

ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

На правах рукопису

ШАПОВАЛ НАТАЛЯ ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 536.44

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ОБ'ЄМНОЇ
КРИСТАЛІЗАЦІЇ ЗЛИВКІВ З ВИКОРИСТАННЯМ
МІКРОХОЛОДИЛЬНИКІВ НА ОСНОВІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ
ТЕПЛООБМІНУ

Спеціальність 05.14.06 - Технічна теплофізика
та промислова теплоенергетика

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування ім. адм. Макарова МОНмолодьспорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
МОЧАЛОВ ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ,
Національному університеті кораблебудування ім. адм. Макарова, зав.
кафедри фізики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
КРУКОВСЬКИЙ ПАВЛО ГРИГОРОВИЧ
Інститут технічної теплофізики НАН України, зав. відділом моделювання
процесів теплообміну.

доктор технічних наук,
ТАРАСЕВИЧ МИКОЛА ІВАНОВИЧ
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, зав.
відділом математичних методів дослідження та комп'ютерних технологій.

Захист відбудеться “___” _____ 2012 р. о ___ годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01 Інституту технічної теплофізики
НАН України за адресою: 03057, Київ, вул. Желябова 2А

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці ІТТФ НАНУ за адресою:
03057, Київ, вул. Желябова 2А

Автореферат розісланий “___” _____ 2012 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.224.01,
кандидат технічних наук

О.І. Чайка

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У наш час в усіх розвинутих країнах металургія є однією із найбільш енергоємних галузей виробництва. Структурні зміни вітчизняної промисловості, що відповідають вимогам ринку, обумовлюють необхідність модернізації існуючих, а також створення нових металургійних заводів та установок, які б забезпечили високу продуктивність, економічність, високу якість продукції при низьких інвестиційних витратах виробництва.

Такою перспективною і орієнтованою на вимоги ринку технологією є безперервне лиття сталі в заготовки, розмір яких максимально наближено до розмірів готового продукту. Прагнення поліпшення якості товстого металу призвело до ряду технологій: зняття температури перегріву за допомогою інокуляторів та отримання зливка шляхом введення в рідкий метал готових зливків того ж металу для прискорення кристалізації.

Існуючі способи отримання безперервного розливу металу мають певні недоліки: малу швидкість витягування зливка, велику протяжність глибини рідкої лунки та суттєву неоднорідність температурного поля перерізу зливка, що не дає можливість використовувати його для гарячого прокату. Все це позначається на габаритах установки безперервного розливу сталі.

В даний час в процесі виробництва металопродукції виникла необхідність поєднання безперервного розливу з безперервним прокатом, що дає можливість збільшити продуктивність отримання продукту з металу і знизити енерговитрати.

Дана робота пропонує для інтенсифікації процесу кристалізації безперервного зливку використовувати об'ємну кристалізацію у відповідному перерізі кристалізатора. А також, присвячена вдосконаленню технологічних процесів розливу сталі на установках безперервного розливу сталі, збільшення швидкості кристалізації, поліпшенню якості металопродукції за рахунок введення в рідкий метал інокуляторів (мікрохолодильників), що забезпечують об'ємну кристалізацію, досягненню рівномірної температури по всьому перетину зливка з метою поєднання установки безперервного розливу сталі з безперервним прокатом в гарячому стані. Основні техніко-економічні переваги такого методу лиття перед традиційним безперервним литтям полягають у виключенні стадій нагрівання отриманої заготовки для гарячої прокатки, що значно знижує енергоємність виробництва, скорочує капіталовкладення, і збільшенні швидкості витягування зливка з кристалізатора.

На жаль, до теперішнього часу мікрохолодильники використовувались тільки для зняття температури перегріву рідкого металу і суспензійному литті. На Україні подібного проекту досі не було практично реалізовано у промисловості через малий час існування мікрохолодильників в рідкому металі. Нинішні установки безперервного розливу сталі вичерпали свої можливості по збільшенню швидкості кристалізації.

Підвищення ефективності виробництва нових ливарних матеріалів неможливе без розробки нових методів дії на рідкий метал та метал, який кристалізується. Проте, необхідні для створення цих методів промислові і лабораторні дослідження пов'язані з великими технологічними і фінансовими труднощами. Тому особливу увагу слід приділити методам математичного моделювання, зокрема обчислювальному експерименту.

Зв'язок з науковими програмами. Дисертаційна робота виконувалась у відповідності з прийнятим рішенням сьомого засідання Міжвідомчої науково-технічної ради України з проблем позапічного розливу сталі.

