**УДК 669.162.22**

**Кананович С.І., Кравченко В.П.**

**ОЦІНКА ЗАСТОСУВАННЯ РІЗНИХ ТИПІВ РОЗПОДІЛЕННЯ ТЕПЛОВІДДАЧІ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ЗЛИВКУ У ЗОНІ**

**ВТОРИННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ МАШИНИ БЕЗПЕРЕРВНОГО РОЗЛИВУ**

**ЗАГОТІВОК**

*Розглядається математична модель охолодження злитка в зоні вторинного охолодження машини безперервного лиття заготовок в стаціонарному режимі розливання, без зміни швидкості по ходу охолодження. Побудова температурного поля заготовки при різних коефіцієнтах тепловіддачі по всій довжині зони вторинного охолодження.*

***Ключові слова:*** *машина безперервного розливу заготівок (МБРЗ), зона вторинного охолодження (ЗВО),* *кристалізація, затвердіння, математичне моделювання, температурне поле, коефіцієнт тепловіддачі.*

***Кананович С.И. , Кравченко В.П.*** ***Оценка использования разных типов распределения теплоотдачи при моделировании процесса охлаждения слитка в зоне вторичного охлаждения машины беспрерывного розлива заготовок***

*Рассматривается математическая модель охлаждения слитка в зоне вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок в стационарном режиме разливки, без изменения скорости по ходу охлаждения. Построение температурного поля заготовки при различных коэффициентах теплоотдачи по всей длине зоны вторичного охлаждения.*

*Магістрант, канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» м. Маріуполь електронна адреса elfuses@gmail.com , kravchenko\_vp@ ukr.net*

***Ключевые слова:*** *Машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), зона вторичного охлаждения (ЗВО), кристаллизация, затвердевание, математическое моделирование, температурное поле, коэффициент теплоотдачи.*

***Kananovich S.I. Kravchenko V.P. Evaluation of the use of different types of heat transfer distribution in modeling the cooling process of an ingot in the secondary cooling zone of a continuous filling machine.***

*A mathematical model of cooling an ingot in the secondary cooling zone of a continuous casting machine in a stationary casting mode is considered, without changing the speed during cooling. Construction of the temperature field of the workpiece at various heat transfer coefficients along the entire length of the secondary cooling zone.*

***Key words:*** *Continuous casting machine (CCM), secondary cooling zone (SCZ), crystallization, solidification, mathematical modeling, temperature field, heat transfer coefficient.*

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Чисельними і аналітичними методами досліджувалися процеси охолодження і затвердіння злитка в кристалізаторі і зоні вторинного охолодження (ЗВО). У даній роботі розроблений метод визначення теплової взаємозв'язку злитка з охолоджуючими пристроями в ЗВО МБЛЗ, що включає вимірювання температури поверхні злитка в секціях ЗВО і математичне моделювання процесу затвердіння злитка в МБЛЗ.

Розроблено спосіб охолодження сляба в ЗВО МБЛЗ, захищений трьома патентами на винаходи, який дозволяє витримувати раціональний температурний режим охолодження сляба при стаціонарних і перехідних режимах розливання, рекомендований до впровадження в систему автоматизації криволінійних слябових МБЛЗ для підвищення якості металу і збільшення стійкості обладнання МБЛЗ.[1]

Запропоновано алгоритм дозволяє, шляхом використання мови програмування MATLAB, уявити температурний стан злитка в металургійній технології. Методика приваблива тим, що не вимагає глибоких спеціальних знань в області програмування, але наочно представляє динаміку процесу кристалізації, для інженерного використання.

Вивчається температурний стан формується заготовки в процесі кристалізації, побічно що дозволяє оцінити такі параметри: форму і глибину рідкої лунки, протяжність зони двофазного стану і товщину затверділої оболонки на різних відстанях від меніска рідкого металу.[2]

**Постановка проблеми*.*** Налагодження та освоєння нових МНЛЗ вимагає корекції режимів охолодження безперервного сляба в кристалізаторі в зоні вторинного охолодження, розрахованих при проектуванні установок.

