

Рис. 1. Зависимость температуры частицы от расстояния до среза сопла плазмотрона

изменения температуры частицы в зависимости от расстояния до среза сопла плазмотрона.

Адекватность полученной модели (1)–(3) реальным условиям процесса проверяли сопоставлением с экспериментальными данными для случая напыления порошка вольфрама в дуге плазмы аргона [2]. Полученные результаты представлены на рис. 1.

Сплошные линии на графике соответствуют данным работы [2], пунктирные — расчетным значениям температуры частиц, полученным с помощью уравнений (1)–(3). Точками на графике обозначены температуры частиц, измеренные методом калориметрирования на расстояниях, соответствующих реальным условиям процесса газотермического напыления в режиме формообразования. При сопоставлении расчетных и экспериментальных данных наблюдается удовлетворительная сходимость результатов, расхождение составляет 4...9%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокопов В.И., Соколов Ю.В. Тепловые процессы в двухфазном потоке при напылении // *Металлургия*. — Мн., 1989. — Вып. 23.
2. Прогрев порошковых материалов в плазменных струях азота и аргона / В.Г. Саксельцев и др. // *Изв. вузов. Машиностроение*. — 1972. — № 1.

УДК 621.746

В.И. ТУТОВ, д-р техн. наук, Е.Б. ДЕМЧЕНКО, канд. техн. наук,  
Г.И. СТОЛЯРОВА, А.Н. КРУТИЛИН, В.А. ГРИНБЕРГ,  
кандидаты техн. наук (БПИ)

#### АНАЛИТИЧЕСКИЙ УЧЕТ ВЛИЯНИЯ КОНВЕКЦИИ НА КИНЕТИКУ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ НЕПРЕРЫВНО-ЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ

Исследование кинетики затвердевания полый цилиндрической отливки в процессе вертикального непрерывного литья с открытым уровнем и боковой подачей металла в кристаллизатор показало значительное несовпадение результатов расчета с экспериментальными. Объяснение этому было получено путем

моделирования процесса на прозрачной модели и изучения характера распределения термоконвективных потоков. Анализ результатов моделирования подтвердил предположение, что на процесс затвердевания существенное влияние оказывают конвективные потоки, возникающие при поступлении жидкого металла в полость кристаллизатора. Характер распределения термоконвективных потоков зависит от места подвода металла, неодинаков по периметру и приводит к неравномерности фронта затвердевания, что отрицательно сказывается на стабильности процесса литья.

Предложено аналитически учитывать неравномерное распределение теплоты перегрева по периметру отливки. Для этого вводят понятие интенсивности отвода теплоты перегрева  $i_{пер}$ , зависящей от объема затвердевшего металла  $V_T$ ,

$$i_{пер} = \frac{dQ_{пер}}{dV_T}$$

и угловую переменную координату.

Задаем линейной зависимостью (рис. 1, а)

$$i_{пер} = a_0 + a_1 V_T,$$

считая, что объем затвердевшего металла  $V_T$  по отношению к полному объему отливки  $V$  изменяется пропорционально распределению теплоты перегрева по

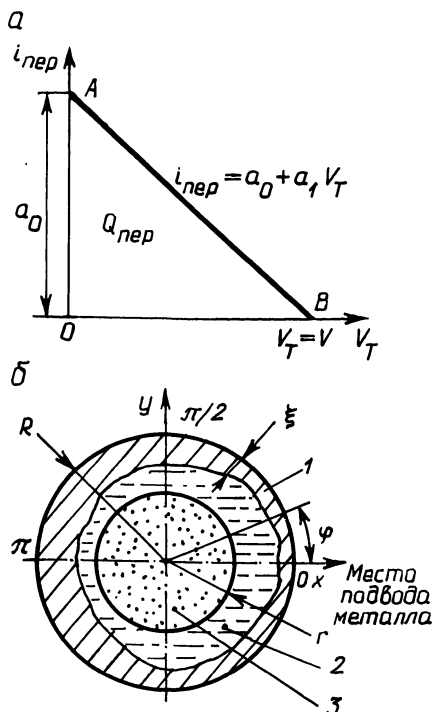


Рис. 1. Схема для расчета кинетики затвердевания корки при неравномерном распределении теплоты перегрева:

$a$  — зависимость теплоты перегрева от объема затвердевшего металла;  $b$  — схема затвердевания отливки по сечению; 1 — затвердевшая корка металла; 2 — жидкий металл; 3 — стержень

периметру сечения (рис. 1, б) и определяется зависимостью

$$V_T = V \sin \varphi / 2,$$

где  $\varphi$  – угловая координата, характеризующая распределение теплоты перегрева относительно места подвода металла в кристаллизаторе.

Точка  $A$  на рис. 1,  $a$  характеризует момент перед началом затвердевания ( $V_T = 0$ ,  $i_{\text{пер}} = a_0$ ), точка  $B$  – окончание затвердевания ( $V_T = V$ ,  $i_{\text{пер}} = 0$ ). Следовательно,

$$a_0 + a_1 V = 0, \quad a_1 = -a_0 / V.$$

Площадь треугольника  $AOB$  соответствует полной теплоте перегрева  $Q_{\text{пер}}$ :

$$a_0 V / 2 = V \rho r_{\text{пер}}, \quad a_0 = 2 \rho r_{\text{пер}},$$

где  $\rho$  – плотность материала отливки;  $r_{\text{пер}}$  – удельная теплота перегрева.

