

Одесский национальный политехнический университет

## **МАТЕРИАЛЫ**

VIII международной конференции

### **“ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА И ЭКОНОМИЧНОСТИ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ”**

9 – 11 сентября 2004 г.

Одесса

Материалы международной конференции “Пути повышения качества и экономичности литейных процессов”; 9 – 11 сентября 2004 г., г. Одесса, Украина — Одесса, 2004. — 111 с. — Яз. рус., укр.

<i>Саитов В.И., Савельева Е.В.</i> ПЛАВИЛЬНО-ЗАЛИВОЧНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЮВЕЛИРНЫХ ОТЛИВОК.....	84
<i>Иванова Л.А., Саитов В.И.</i> СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ СОХРАНЕНИЯ БРОНЗОВЫХ СКУЛЬПТУР .....	88
<i>Иванова Л.А., Замятин Н.И., Чернышева Е.Е.</i> ТЕРМОНАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОДНОСЛОЙНОЙ ОБОЛОЧКИ .....	94
<i>Зеленков С.Л.</i> РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АКТИВАЦИИ ХОЛОДНОТВЕРДЕЮЩИХ СМЕСЕЙ С НЕОРГАНИЧЕСКИМИ СВЯЗУЮЩИМИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ХУДОЖЕСТВЕННЫХ И ЮВЕЛИРНЫХ ОТЛИВОК .....	98
<i>Прокопович О.І., Морозов Ю.О. Прокопович І.В., Гогунський В.Д.</i> МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ПРИ БЕЗПЕРЕРВНОМУ ЛИТТІ .....	102
<i>Прокопович Л.В.</i> МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ШЛАКИ КАК ГЕОХИМИЧЕСКИЕ НОВООБРАЗОВАНИЯ.....	104
<i>Колеснікова К.В., Кострова Г.В.</i> ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ РІШЕННЯ РІВНЯНЬ МАТЕМАТИЧНОГО ОПИСУ РІВНОВАГИ СИСТЕМИ “ШЛАК — МЕТАЛ” .....	106
<i>Прокопович Л.В., Прокопович И.В.</i> ДИФФУЗИОННО-СОРЕБЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ВЕЩЕСТВА В СИСТЕМЕ ЛИТЕЙНЫХ ОТВАЛОВ .....	109



УДК 669.2,621.74.047

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ПРИ БЕЗПЕРЕРВНОМУ ЛИТТІ

*Прокопович О.І., Морозов Ю.О., Прокопович І.В., Гогунський В.Д.*

Одес. нац. політехн. ун-т.

При безперервному литті, процес затвердіння розплаву, відбувається при відводі теплоти перегріву у вузлі кристалізатора. Швидкість кристалізації злитка залежить від інтенсивності теплообміну, тобто швидкість лиття на пряму пов'язана з температурою і витратою охолоджуючої води в охолоджувачах і температурою розплаву. На практиці, швидкість лиття часто змінюється оператором лінії через теплові втрати при переливах чергових порцій розплаву, його кількості і хімічного складу (для сплавів), перерозподілу теплового навантаження в ливарній машині (особливо при багатострумковій схемі процесу), змін виробничої програми і т.д. [1].

При багатострумковому виробництві міді, локальні зміни теплового режиму окремих стренг (зміна швидкості; зупинка, запуск стренги) позначаються на теплопередачі в сусідніх струмках і перерозподіляють теплове навантаження у всій ливарній машині, що приводить до дисбалансу теплових параметрів і негативно позначається на якості одержуваних заготовок [2]. Таким чином, оптимальне керування процесом безперервного лиття вимагає регулювання ключових технологічних параметрів — загального теплового навантаження в ливарній машині та індивідуального розподілу теплопередачі по стренгах, що залежить від встановленого режиму роботи, хімічного складу металу, параметрів охолоджуючої води і швидкості лиття.