Мета дослідження: вибір та обґрунтування критеріїв оптимальності технологічного процесу, що забезпечують об'ємну кристалізацію у заданому перерізі зливка, та параметрів об'ємної кристалізації металевого зливка, які задовольняють запропонованому критерію; розроблення математичних моделей процесів теплообміну з використанням мікрохолодильників та неоднорідного магнітного поля, які дозволяють розраховувати ці параметри.

Відповідно до мети були сформульовані такі завдання дослідження:

- провести критичний огляд існуючих методів та моделей безперервного розливу сталі;

- провести аналіз параметрів, які впливають на якість технології безперервної об'ємної кристалізації металевого зливка з використанням мікрохолодильників та неоднорідного магнітного поля;

- запропонувати оптимальні параметри технології об'ємної кристалізації безперервного зливка;

- розробити фізичну модель процесів, що протікають при об'ємній кристалізації;

- розробити математичну модель кристалізації безперервного зливка з використанням неоднорідного магнітного поля;

- на основі розроблених моделей та на базі обчислювального експерименту дослідити вплив термодинамічних, теплофізичних, технологічних, геометричних параметрів процесів, що виникають при кристалізації зливка на швидкість його витягування з кристалізатора.

Об'єкт дослідження — процес одержання заготовок безперервного лиття з рівномірним розподілом температур по перерізу зливка.

Предмет дослідження — теплофізичні процеси, які супроводжують перехід рідкого металу в твердий стан.

Методи дослідження — Для вивчення впливу термодинамічних, теплофізичних, технологічних, геометричних параметрів та градієнта неоднорідного магнітного поля було застосовано фізичне і математичне моделювання, що ґрунтується на законах збереження та тепло-, масообміну. Дослідження та обробка даних проводилася з використанням ПЕОМ.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вдосконалені фізичні та математичні моделі процесів тепло-, масообміну мікрохолодильників полідисперсного складу з розплавом, які

забезпечують об'ємну кристалізацію безперервного зливка, з використанням неоднорідного магнітного поля.

2. Визначено критеріями оптимальності швидкість витягування і температуру зливка на виході з кристалізатора, які повинні відповідати швидкості і температурі прокату металевих зливка.

3. Визначено основні параметри, які задовольняють встановленим критеріям:

розмір мікрохолодильника з урахуванням товщини наморозеної корки;

- ~ початкова температура мікрохолодильника;
- ~ час існування мікрохолодильника;
- ~ час, за який наморозена корка досягає максимуму;
- ~ витрата твердого та рідкого металу;
- ~ величина градієнта неоднорідного магнітного поля.

4. Вперше визначено вплив термодинамічних, теплофізичних, технологічних, геометричних параметрів та градієнта неоднорідного магнітного поля на швидкість кристалізації безперервнолитого зливка;

5. Вперше розроблено систему рівнянь, яка пов'язує швидкість кристалізації з технологічними, теплофізичними та геометричними параметрами.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій. Забезпечується використанням сучасних розрахункових засобів та методів, коректною постановкою мети дослідження. Розрахунковий аналіз виконувався на базі математичних моделей та програм розрахунку, які в достатньому обсязі враховують реальні фізичні особливості процесів, що досліджувалися. Достовірність виконаних розрахунків підтверджується малими значеннями розбіжностей між результатами розрахунку термодинамічних і геометричних параметрів, отриманих за допомогою адекватних математичних моделей.

Наукове значення роботи. Наукова цінність роботи полягає в розробці математичних моделей фізичних процесів, що протікають при безперервному розливі сталі на установках безперервного лиття.

Апробація впливу магнітного поля на мікрохолодильники, розроблені моделі, дослідження впливу вибраних параметрів на безперервний зливоч дозволяють:

1. Модель наморозування металу на мікрохолодильники, дозволяє розрахувати зростання товщини наморозеної корки з часом, час, при якому наморозена корка досягає максимального значення, час їх існування в розплаві безперервного зливка.

2. Математична модель руху мікрохолодильників в розплаві безперервного зливка в неоднорідному магнітному полі, дозволяє розрахувати час, необхідний для досягнення їх зони об'ємної кристалізації.

3. Математична модель розрахунку градієнта магнітного поля в зоні об'ємної кристалізації, дозволяє аналізувати вплив форми і розмірів наконечників електромагніту на величину градієнта.

4. Нова методика розрахунку технологічних параметрів, забезпечує створення умов для об'ємної кристалізації в безперервному зливку за наявності градієнта неоднорідного магнітного поля, що дає можливість розробки і створення принципово нових установок безперервного розливу сталі з об'ємною кристалізацією.

