

Трегулова Ільміра, магістр

Науковий керівник – Воронкова В.Г., д.філос.н., проф.,

зав. каф. менеджменту організацій та управління проектами

Запорізька державна інженерна академія

АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ТА ЗАТВЕРДІВАННЯ АЛЮМІНІЄВОЇ ЗАГОТОВКИ НА ЛІНІЇ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ТА ПРОКАТКИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА АЛЮМІНІЄВОЇ КАТАНКИ

Виробництво алюмінієвої катанки методом безперервного лиття і прокатки металу є одним з найефективніших способів отримання даної продукції.

Лінія безперервного лиття та прокатки - це технологічний агрегат, який об'єднує в собі два незалежних пристрої: ливарну машину роторного типу та прокатний стан [1].

Тепловий режим при безперервному розливанні та прокатці є одним з основних параметрів технологічного процесу. Його порушення може призвести до повної втрати плавки або до створення ряду проблем, таких, як поганий і нерівномірний теплообмін, великі температурні коливання ливарної заготовки, шорстка або задирлива поверхня, трубчасті порожнечі, тріщини або розриви [2].

Тому метою дослідницької роботи є виявлення параметрів, що впливають на якість алюмінієвої заготовки на виході з ливарного колеса, для їхньої подальшої оптимізації. Основним параметром, що впливає на фізико-механічні властивості готової продукції є характер кристалічної структури заготовки, що формується в ливарному колесі. Структура заготовки залежить від хімічного складу сплаву, наявності домішок, умов охолодження заготовки в кристалізаторі. Тому важливо визначити, яким чином умови кристалізації впливають на структуру заготовки, щоб при виготовленні катанки можна було забезпечити оптимальний тепловий режим для отримання готової продукції належної якості. Оскільки проведення експериментів на реальному об'єкті потребує значних матеріальних витрати, є необхідність математичного моделювання процесу охолодження та затвердіння заготовки.

В агрегатах подібного типу існує декілька зон охолодження з різними режимами для забезпечення оптимального процесу лиття заготовки. Наприклад, ЛПА Continuos Properzi має 7 зон охолодження [3]:

Зона 1 - критична зона охолодження.

Зона 2 - перехідна зона охолодження (від різкого охолодження до більш рівномірного).

Зони 3, 4 - зони, охолодження в яких залежить від призначення алюмінієвої катанки.

Зона 5 - початок охолодження дна виливниці.

Зона 6 - початок охолодження бічної стінки виливниці і охолодження сталевих стрічки.

Зона 7 - завершальне охолодження нижньої частини виливниці.

В загальному випадку, весь складний процес теплопередачі можна розділити на кілька етапів: передача тепла від рідкого металу до поверхні твердої скоринки, через корочку злитка, від поверхні злитка до стінки кристалізатора, через стінку кристалізатора і від стінки кристалізатора до охолоджувальної води. В процесі охолодження злитку віддача тепла сповільнюється внаслідок термічного опору, який складається з наступних ділянок:

- 1) від рідкого металу до скоринки злитка;
- 2) через затверділу корочку металу;
- 3) від поверхні злитка до стінки кристалізатора через газовий зазор;
- 4) через мідну стінку кристалізатора;
- 5) від стінки кристалізатора до охолоджувальної води.

Найбільш вагомим є опір від поверхні злитка до стінки кристалізатора через газовий зазор, який необхідно враховувати в математичній моделі процесу кристалізації.

Для вирішення даної проблеми було проаналізовано математичні моделі процесу охолодження та затвердіння заготовки на аналогічних об'єктах.

Найбільш поширеним способом моделювання процесу кристалізації металів є вирішення задачі теплопровідності. Вирішення задачі зводиться до інтегрування диференціального рівняння теплопровідності з урахуванням граничних умов на зовнішніх та внутрішніх межах системи та початкових умов. Наприклад, для моделювання теплових процесів, що відбуваються у злитку під час безперервного розливання сталі в МБЛЗ [4] розроблено математичні моделі квазістаціонарного й нестационарного процесів тепло-масоперенесення всередині злитку та теплообміну всередині стінок кристалізатора. Наприклад, мат. модель теплових процесів ділянки злитку всередині кристалізатора виглядає наступним чином:

$$\begin{aligned} \nu \frac{\partial T}{\partial z} &= \frac{1}{c(T)\rho(T)} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] \right\}, (1) \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} &= C_n \left[\left(\frac{T_a}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр.ср}}}{100} \right)^4 \right], \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, 0 \leq z \leq Z, (2) \end{aligned}$$

$$\lambda(T, z) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=1} = \frac{\lambda_{г.з}}{\delta_3} (T|_{x=l+\delta_3} - T|_{x=l}) + C_n \left[\left(\frac{T_{x=l+\delta_3}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{x=l}}{100} \right)^4 \right] = 0, (3)$$

$$T(x, z)|_{x=\xi-(z)} = T(x, z)|_{x=\xi-(z)} = T_{kr}, (4)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial \bar{n}} \Big|_{x=\xi-(z)} + \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial \bar{n}} \Big|_{x=\xi+(z)} = \mu \rho(T_{kr}) \nu \frac{d\xi}{dz}, \xi(0) = l. (5)$$

Для урахування опору передачі тепла через газовий зазор в даній моделі задано граничні умови 3го роду, що характеризують лучисту та конвективну передачу тепла між поверхнею злитку та стінкою кристалізатора через зазор(3). Для опису руху невідомої межі між рідкою та твердою фазами задано умову Стефана(5).

Однак при інтегруванні ДР виникають важковизначні математичні проблеми. Тому прикладів замкнутих аналітичних рішень таких задач дуже мало.

