**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 зливка в зоні вторинного охолодження машини безперервного розливу заготівок в стаціонарному режимі розливання, без зміни швидкості по ходу охолодження. При моделюванні використовувались різні типи розподілення коефіцієнтів тепловіддачі, пропоновані раніше різними авторами. В результаті моделювання визначено розподілення, яке найбільш реально відображає процес*

*охолодження і кристалізації зливка 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 разлива заготовок в стационарном режиме разливки, без изменения скорости по ходу охлаждения. При моделировании использовались различные типы распределения коэффициентов теплоотдачи, предлагаемые ранее различными авторами. В результате моделирования определены распределения, которое наиболее реально отражает процесс охлаждения и кристаллизации слитка 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.***

*The mathematical model of ingot cooling in the zone of secondary cooling of the machine of continuous blending of blanks in a stationary mode of pouring, without change of speed in the course of cooling is considered. Different types of heat transfer coefficients, previously proposed by different authors, were used in the simulation. The simulation determines the distribution that most closely reflects the process cooling and crystallization of the ingot over 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.** В [1] чисельними і аналітичними методами досліджувалися процеси охолодження і затвердіння зливка в кристалізаторі і зоні вторинного охолодження (ЗВО). . В цій роботі розроблено метод визначення теплової взаємозв'язку зливка з охолоджуючими пристроями в ЗВО МБЛЗ, що включає вимірювання температури поверхні злитка в секціях ЗВО і математичне моделювання процесу затвердіння злитка в МБЛЗ. Розроблений 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.

Запропоновано алгоритм [2], який дозволяє, шляхом використання мови програмування MATLAB, представити температурний стан зливку. Методика приваблива тим, що не вимагає глибоких спеціальних знань в області програмування, але наочно представляє динаміку процесу кристалізації, для інженерного використання. При цьому вивчається температурний стан заготівки в процесі її охолодження і кристалізації. Побічно можна оцінити також форму і глибину рідкої лунки, протяжність зони двофазного стану і товщину затверділої оболонки на різних відстанях від меніска рідкого металу. У всіх цих роботах при моделюванні використовувались сталі, або експериментально підтвердженні теплофізичні коефіцієнти, що не завжди відображає реальну картину процесу охолодження.

**Постановка проблеми*.*** Налагодження та освоєння нових МБРЗ вимагає корекції режимів охолодження безперервного сляба в кристалізаторі та 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 МБРЗ.

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 заготівка буде з рідкою сердцевиною.

**Постановка задачі*.*** Математично промоделювати процес кристалізації заготівок в зоні вторинного охолодження з використанням різних розподілень коефіцієнтів тепловіддачі. Це дозволить визначити, який тип розподілення найбільш достовірно відображає температурне поле безперервної заготівки в процесі її охолодження і кристалізації.

Формування початкових даних для розрахунку уточнених режимів охолодження потребує визначення функції розподілу коефіцієнтів тепловіддачі на поверхні заготівки. Найчастіше ці дані отримують в результаті експериментів, як правило, пасивних, тобто одержаних в результаті спостереження параметрів розливання). Необхідно також мати дані про температуру поверхні та на гранях заготівки, швидкості розливання та витрат охолоджувача в зонах охолодження.

**Основна частина*.***

Формування початкових даних для розрахунку уточнених режимів охолодження потребує визначення функції розподілу коефіцієнтів тепловіддачі на поверхні заготівки. Найчастіше ці дані отримують в результаті експериментів, як правило, пасивних, тобто одержаних в результаті контролю параметрів розливання. Необхідно також мати дані про температуру поверхні та на гранях заготівки, швидкості розливання та витрат охолоджувача в зонах охолодження. При моделюванні в роботі використовуваись початкові

дані, наведені в роботах [6,7]

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 сталим;

- швидкість руху зливка постійна;

- теплообмін 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 вибрані результати дослідницької роботи [5], 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 МБРЗ.

Рисунок 1 – Графік розподілу температури с середени зливку з використанням різних розподілень коефіцієнтів тепловіддачі при швидкості 0,8 м/хв.

Розглядаючи графік і порівнюючи з іншими результатами бачимо, що при розподілі коєффіціента теплопередачі №3 розподіл температур найбільш близьке до раціонального. Виходячи з цього можна рекомендувати режим охолодження в ЗВО, при якому розподіл коефіцієнта теплопередачі буде найбільш близьким до розподілу № 3.

**ВИСНОВКИ**

1. Використання розподілення коефіцієнтів тепловіддачі № 1 і № 2 при моделюванні показують, що в кінці зони вторинного охолодження зливок все ще має рідку сердцевину.

2. Результати математичного моделювання з використанням розподілення коефіцієнта тепловіддачі №3 найкраще відображають процес охолодження і кристалізації зливку на виході з ЗВО.

3. Представлена модель може бути використана для прогнозу температурного поля по довжині заготівки, а також, пов'язаних з ним параметрів якості металу.

**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.