Запропонований спосіб об'ємної кристалізації безперервного зливка, дозволяє суттєво поліпшити якість одержуваної продукції, зменшити вагомо габаритні характеристики установки безперервного лиття, збільшити її продуктивність і забезпечити рівномірний розподіл заданної температури по перерізу зливка. А також дає можливість сумістити установку безперервного розливу з установкою безперервного прокату. Розроблена схема установки безперервного розливу сталі дозволяє суттєво понизити матеріальні і тимчасові витрати при виробництві металопродукату.

Практичне значення отриманих результатів. На розроблений спосіб безперервного розливу сталі з використанням мікрохолодильників і неоднорідного магнітного поля отримано патент України на корисну модель (№ 52321). Частина результатів дисертаційної роботи впроваджена у навчальному процесі Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова на кафедрі фізики в курсі "Загальної фізики" і «Моделювання робочих процесів в системах кондиціонування і рефрижерації».

Результати дисертаційного дослідження можуть бути використані при навчанні студентів технічних спеціальностей металургійного і машинобудівного профілю, а також комп'ютерних і інженерно-технологічних.

Постановка задачі, проведення чисельного експерименту і аналіз одержаних результатів дослідження проводилися під керівництвом професора Мочалова Олександра Олександровича.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи докладалися і обговорювалися на п'ятій міжнародній науково-практичній конференції «Розвиток наукових досліджень 2009» (листопад, 2009г.), науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, присвяченої 90-річчю Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова (лютий, 2010), «Макаровських читаннях» (травень, 2010г.), засіданні Міжвідомчій науково-технічній Раді України (квітень, 2010г.), міжнародній науково-технічній конференції «Перспективні матеріали, покриття та технології. Граничний стан елементів конструкцій». (25-28 серпня 2010 р., м. Севастополь), Всеукраїнській науково-технічній конференції «Теоретичні проблеми прикладні аспекти сучасної технічної фізики» (23-25 вересня 2010 р., м. Миколаїв).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 5 статей у фахових виданнях, 3 тези доповідей, отримано патент України на корисну модель.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел, який налічує 105 позиції. Робота викладена на 137 сторінках машинописного тексту, містить 3 таблиці і 51 ілюстрацію.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми, наукова новизна та цінність роботи, сформульована мета дисертації.

У першому розділі виконано аналіз опублікованих робіт, який дозволяє з існуючих теорій формування рівновісних кристалів виділити п'ять основних. Перша теорія стверджує, що рівновісні кристали починають зароджуватись в розплаві поперед зростаючої поверхнею розділу рідкої та твердої фаз.

Згідно другої теорії, центральна рівновісна зона формується за допомогою вільних різко охолоджених кристалів. Ці кристали можуть зароджуватися в переохолодженій області, яка існує в розплаві на стінці форми під час заливки металу.

Відповідно до третьої теорії рівновісні кристали створюються з частково переплавлених дендритів при пульсації температури розплаву під час зросту стовпчастої зони.

По четвертій теорії зародки рівновісних кристалів формуються на вільній поверхні зливка і виявляються в рідині попереду стовпчастої зони, причому вони зростають у міру опускання (осадження) в рідині.

Згідно п'ятої теорії кристали зароджуються на стінці форми або на охолодженій поверхні розплаву і зростають з утворенням шийок. Потім ці шийкоподібні кристали відокремлюються від місця зародження до того, як встигне формуватися тверда оболонка, остаточно осідають і накопичуються з утворенням рівновісної структурної зони.

При безперервному розливі сталі в закристалізованих зливках розрізняють три зони кристалізації: коркова, яка являє собою дрібно-дендритну структуру у поверхні зливка, зона великих орієнтованих дендритів і центральна зона з хаотично орієнтованими рівновісними дендритами та глобулярними дендритами. Технологічні фактори безперервного розливу здійснюють суттєвий вплив на перерозподіл структурних зон зливка, при цьому можуть утворюватися структурні зони зі змішаною будовою, можуть бути відсутніми одна або декілька з вказаних типових структурних зон. Безперервно литті заготовки звично мають більш дисперсійно-дендритну будову в усіх структурних зонах.

На структуру безперервнолитих зливоків суттєвий вплив здійснюють геометричні розміри зливка, хімічний склад сталі, температура металу, швидкість розливу, інтенсивність теплопроводу.

Аналізуючи опубліковані роботи можна зробити висновок, що інтенсифікація відведення тепла від металу в рідкій лунці безперервного зливка, згідно існуючих теорій, можлива тільки за рахунок інтенсивного відведення тепла від поверхні безперервного зливка. Однак, пониження температури поверхні зливка призводить до термічного розтріскування поверхні металу, погіршуючи якість зливка.