Як відомо, теплообмін на поверхні заготовок визначається функцією розподілу коефіцієнтів тепловіддачі по довжині МБЛЗ, яка пов'язана з інтенсивністю охолодження заготовки по периметру, обраної з умов отримання якісного металу на виході з МНЛЗ.

Проблема полягає в тому, що не вірно обраний режим охолодження (витрат охолоджуючої води), швидкість розливання для різних марок сталі та їх перетину - все це може стати наслідком отримання неякісної стали з наявністю внутрішніх тріщин, дефектів, а також ймовірності того, що на виході із зони вторинного охолодження заготовка буде рідкої зсередини.

**Постановка задачі*.*** Необхідно моделювати процес кристалізації заготівок з використанням різних коєффіціентів тепловіддачі який дозволяє визначити температурне поле до того як почнеться безпосередньо процес розливання сталі.

Завдання підготовки даних для розрахунку уточнених режимів охолодження являє собою визначення функції розподілу коефіцієнтів тепловіддачі на поверхні заготовки на основі отриманих в результаті експериментів (найчастіше пасивних, тобто спостережень за параметрами розливання) даних по температурах поверхні на гранях заготовки, швидкості розливання і витрат охолоджувача в зонах охолодження. Отримання функції розподілу є завданням математичного програмування, і його методи дають найкраще наближення.

**Основна частина*.*** Математичною моделлю процесу кристалізації безперервного злитка можна вважати диференціальне рівняння нестаціонарної теплопровідності в умовах фазових перетворень (кристалізації металу) з відповідними початковими і граничними умовами.

(1)

де ρ - щільність металу;

C - ефективна теплоємність;

λ - теплопровідність;

q - прихована теплота плавлення;

ψ (t) - функція, що враховує частку твердої фази в двофазної зоні кристалізується металу;

Рівняння доповнюється такими початковими умовами:

(2)

де tc - температура перегрітої рідкої сталі, що надходить в кристалізатор.

В якості граничних умов при вирішенні рівняння обрані граничні умови третього роду:

(3)

де tпов - температура поверхні металу;

tдов - температура довкілля;

α (τ) - коефіцієнт тепловіддачі з поверхні металу в залежності від положення в зоні охолодження.

Зробимо наступні припущення, що випливають з фізичних особливостей завдання:

- температурний режим вважаємо сталому;

- швидкість руху злитка постійна;

- теплообміну уздовж зливка не відбувається через малого зміни температури вздовж зливка; основний теплообмін йде в площині поперечного перерізу зливка;

- теплопровідність твердої і рідкої сталі вважаємо однаковою.

Грунтуючись на припущеннях, ми можемо тривимірну задачу розглядати як двовимірну задачу теплообміну з нестаціонарними граничними умовами в поперечному перерізі зливка.

Для спрощення рівняння (1) було виведено ефективне значення теплоємності Cеф (t)

(4)

де tс - гранична температура твердого металу (солидус);

tл - температура рідкого металу (ликвидус);

Рівняння теплопровідності набуває вигляду:

(5)

Відповідно до гіпотези про рівномірний виділення твердої фази в інтервалі температур ликвидус - солидус, функція ψ(t) має вигляд:

(6)

Підставляючи вираз (6) в вираз (4) отримаємо вираз залежності теплоємності від температури:

(7)

Для чисельного рішення рівняння застосуємо сітковий апроксимацію температурного поля вздовж поперечного перерізу зливка. Для спрощення обчислювальних операцій виберемо однаковий крок сітки по ширині і висоті перетину злитка. Виберемо явну схему, класичну для такого роду завдань.

В силу симетричності граничних і початкових умов в якості області рішення виберемо чверть перетину злитка.