При безперервному литті міді кінцевий продукт виходить при проходженні розплаву через вузол кристалізатора, затвердінні у виді нескінченного злитка постійного перетину і наступному охолодженні в декількох зонах. У процесі проходження через зони охолодження злиток рухається з постійною швидкістю при постійності витрати охолоджуючої води. Якість одержуваного злитка, обумовлена кристалічною структурою, залежить від теплових впливів, що він перетерпів у зонах охолодження. Таких зон у сучасних машинах вертикального безперервного лиття звичайно дві: у первинному охолоджувачі відбувається зняття теплоти перегріву, кристалізація розплаву по всьому перетині і початкове охолодження злитка до температур 400...500 °С; у вторинному охолоджувачі злиток перетерплює рекристалізацію і проохолоджується до температур нижче 100 °С щоб уникнути окислення поверхні, що затрудняє його подальшу обробку.

При охолодженні стренг в обох охолоджувачах відвід тепла відбувається:

- через повітряний зазор непостійного перетину внаслідок шорсткості внутрішньої поверхні охолоджувачів, змін їхньої геометрії через термічні напружки та ін.;
- через стінку охолоджувача з перепадами товщини і нерівномірних відкладень солей і оксидів;
- на зовнішній поверхні, що контактує з охолоджуючою водою.

Таким чином, інтенсивність теплообміну непостійна та призводить до нестабільності температури стренг. Коливання температури в зонах охолодження приводить до утворення поверхневих дефектів типу тріщин і внутрішніх дефектів суцільності через усадочні пори або зональну ліквіацію, що негативно позначається на якості заготовки. Отже, керування температурою в охолоджувачах ливарної машини і стабілізація теплового режиму є актуальною виробничою задачею.



Кожна зона охолодження характеризується температурою  $u_i(t)$  і довжиною  $(l_i)$ ,  $q_i(t)$  — витрата охолодної води.

Мідь надходить у кристалізатор з температурою  $u_{\text{нач}}(t)$  — температура лиття, зі швидкістю рівною швидкості лиття  $v(t)$ . Скристалізована стренга характеризується щільністю  $\rho$ , питомою теплоємністю  $c$  і поперечним перерізом  $S$ . Охолоджуюча рідина характеризується температурою  $T_{\text{вх}}$  і питомою теплоємністю  $C_{\text{вх}}$  на вході.

Як математичну модель вибираємо Стефанівську модель затвердіння при постійній температурі кристалізації. Ця модель містить у собі три умови:

1. Гіперболічне нелінійне рівняння теплопровідності в рідкій ( $i = 1$ ) і твердій ( $i = 2$ ) фазах [3]:

$$\rho_i(u)c_i(u)\tau \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} + \rho_i(u)c_i(u) \frac{\partial u_i}{\partial t} - \lambda_i(u)\Delta u_i = 0, \quad i = 1, 2, \quad u \equiv u(\mathbf{x}), \quad (1)$$

де  $\rho$  — щільність;

$c$  — питома теплоємність;

$\lambda$  — теплопровідність;

$\Delta$  — оператор Лапласа;

$\tau_r$  — час релаксації теплового потоку, пов'язаний зі швидкістю поширення тепла  $\vartheta$ , співвідношенням  $\vartheta_r = \sqrt{\lambda/\rho c}$ .

2. Рівняння теплового балансу на границі фаз  $S$  (умова Стефана) [4]

$$L\rho \frac{\partial S}{\partial t} + (\lambda_1 \text{grad} u_1 - \lambda_2 \text{grad} u_2; \text{grad} S) = 0, \quad (2)$$

де  $L$  — схована теплота кристалізації при затвердінні;

$S \equiv S(\mathbf{x}, t) = 0$  — рівняння поверхні роздільної фаз.

Вираз в дужках — скалярний добуток векторів.

3. Умова постійності температури на поверхні фронту затвердіння

$$u(t, y(t)) = t_{\text{кр}}, \quad 0 < t < T. \quad (3)$$

Крім перерахованих умов необхідно додати процес теплообміну в контурах первинного і вторинного охолодження, що підкоряється граничній умові III-го роду який задає інтенсивність тепловіддачі на поверхні злитка  $\Omega$ . Його можна записати в узагальненій інтегральній формі [5]

$$\frac{1}{\tau_r} \int_0^\tau \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_\Omega \exp\left(-\frac{t-\tau}{\tau_r}\right) d\tau = \alpha(\mathbf{x}, t) \Big|_{\mathbf{x} \in \Omega} [u(\mathbf{x}, t) \Big|_{\mathbf{x} \in \Omega} - u_c(t)], \quad (4)$$