Розв'язати цю проблему можливо лише за рахунок організації об'ємної кристалізації в рідкій лунці безперервного зливка, при цьому відводити теплоту фазового переходу необхідно зсередини рідкої лунки. Цього

можливо досягти за рахунок застосування нової технологічної схеми відведення тепла від рідкого металу з використанням мікрохолодильників і неоднорідного магнітного поля в зоні об'ємної кристалізації. Такий спосіб кристалізації безперервного зливка, розроблений на кафедрі фізики НУК, дозволяє уникнути тих недоліків, які властиві традиційному способу отримання безперервного зливка. А також дає можливість збільшити швидкість самого процесу кристалізації і швидкість розливу металу, зменшити ваговогабаритні характеристики машини безперервного лиття заготовок, поліпшити якість зливка, відпадає необхідність зони вторинного охолодження через відсутність рідкої лунки. Збільшення швидкості розливу дозволить сполучити процес безперервного розливу з процесом безперервного прокату.

У другому розділі описаний новий спосіб безперервного розливу сталі, який дозволяє поліпшити якість отриманого зливка, прискорити процес кристалізації, а також поєднати установки безперервного розливу і безперервного прокату сталі. На цей спосіб отримано патент України на корисну модель.

Щоб поліпшити якість зливка за рахунок його об'ємної однорідності, а також розробити і визначити технологічні параметри інтенсифікації процесу кристалізації безперервного зливка, необхідно в рідкий метал, що знаходиться в кристалізаторі, вводити частинки твердого металу з температурою нижче за точку Кюрі для цього сплаву і створити уздовж осі кристалізатора градієнт магнітного поля. В результаті цього на тверді частинки металу з боку неоднорідного магнітного поля діятиме сила, яка надасть їм прискорення на декілька порядків більше прискорення вільного падіння, отже, зменшить час перебування часток в розплаві, їх прогрівання і вірогідність повного розплавлення і створює передумови для об'ємної кристалізації зливка.

На установці безперервного розливу сталі (рис. 1) у водоохолоджуваній кристалізатор 1 з розливного ковша 5 заливають рідкий метал 6, створюють за допомогою електромагніту 2 неоднорідне магнітне поле з певним градієнтом, в кристалізатор 1 одночасно поступає рідкий метал 6 і тверді частинки цього ж металу в кількості, відповідній коефіцієнту компактності упаковки твердих часток, висоту рівня рідкого металу в кристалізаторі 1 підтримують постійною. У зоні об'ємної кристалізації 8 кристалізується зливкок, готовий до подальшого

Рис. 1. Схема установки безперервного розливу сталі, що забезпечує об'ємну кристалізацію і розподіл температури металу по перерізу зливка на виході з кристалізатора, де 1 - кристалізатор, 2 - електромагнітна котушка, 3 - бункер-накопичувач, 4 - тверді частинки металу, 5 - розливний ківш, 6 - рідкий метал, 7 - вода, що охолоджує, 8 - зона об'ємної кристалізації, А - поперечний розмір зливка.

прокату.

Також досліджена взаємодія мікрохолодильників з рідким металом для забезпечення об'ємної кристалізації на установках безперервного розливу сталі.

Знаючи закон розподілу часток по розмірах на вході в розплав, в початковий момент часу $t = 0$, то через час t , закон розподілу часток по розмірах зміниться за рахунок наморозування металу на мікрохолодильник, зміниться він і з іншої причини, частина часток малого розміру розплавиться, зняв при температуру перегріву рідкого металу (зона зняття перегріву).

Після зони зняття температури перегріву (рис.2) йде ізотермічна зона. Тут на ці частки наморозуватиметься тверда корка, при цьому розподіл часток по результатах змінюватиметься у бік збільшення розмірів (рис. 3).

Рис. 2. Схема технологічних зон в кристалізаторі безперервного розливу.

Далі розташовується зона об'ємної кристалізації, де частки будуть нерухомі, оскільки вони досягнуть зони повністю затверділого металу, і будуть закристалізовувати рідкий метал, що знаходиться між ними, за рахунок своєї теплоємності.

Рис. 3. Закон розподілу часток по розмірах в зоні зняття перегріву 1 (частки, розмір яких лежить в діапазоні $(0 - R_k)$, розплавляються), що вийшли із зони перегріву 2, поступили в зону об'ємної кристалізації 3 з урахуванням наморозеної корки.

Знаючи час існування часток, відповідного радіусу, можна вичислити на якій глибині рідкого металу, залитого в кристалізатор, буде знята температура перегріву, а також висоту рідкої лунки, за допомогою створеної математичної моделі кристалізації безперервного зливка з використанням неоднорідного магнітного поля на основі теплового балансу.