Відома математична модель [5] охолодження та затвердіння злитку із застосуванням одномірного ДР (6) теплопровідності та початкових умов (7) і граничних умов (8-9). Для урахування опору теплопередачі через зазор використовується розрахунок величини зазору між злитком та стінкою кристалізатора(10) та розрахунок коефіцієнта теплопередачі від злитку до охолоджуючої води(11-12):

$$C_{\text{эф}}(t)\rho(t) \frac{dt}{d\tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right), 0 < x < B, 0 < \tau, (6)$$

$$t(x, 0) = t_{ж0}, 0 < x < B, (7)$$

$$\frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=B} = 0, \tau > 0, (8)$$

$$\lambda(t_{\text{п}}) \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = -k(\tau) \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{в}}), (9)$$

$$\partial(\tau) = - \int_0^{\tau} \left(\int_0^{\xi_c(\tau)} \beta_l(t) \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} dx \right) d\tau, (10)$$

$$k(\tau) = \left(\frac{\delta_0}{\lambda_{\text{см}}} + \frac{\delta_{\text{м}}}{\lambda_{\text{м}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{эф}}} \right)^{-1}, \text{ при } \delta(\tau) \leq \delta_0, (11)$$

$$k(\tau) = \left(\frac{\delta(\tau)}{\lambda_3} + \frac{\delta_{\text{м}}}{\lambda_{\text{м}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{эф}}} \right)^{-1}, \text{ при } \delta(\tau) > \delta_0, (12)$$

Також відома математична модель [6] процесу затвердіння заготовок при дискретно-безперервному литті циліндричних заготовок, що включає рівняння нерозривності, кількості руху та енергії, граничні умови, що описують тепловий потік на межах. Ця математична модель використана для моделювання величини двофазної зони сплаву. Дана математична модель враховує:

- нестационарність процесу;
- кінетику фазового переходу;
- індукційовану і поверхневу конвекцію;
- турбулентність та ін.

Гранична умова по теплопередачі на межі виливниці-кристалізатор враховує утворення зазору внаслідок розвитку об'ємної усадки сплаву і зміни внаслідок цього механізму перенесення тепла. Для моделювання турбулентності використовується RNG k-ε модель, що включає рівняння турбулентної в'язкості, турбулентної кінетичної енергії та швидкості дисипації.

Для моделювання процесу кристалізації та лінії безперервного лиття та прокатки для виробництва алюмінієвої катанки використовується схожа модель, що включає рівняння збереження маси, руху, енергії. Система рівнянь доповнюється граничними умовами Дирихле, умови прилипання для меж, що відповідають стінкам рідкого об'єму, граничні умови теплообміну стінок моделі з оточуючим середовищем по закону Ньютона-Ріхмана. Урахування газового зазору між кристалізатором та злитком задається шляхом зміни фізичних властивостей тонкого граничного шару між злитком та кристалізатором.

Відома математична модель [7] безперервного лиття мідної катанки. В агрегатах даного типу конструктивно передбачено дві зони охолодження: в первинному охолоджувачі відбувається зняття теплоти перегріву, кристалізація розплаву по всьому перетину і початкове охолодження злитка; у вторинному охолоджувачі злиток зазнає рекристалізацію і охолоджується до температур, при яких не відбувається окислення його поверхні. Математична модель описується тепловим балансом (13) в динамічному режимі для кожної зони:

$$m_i C_{ci} \frac{dT_i(t)}{dt} = q_m(t) C_{ci} (T_{i-1}(t) - T_i(t)) - q_i(t) C_{BHX} (T_i(t) - T_{BHX}) \quad (13)$$

Рівняння, після певних перетворень, описує нелінійне відношення, що зв'язує зміни температур в зонах /, (/ -1), швидкість лиття і витрата охолоджуючої води в цих зонах. У ньому також враховується сумарний ефект взаємодії зон і визначальний вплив на температуру поверхні злитку таких параметрів як теплоємність міді, теплоємність води її температура і витрата, а також швидкість лиття. Вплив інших параметрів і змінних процесу приймається незначним.

Таким чином, детальне вивчення даного питання та математичне моделювання процесу кристалізації заготовки в ливарній машині дозволить впливати на структуру алюмінієвої заготовки, змінюючи умови охолодження, для отримання катанки заданої якості.

Література:

1. *Линия для непрерывного литья и прокатки алюминия [Текст] / Техническое описание. Шанхайский научно-исследовательский электротехнический институт. – КНР. – 2008. – 40 с.*
2. *Авдулов А.А. Электромагнитный модификатор слитка в роторной литейной машине: диссертация ... кандидата технических наук. Сибирский федеральный университет. - Красноярск, 2015. - 153 с.*
3. *Шульга А. И. Производство алюминиевой катанки на технологической линии Continuis Properzi / А. И. Шульга, И.Ф. Червоный, С. Г. Егоров// Литье и металлургия: научно-производственный журнал. – Минск, 2008. – Вып. 1. – С. 62-65.*
4. *Іванова Г.О. Система автоматичного керування режимами охолодження металу машини безперервного лиття заготовок. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація процесів керування. – ДВНЗ "Донецький національний технічний університет", Донецьк, 2010.*
5. *Шестаков Г.Н. Моделирование и разработка методов расчета процессов теплопередачи в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок: дис. ... канд. техн. наук. Воронежский государственный университет, Воронеж, 2011.*

6. Жиганов Н. К., Фомина Е. Е. Моделирование и исследование процесса затвердевания заготовок при дискретно-непрерывном литье металлов. Тверь: ТГТУ, 2009. С. 67-75.
7. О.И. Прокопович, Ю.А. Морозов, И.В. Прокопович. Идентификация математической модели непрерывного литья медной катанки. Труды Одесского политехнического университета: Научный и производственно-практический сборник по техническим и естественным наукам. — Одесса, 2005. — Спецвыпуск. — С.106-109.