або в диференціальній формі

$$\frac{\partial u}{\partial n} \Big|_\Omega = \alpha(\mathbf{x}, t) \Big|_{\mathbf{x} \in \Omega} \left(1 + \tau_r \frac{d}{dt}\right) [u(\mathbf{x}, t) \Big|_{\mathbf{x} \in \Omega} - u_c(t)] \quad (5)$$

у випадку якщо  $u_c(t)$  — змінна величина і

$$\frac{\partial u}{\partial n} \Big|_\Omega - \alpha(\mathbf{x}, t) \Big|_{\mathbf{x} \in \Omega} \left(1 + \tau_r \frac{d}{dt}\right) u(\mathbf{x}, t) \Big|_{\mathbf{x} \in \Omega} = -\alpha(\mathbf{x}, t) \Big|_{\mathbf{x} \in \Omega} [1 + \tau_r \delta(t)] u_c, \quad (6)$$

якщо  $u_c(t) = u_c = \text{const}$ ,

де  $\alpha$  — коефіцієнт тепловіддачі;

$u_c(t)$  — температура навколишнього середовища (температура кристалізатора і охолоджувача залежна від витрати і температури охолоджуючої рідини).

Рішення сформульованої задачі з крайовими умовами дозволяє визначати температурне поле злитка в обох фазах у будь-який момент часу.



Рівняння (1) разом з умовами (2), (4) і початковою умовою, що задає розподіл температури в рідкій фазі  $u_{\text{нач}}(x) = u(x, t)|_{t=0}$ , описують зміни температури в  $i$ -зонах, з урахуванням швидкості лиття і витратою охолоджуючої води в цих зонах. Також враховується сумарний ефект взаємодії зон.

У виробничих умовах для контролю температури поверхні катанки на виході стренг із вторинних охолоджувачів 16-струмкової машини безперервного лиття встановлені безконтактні інфрачервоні пірометри. Температуру поверхні катанки, яка знаходиться в охолоджувачах знімають за допомогою платина-платинородієвих (Pt-Pt/Ro) термопар, що вмонтовані в стінки охолоджувачів. Температуру розплаву постійно вимірюють такою ж термопарою. Температуру охолоджуючої рідини на вході вимірюють за допомогою біметалічних термометрів, витрати води контролюють за допомогою поплавкових витратомірів змінюючи електромагнітними засувками. Швидкість лиття по технологічних осях змінюється в залежності від параметрів процесу шляхом регулювання обертання серводвигателів.

Результати моделювання співвідносяться з експериментальними даними, отриманими при вимірах температури поверхні стренг в умовах цеху безперервного лиття ВАТ "Одескабель".

### Література

1. Прокопович О.И., Прокопович И.В., Гогунский В.Д. Автоматизация производства высококачественной катанки для изготовления проводов сверхтонких сечений // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одеса, 2002. Спецвыпуск. — С. 68 — 71.
2. Прокопович О.И., Прокопович И.В., Гогунский В.Д. Температура поверхности катанки как косвенный параметр качества // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одеса, 2003. Вып. 2(20). — С. 128 — 130.
3. Кац А.М. Теплофизические основы непрерывного литья слитков цветных металлов и сплавов / Кац А.М., Шадек Е.Г. — М.: Металлургия, 1983. — 208 с.
4. Мучник Г.Ф. Методы теории теплообмена. Ч. 1. Теплопроводность / Мучник Г.Ф., Рубашов И.Б. — М.: Высш. школа, 1970. — 288 с.
5. B. Lalli, L. Biegler, H. Henein. Finite difference heat transfer modelling for continuous casting / Metallurgical Transactions. — 1990. В 21(4) — Р. 761 — 770.

УДК 621.742:628.516

## МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ШЛАКИ КАК ГЕОХИМИЧЕСКИЕ НОВООБРАЗОВАНИЯ

*Прокопович Л.В.*

Одес. нац. политехн. ун-т

В геохимическом воздействии человека на биосферу литейное производство является одним из наиболее существенных факторов. Здесь, как и в металлургии, образуются новые продукты, которые, по словам В.И. Вернадского "не отличаются от минералов". Это обусловлено тем, что большинство новых продуктов (материалов) создается на основе или при участии природных элементов и соединений. Причем это отно-