для рідкої фази: ,

для твердої фази: .

де c_1, c_2 - питомі теплоємності відповідно рідкого і твердого металів; M_1, M_2 - маса рідкого, твердого металу; - температура рідкого, твердого металу на вході в зону зняття теплоти перегріву; - температура рідкого, твердого металу на виході із зони зняття теплоти перегріву; - витрата рідкого металу на вході і виході із зони зняття теплоти перегріву; - витрата твердого металу на вході і виході із зони зняття теплоти перегріву; k - коефіцієнт теплопередачі; S - поверхня кристалізатора.

Аналогічним чином можна скласти математичні моделі ізотермічної зони і зони кристалізації. При цьому враховуючи, що вхідні величини дорівнюють вихідним величинам попередньої зони.

Для ізотермічної зони

для рідкої фази:

для твердої фази:

де - температура рідкого металу на виході з ізотермічної зони; - витрата рідкого металу на виході з ізотермічної зони; - витрата твердого металу на виході з ізотермічної зони;

У зону об'ємної кристалізації поступатиме рідкий метал з температурою $T_{кр}$, а , .

для рідкої фази:

для твердої фази:

де - температура твердого металу на виході із зони об'ємної кристалізації.

При цьому мікрохолодильники, що поступають в розплав полідисперсні, результуюча маса металу, що закристалізовувався, в цьому об'ємі розраховується для сукупності мікрочастинок певного розміру, фізичні властивості (теплоємність, густина, теплопровідність) частинок і рідкого металу постійні, розглядаємо дію неоднородного магнітного поля на кожен мікрочастинку з урахуванням їх розміру.

За допомогою цієї математичної моделі розраховали середньоінтегральну температуру металу, що закристалізовувався, на виході з кристалізатора (рис.4).

З графіку видно, що середньоінтегральна температура зливка на виході з кристалізатора наближається до значення температури кристалізації при середньоінтегральній температурі частинок і . Отже, такий отриманий зливки відразу можна використовувати для прокату і установку безперервного розливу сталі поєднати з установкою безперервного проката.

Рис. 4. Графік зміни середньоінтегральної температури зливка, що закристалізовувався, з часом при наступних параметрах для сталі: $R_0 = 0,5\text{мм}$, $c_1=448\text{Дж/кг}\cdot\text{K}$, $q_{кр}=2,72\cdot 10^5\text{Дж/кг}$, $c_2=747\text{Дж/кг}\cdot\text{K}$.

При значеннях середньоінтегральної температури частинок і за час існування мікрохолодильників повністю не закристалізовується. Отже, для цих значень температур необхідно брати частинки більшого розміру.

Розраховали значення середньоінтегральної температури (рис. 5), яку повинні мати полідисперсні частинки, при відомому співвідношенні витрат рідкого і твердого металів .

З графіку видно, що середньоінтегральна температура твердих частинок в зоні зняття перегріву залежить від початкової температури мікрохолодильників і зменшується із збільшенням відносної витрати металу.

Розраховали як впливає на швидкість співвідношення витрат металу в рідкій і твердій фазах (рис. 6).

Рис. 5. Графік залежності середньоінтегральної температури усіх твердих частинок на виході із зони зняття перегріву від відносної витрати рідкого і твердого металів при наступних параметрах для сталі: $q_{кр}=2,72\cdot 10^5\text{Дж/кг}$, $c_1=448\text{Дж/кг}\cdot\text{K}$, $c_2=747\text{Дж/кг}\cdot\text{K}$, $T_{кр}=1773\text{ K}$, $T_1=1793$

K, для різних значень початкової температури твердих частинок, що вводяться.

Рис. 6. Графік залежності швидкості витягування зливка від товщини зливка, при наступних параметрах для сталі: $R_0=0,5$ мм, $c_1=448$ Дж/кг·К, $c_{кр}=2,72 \cdot 10^5$ Дж/кг, $c_2=747$ Дж/кг·К, $T_{кр}=1773$ К, $T_1=1793$ К, $T_2=300,44$ К, $dB/dz=17$ Тл/м і ширині зливка $B=1$ м для різних відносних витрат металу.

З графіку видно, що швидкість витягування зливка збільшується із збільшенням відносної витрати металу і зменшується із збільшенням розміру отриманого зливка.

А також розраховали залежність відносної витрати металу, що поступає в кристалізатор від середньоінтегральної температури твердих часток при різних температурах перегріву (рис. 7).

З графіка видно, що із зростанням середньоінтегральної температури частинок і температури перегріву рідкого металу збільшується відносна витрата металу.