Задамося розміром злитка S x H. Виберемо крок дискретизації Δ по довжині виходячи з необхідної точності і критеріїв збіжності методу. Тоді кількість розбиття чверті перетину по ширині і по висоті відповідно рівні (під знаком] [розуміється округлення до більшого цілого):

(8)

Розглянемо деяку елементарну комірку з температурою ti, j лежить в області рішення. На підставі теплового балансу тепловий потік через стінки даного осередку від сусідніх осередків йде на нагрів осередки за елементарний проміжок часу.

Запишемо рівняння (1) в кінцевих різницях

(9)

де - значення температури на наступному часовому кроці;

ti, j - значення температури на даному часовому кроці;

Δτ - крок дискретизації за часом;

Індекси i та j - відповідно по ширині і висоті перетину злитка.

Висловивши ΔV, ΔS, Δx, Δy через однаковий крок Δ. Підставимо вираз (9)

(10)

Скоротивши (10) отримаємо:

(11)

Для граничних осередків з урахуванням граничних умов вираження для мають вигляд:

Для верхньої широкої зовнішньої грані злитка

(12)

α - коефіцієнт тепловіддачі від злитка до поверхні;

tдовкілля – температура довілля ЗВО.

Для нижньої широкої грані чверті злитка

(13)

Для бічній зовнішній межі чверті злитка

(14)

α - коефіцієнт тепловіддачі від злитка до поверхні;

tдовкілля - умовна температура ЗВО.

Для бічної внутрішньої грані чверті злитка

(15)

Найбільш істотним параметром моделі є розподіл коефіцієнта тепловіддачі по довжині ЗВО. Подібні дані є експериментальними і специфічні для конкретної МБЛЗ, марок сталей, умов розливання. В якості даних виберемо результати дослідницької роботи [3], що проводиться для визначення розподілу тепловіддачі α.

Перший і другий графіки показують розподілу, знайдені експериментально шляхом апроксимації експериментальних даних.

Третій малюнок відображає теоретичне розподіл в результаті аналізу найбільш раціонального охолодження по Д. П. Євтєєву: монотонне зниження температури по довжині злитка; рівномірний розподіл температур по периметру; забезпечення температури поверхні злитка в кінці зони вторинного охолодження не нижче 800-900 ° C.

За результатами роботи моделі, які відображені на рисунку 1, можна провести порівняльний аналіз відносно різних коефіцієнтів тепловіддачі (інтенсивності охолодження) при стаціонарної швидкості розливки сталі по всій довжині МБЛЗ.

Рисунок 1 – Графік розподілу температури с середени зливку з використанням різних коєффицієнтів тепловіддачі зі швидкістю 0,8 м/хв.

**ВИСНОВКИ**

1. Розподіл коефіцієнтів тепловіддачі № 1 і № 2 дають відомості про те, що в кінці зони вторинного охолодження злиток все ще перебуває в рідкому стані.

2. Аналізуючи результат роботи математичної моделі можна визначити що розподіл коефіцієнта температур №3 найкраще відображає отримання затверділої заготівлі на виході з ЗВО, вважаючи що довжина зони 25 метрів.

3. Надалі подібна модель може служити для прогнозу не тільки температурного поля в з заготівлі, а й пов'язаних з ним параметрів якості і структури.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Лукин С.В. Методические основы охлаждения металла в машинах непрерывного литья заготовок. Диссертация. / Череповец 2009- 378 с.

2. Большина Е.П., Барбаев В.И. Оптимизационная модель процесса разливки стали на МНЛЗ / Новотроицкий филиал МИСИС

3.Якушев А.М., Вяткин Ю.Ф. Справочник конверторщика Справочник. / Челябинск: «Металлургия», 1990 – 448 с.

4. Кудрин В.А. Металлургия стали Учебник для вузов. / М.: «Металлургия», 1989 – 560 с.

5. Смирнов А.Н., Куберский С.В., Штепан Е.В. Непрерывная разливка стали. ДонНТУ, 2011 – 479 с.

6.Технологичекая инструкция «Разливка стали на МНЛЗ» на ММК имени «Ильича»

7. Яворский В.И., Ойкс Г.Н. и др. Металлургия стали Учебник для вузов./ М.: «Металлургия», 1973 - 816с.