виде:

$$dQ = dQ_{AKK} + dQ_{KP}, \tag{5}$$

где dQ – количество теплоты, отдаваемое объемом dV затвердевшей корки холодильнику за время dt; dQ_{AKK} – количество теплоты, выделяющееся внутри объема dV затвердевшей корки; dQ_{KP} – количество теплоты кристаллизации.

Зависимость $T = T(y)$ постулируем в виде параболы n-ого порядка [4].

$$T = -(T_{KP} - T_n) \cdot \left(\frac{y}{\xi} \right)^n + T_{KP}, \tag{6}$$

где T_{KP}, T_n – температура кристаллизации и корки у поверхности холодильника соответственно; ξ – текущая толщина намораживаемой корки; n – показатель степени.

Интегрируя уравнение (4) в развернутом виде с учетом соотношения (5) и начальных условий (при $t = 0, \delta = 0.$), получаем:

$$t_{KP} = B_1 \cdot z + B_2 \cdot z^2 + B_3 \cdot \ln\left(1 + \frac{1}{n} \cdot \frac{\alpha}{\lambda} \cdot z \right), \tag{7}$$

где B_1, B_2, B_3 – коэффициенты, зависящие от теплофизических свойств расплава и условий теплообмена:

$$B_1 = \frac{C_\rho \cdot \rho}{\alpha} \cdot \left(L + \frac{1}{n+1} \right), B_2 = \frac{C_\rho \cdot \rho}{2 \cdot \lambda \cdot n} \cdot \left(L + \frac{1}{n+1} \right), B_3 = -\frac{n}{n+1} \cdot \frac{\lambda \cdot C_\rho \cdot \rho}{\alpha^2},$$

$$L = \frac{\rho_1}{C_\rho \cdot (T_{KP} - T_0)},$$

ρ_1 – удельная теплота кристаллизации металла; ρ, C_ρ – плотность и удельная теплоемкость намороженной корочки металла. Приравнивая правые части выражения (4) и (6) получаем:

$$B_2 \cdot \left(\sqrt{R^2 + y_2^2} - R \right) + \frac{1}{\omega} \cdot \arcsin\frac{y_2}{\sqrt{R^2 + y_2^2}} = \frac{1}{\omega} \arcsin\frac{y_1}{R}.$$

С достаточной степенью точности значение y_2 может быть найдено:

$$y_2 = \frac{h^2 \cdot \rho \cdot \omega \cdot R \cdot (\rho_1 + 0.5 \cdot \eta_1 \cdot C_\rho \cdot (T_{кр} - T_0))}{2 \cdot \lambda \cdot (T_{кр} - T_0)} \tag{8}$$

где η_1 – поправочный коэффициент.

Высота ванны расплава незначительно влияет на высоту зоны отвода тепла перегрева при фиксированных значениях перегрева металла и объемном расходе расплава в единицу времени. Аналогичное влияние оказывает изменение диаметра валков. Наибольшее влияние на высоту данной зоны оказывают скорость вращения валков и перегрев металла. Увеличение глубины ванны расплава расширяет границу стабильного формирования ленты. Увеличение скорости вращения валков, их диаметра, повышение температуры перегрева и уменьшения высоты ванны ведет к росту глубины лунки, что может привести к нарушению сплошности получаемой ленты. Для получения качественной ленты необходимо соблюдение параметров процесса.

Литература

1. Молотилов Б.В.// Сталь. – 1990. – №12. – С. 1
2. Верещагин М.Н.// Аморфные и микрокристаллические материалы. – М., 1989. – С. 5–8
3. Степанов А.Н., Зильберг Ю.В., Неуструев А.А. Производство листа из расплава. – М., 1978. – 143 с.
4. Вейник А.И. Теория затвердевания отливки. – М.: Из-во машиностроительной литературы, 1960. – 435 с.

ГРАДИЕНТНАЯ КАТАСТРОФА В ДВУМЕРНОЙ ТЕПЛОВОЙ ВОЛНЕ

О. Н. Шабловский
Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

Предметом исследования являются нелинейные свойства градиента температуры на подвижных двумерных границах, которые перемещаются в среде, обладающей конечным временем релаксации теплового потока:

$$\boldsymbol{q} + \gamma \frac{\partial \boldsymbol{q}}{\partial t} = -\lambda gradT \,. \tag{1}$$

Нелинейное гиперболическое уравнение теплопроводности имеет вид:

$$c\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \gamma \frac{\partial^2 T}{\partial t^2}\right) = div(\lambda gradT),\; c = c(T),\; \gamma = \gamma(T),\; \lambda = \lambda(T), \tag{2}$$

где T – температура; t – время; c – удельная объемная теплоемкость; γ – время релаксации теплового потока $\boldsymbol{q}(q_1, q_2)$; λ – коэффициент теплопроводности. Уравнение вида (2) было выведено в работах [1,2] для сред типа (1) с помощью вариационных принципов явлений нелинейного релаксационного теплопереноса.

Изучим здесь случай, когда теплофизические параметры среды таковы:

$$\lambda = \lambda_0 \exp(lT),\; c / \lambda = æ \equiv const,\; \gamma \equiv const,\; \gamma c / \lambda = n^2 .$$

Таким образом, располагаем исходным уравнением:

$$æ\, T_t + n^2 T_{tt} = T_{xx} + T_{yy} + l[(T_x)^2 + (T_y)^2].$$

Исследуемая задача состоит в следующем. В плоскости x, y при постоянной температуре T_0 имеется неподвижная среда, в которой тепловые возмущения распространяются со