Рис. 7. Графік залежності відносної витрати металу що поступає в кристалізатор від середньоінтегральної температури твердих частинок, при наступних параметрах для сталі:

$c_{кр}=2,72 \cdot 10^5$ Дж/кг, $c_1=448$ Дж/кг·К, $c_2=747$ Дж/кг·К, $T_{кр}=1773$ К, $T_1=1793$ К, $T_2=300,44$ К для різних температур перегріву рідкого металу.

Отримані результати в цьому розділі дають можливість аналізувати вплив геометричних, технологічних і термодинамічних параметрів, які описують процеси, що протікають при об'ємній кристалізації.

Рис. 8. Схема виділеного елементу Δx для розрахунку наморожування металу на безперервний зливоч.

У третьому розділі розглянуті процеси, які протікають при безперервному розливі сталі на установках вертикального та радіального типу, неоліки пов'язані з отриманням великого зливка. Розглянутий каскадний метод отримання безперервного зливка. Для опису процесів, що протікають в кристалізаторі такого типу, створена математична модель наморожування металу на зливоч, що закристалізовувався. Розглядали випадок кристалізації, при якому безперервний зливоч, що має розміри $A \times B$, безперервно подається з постійною швидкістю (в розплавлений метал того ж складу). Вважаємо, що в початковий момент часу відомий розподіл температури усередині зливка, відома температура рідкого металу і його фізичні властивості. Схема виділеного елементу представлена на рис. 8.

де m'_1 - витрата металу, затверділого в оболонці зливка на вході; m''_1 - витрата металу, затверділого в оболонці зливка на виході; c_1 - питома

теплоємність на поверхні зливка; $T'1$, $T''2$ - середньоінтегральні температури на вході і виході із затверділої оболонки зливка; $F1$ - зовнішня поверхня зливка; $T_{кр}$ - температура кристалізації; $\lambda1$ – коефіцієнт теплопровідності рідкого металу в граничному шарі; $\delta1$ – наведена товщина зливка; δ – товщина затверділої корки.

Результати розрахунку за викладеною методикою приведені на рис. 9 і можуть бути використані для розрахунку багат шарового безперервного зливка.

Для створення безперервного зливка з рівномірним розподілом температури і структури по його перерізу, потрібне створення умов для організації об'ємної кристалізації зливка. Для цього нам необхідно знати тривалість існування мікрохолодильників різних розмірів, необхідно знати час, за який на них наморозується максимальна величина корки залежно від фізичних властивостей

Рис. 9. Зміна з часом температури центру зливка і товщини наморозеної корки металу на поверхню безперервного зливка $A \times B = 0,2 \times 0,3$ м, швидкість подачі металу в розплав $v = 0,01$ м/с, $T_{ж} = 1560^{\circ}\text{C}$, $T_L = 1535^{\circ}\text{C}$. 1 - $T_c = 12000^{\circ}\text{C}$, 2 - $T_c = 13000^{\circ}\text{C}$, 3 - $T_c = 14000^{\circ}\text{C}$, 4 - $T_c = 15000^{\circ}\text{C}$.

металу і температури розливу. Для чого була створена математична модель фізичних процесів при наморозуванні металу на мікрохолодильник на базі законів збереження енергії і маси термодинамічної системи

де c - питома теплоємність твердого металу; m - маса металу;

- зміна середньоінтегральної температури мікрохолодильника з часом;
 - середньоінтегральна температура мікрохолодильника за об'ємом; dm/dt - кількість металу, що наморозується на частинку в одиницю часу; S - поверхня розділу рідкої і твердої фази металу; λ - коефіцієнт теплопровідності металу мікрохолодильника.

Це диференціальне рівняння дозволяє аналізувати вплив зовнішніх параметрів на товщину наморозуваної корки ΔR на мікрохолодильник і тривалість існування самого мікрохолодильника $t_{сущ}$ в рідкому металі, час, за який товщина наморозеної корки буде максимальною t_{max} . Останній параметр чинить істотний вплив на швидкість витягування зливка, а отже, і на увесь процес об'ємної кристалізації зливка.

За допомогою чисельного експерименту проведені дослідження впливу термодинамічних і геометричних параметрів на важливі параметри технологічного процесу, що забезпечує об'ємну кристалізацію безперервного зливка. Результати цього дослідження представлені на мал. 10 - 13.

Рис. 10. Графік залежності зміни радіусу мікрохолодильника з урахуванням наморозуваної корки з часом для різних початкових радіусів

мікрохолодильника (1 - $R_0=0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, 2 - $R_0=1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, 3 - $R_0=1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, 4 - $R_0=2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$) при $T_0=300 \text{ К}$, $\Delta T=60 \text{ К}$, $\lambda=71 \text{ Дж/м} \cdot \text{К} \cdot \text{с}$.