Тогда

$$i_{\text{пер}} = 2 \rho r_{\text{пер}} \left(1 - \sin \frac{\varphi}{2}\right),$$

а полная теплота перегрева, отводимая с фронта затвердевания,

$$Q_{\text{пер}} = \rho r_{\text{пер}} \left(1 - \sin \frac{\varphi}{2}\right)^2 V.$$

Подставляя в уравнение теплового баланса

$$Q_{i, \text{ж}} + Q_{i, \text{т}} = Q_{i+1, \text{ж}} + Q_{i+1, \text{т}} + Q_{i, \text{охл}} + Q_{i, \text{пер}}$$

(где  $Q_{i, \text{ж}}$ ,  $Q_{i, \text{т}}$  – количество теплоты, внесенной в единицу времени соответственно жидким металлом и твердой коркой через сечение  $i$ ;  $Q_{i+1, \text{ж}}$ ,  $Q_{i+1, \text{т}}$ ,  $Q_{i, \text{охл}}$  – количество теплоты, вынесенной через сечение  $i+1$  соответственно жидким металлом, твердой коркой и к охлаждающей среде) и решая его относительно времени формирования отливки  $\Delta t_i$ , получим уточненную расчетную формулу процесса затвердевания полой цилиндрической отливки с учетом неравномерного характера распределения теплоты перегрева  $Q_{\text{пер}}$  по периметру:

$$\Delta t_i = \frac{\rho}{2Rq_{i, \text{ср}}} \left\{ m_i r_{\text{пер}} \left(1 - \sin \frac{\varphi}{2}\right)^2 (R^2 - r^2) + r_{\text{эф}} (2R - \xi_i - \xi_{i+1}) \times \right. \\ \left. \times (\xi_{i+1} - \xi_i) + \frac{1}{3} \frac{c}{\lambda} [q_{i+1} \xi_{i+1}^2 (3R - \xi_{i+1}) - q_i \xi_i^2 (3R - \xi_i)] \right\},$$

где  $\Delta t_i$  – время формирования корки на участке  $\Delta l_i$ ;  $R$  – радиус отливки;  $q_{i, \text{ср}}$ ,  $q_i$ ,  $q_{i+1}$  – удельный тепловой поток соответственно средний на участке  $\Delta l_i$ , через сечения  $i$ ,  $i+1$ ;  $m_i$  – доля отведенной теплоты перегрева;  $r$  – радиус стержня;  $r_{\text{эф}}$  – эффективная удельная теплота кристаллизации;  $\xi_i$ ,  $\xi_{i+1}$  –

толщина затвердевшей корки соответственно в сечениях  $i, i+1$ ;  $c$  – удельная теплоемкость твердого металла;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Сравнение экспериментальных, полученных с помощью серных отпечатков, и расчетных данных показало, что расчетная формула вполне удовлетворительно описывает кинетику затвердевания отливки при несимметричном подводе металла в полость кристаллизатора.

УДК 621.762:669-158.81

А.С. КАЛИНИЧЕНКО, Ю.А. ЛОСЮК,  
Н.П. ЖВАВЫЙ, кандидаты техн. наук, М.А. АНТОНЕВИЧ (БПИ)

### ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ ЛЕНТ ИЗ МАГНИЯ

Известно, что сплавы на основе магния характеризуются большой жесткостью, что вызывает определенные трудности при прокатке тонких лент из слитков.

В связи с этим была поставлена задача изучить возможность получения лент из магния методом непрерывного литья на вращающийся валок и установить зависимости между основными технологическими параметрами процесса.

Одна из сложностей задачи заключается в том, что магний и сплавы на его основе отличаются большой склонностью к окислению. Чтобы подавить горение перегретого металла, при плавлении применялся флюс Ви-2. В процессе литья магния на водоохлаждаемый валок в зоне разливки расплава, кристаллизации и охлаждения ленты создавалась защитная среда. Кроме того, особенностью разливки является необходимость поддерживать в течение процесса небольшой перегрев расплава.

Анализ процесса литья лент на вращающийся валок показывает, что определяющими параметрами процесса являются толщина ленты; термическое сопротивление на границе "поверхность валка – расплав"; скорость движения ленты; высота уровня расплава, в пределах которой формируется лента; температура заливки.

Эти величины принимались во внимание при обработке экспериментальных и теоретических данных. В результате получено регрессионное уравнение, связывающее толщину магниевой ленты ( $X, \text{м}$ ) с основными параметрами технологического процесса литья:

$$X = \exp(8,3872 - 1,33 \cdot 10^{-4} a_1 - 4,291w + 1,55H - 0,0063 T_{\text{зал}}),$$

где  $a_1$  – коэффициент теплоотдачи от расплава к валку,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $w$  – скорость движения ленты,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $H$  – высота уровня расплава,  $\text{м}$ ;  $T_{\text{зал}}$  – температура заливки,  $\text{К}$ .

На основе анализа экспериментальных данных и с использованием приведенного уравнения построена номограмма для определения толщины магниевой ленты (рис. 1).

Из номограммы видно, что при получении ленты толщиной 2 мм с