Рис. 11. Графік залежності зміни радіусу мікрохолодильника з урахуванням наморозуваної корки з часом для різних значень початкової температури мікрохолодильника : 1 - $T_0=233 \text{ К}$, 2- $T_0=253 \text{ К}$, 3- $T_0=273 \text{ К}$, 4- $T_0=293 \text{ К}$, при $R_0=0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $\Delta T=60 \text{ К}$, $\lambda=71 \text{ Дж/м} \cdot \text{К} \cdot \text{с}$.

Рис. 12. Графік залежності зміни радіусу мікрохолодильника з урахуванням наморозуваної корки з часом для різних температур перегру рідкого металу : 1- $\Delta T=10 \text{ К}$, 2 - $\Delta T=20 \text{ К}$, 3- $\Delta T=40 \text{ К}$, 4- $\Delta T=100 \text{ К}$, при $R_0 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $T_0 = 300 \text{ К}$, $\lambda = 71 \text{ Дж/м} \cdot \text{К} \cdot \text{с}$.

Рис. 13. Графік залежності зміни радіусу мікрохолодильника з урахуванням наморозуваної корки з часом для різних коефіцієнтів теплопровідності металу мікрохолодильника : 1 - $\lambda=51 \text{ Дж/м} \cdot \text{К} \cdot \text{с}$ (ряд нікелевих), 2 - $\lambda=61 \text{ Дж/м} \cdot \text{К} \cdot \text{с}$ (ряд літєвих), 3 - $\lambda=71 \text{ Дж/м} \cdot \text{К} \cdot \text{с}$ (залізо), 4 - $\lambda=91 \text{ Дж/м} \cdot \text{К} \cdot \text{с}$ (ряд натрієвих), при $R_0 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $T_0 = 300 \text{ К}$, $\Delta T = 60 \text{ К}$.

Розрахована зміна середньоінтегральної температури мікрохолодильника. Результат представлений на рис. 14.

З рис. 14 видно, що середньоінтергальна температура мікрохолодильника зростає до температури кристалізації металу і стає постійною.

Рис. 14 Графік залежності середньоінтегральної температури мікрохолодильника від часу при $R_0 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $T_0 = 300 \text{ К}$, $\Delta T = 20 \text{ К}$, $\lambda = 71 \text{ Дж/м} \cdot \text{К} \cdot \text{с}$.

За даними проведеного дослідження прийдемо до висновку, що важливий параметр (час, за який товщина наморозуваної корки стає максимальною), що відповідає за швидкість витягування зливка і об'ємну кристалізацію слабо залежить від початкової температури мікрохолодильників, що вводяться, істотно збільшується при збільшенні початкового радіусу мікрохолодильників, зменшується при збільшенні коефіцієнта теплопровідності металу мікрохолодильника і при збільшенні температури перегріву рідкого металу. Отже, залежно від тих вимог, які пред'являються до якості безперервного зливка в процесі кристалізації металів за допомогою мікрохолодильників необхідно підбирати розміри мікрохолодильників, температуру перегріву рідкого металу, час існування самого мікрохолодильника в рідкому металі, а також час, за який товщина наморозеної корки досягає максимального значення.

Для перевірки адекватності описаної моделі наморозування металу на мікрохолодильник розроблена модель наморозування металу на мікрохолодильник на базі методу глибини проникнення ізотерм

де M_1 - маса металу, температура якої встановилася $T_{кр}$; c - питома теплоємність твердого металу; T - середня температура металу частинки; - кількість тепла, що підводиться від рідкого металу до поверхні частки в одиницю часу; q - теплота фазового переходу; dm/dt - кількість металу, що наморозується на частинку в одиницю часу.

Це диференціальне рівняння вирішувалося тим же способом за тих же умов, що і попередня модель. Розраховували залежність основних технологічних параметрів, використовуваних при створенні математичної моделі об'ємної кристалізації безперервного зливка, від геометричного і термодинамічних параметрів.

Порівняємо результати отримані при дослідженні моделей, що розробляються. Для цього поєднаємо графіки залежності радіусу мікрохолодильника від часу для двох моделей (рис. 15).

Рис. 15. Графік наморозування металу на мікрохолодильник для двох математичних моделей: 1 - Математична модель фізичних процесів, що протікають при наморозуванні металу на мікрохолодильник; 2 - Математична модель наморозування металу на мікрохолодильник на базі методу глибини проникнення ізотерм.

З них виходить, що для однакових початкових радіусів мікрохолодильників $R_0=5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ значення досліджуваних параметрів в математичній моделі наморозування металу на мікрохолодильник на базі методу глибини проникнення ізотерм відносно значень цих параметрів в математичній моделі фізичних процесів кристалізації зливків за наявності мікрохолодильників більше на долі відсотків. Це нам дає можливість сказати про те, що ці моделі ідентичні. Але математична модель фізичних процесів кристалізації за наявності мікрохолодильників більше розширена, оскільки дає можливість аналізувати вплив більшої кількості теплофізичних параметрів рідкого металу і мікрохолодильників.

У четвертому розділі розглянуті питання взаємодії магнітного поля з магнетиками, вплив неоднорідного магнітного поля на розподіл феромагнітних частинок в кристалізаторі.

Була створена методика дослідження швидкості руху феромагнітної частинки в розплаві за наявності неоднорідного магнітного поля, оскільки швидкість руху феромагнітної частинки (мікрохолодильника) в неоднорідному магнітному полі кристалізатора і шлях пройдений частинкою в розплаві є важливими параметрами для технологічного процесу, що забезпечує об'ємну кристалізацію безперервного зливка.

Для дослідження руху феромагнітних частинок в неоднорідному магнітному полі необхідно знати величину магнітного поля, значення градієнта магнітного поля у відповідних точках простору конфігурацію

неоднорідного магнітного поля між полюсами електромагніту. Тому була описана методика розрахунку магнітної індукції поля і градієнта магнітного поля, створеного кільцевим електромагнітом (рис. 16) в зоні кристалізації, згідно якої градієнт магнітного поля у відповідній точці простору розраховується за формулою

Рис. 16. Схема розрахунку неоднорідного магнітного поля в зоні кристалізатора, створеного кільцевим електромагнітом, : 1 - кристалізатор, 2 - поперечний розмір кристалізатора на виході, 3 - перпендикулярні перерізи електромагніту, 4 - сердечник кільцевого електромагніту.

де I - струм, що протікає через котушки соленоїдів, A ; N - сумарне число витків в котушках соленоїда; l_0 , l_p , l_i - довжина сердечника кільцевого магніту, що не включає довжину робочої ділянки; ділянки із змінним перерізом сердечника; робочої ділянки; ділянки із змінним перерізом соленоїда, м; l - довжина повітряного проміжку; μ_r - відносна магнітна проникність сердечника соленоїда, робочої ділянки; S , S_i - площа перерізу сердечника, елементу розбиття перерізу сердечника, m^2 ; μ_0 - магнітна постійна ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м); n - число розбиття перерізу соленоїда.

Градієнт магнітного поля є важливим технологічним параметром для створення установки безперервного розливу сталі.

Досліджені особливості розподілу феромагнітних часток в неоднорідному магнітному полі кристалізатора. Дослідження проводилося експериментальним шляхом введенням феромагнітних частинок в об'єм імітуючий розмір кристалізатора.

Для експерименту на моделі установки використовувалися порції мікрохолодильників вагою 60, 90, 150, 300 г, що вводяться в неоднорідне магнітне поле. Магнітне поле створювалося електромагнітом кільцевої форми постійного струму з величиною магнітної індукції $0,74 \cdot 10^{-2}$ Тл і $1,57 \cdot 10^{-2}$ Тл.

Результати кожного досліду фіксувалися у вертикальній і горизонтальній площинах. Наприклад, при вазі порції мікрохолодильників 300 г і магнітної індукції $1,57 \cdot 10^{-2}$ Тл розподіл частинок у вертикальній і горизонтальній площинах представлено на рис.17 і 18.

Встановили, що при введенні частинок мікрохолодильників в неоднорідне магнітне поле спостерігається процес їх групування в міжполюсному просторі електромагніту як вертикальною, так і в горизонтальній площинах. При збільшенні ваги порцій частинок

мікрохолодильників, що вводяться в поле магніту, збільшується товщина шару єдиної структури частинок (тобто товщина

Рис 18. Розподіл мікрохолодильників в горизонтальній площині. При величині магнітної індукції $1,57 \cdot 10^{-2}$ Тл і вазі порції мікрохолодильників 300г.

Рис. 17. Розподіл мікрохолодильників у вертикальній площині. При величині магнітної індукції $1,57 \cdot 10^{-2}$ Тл і вазі порції мікрохолодильників 300г.

зливка) у вертикальній площині. У горизонтальній площині відбувається також збільшення ширини зливка при збільшенні насиченості зливка частками. При збільшенні величини магнітної індукції електромагніту відбувається істотне збільшення товщини зливка у вертикальній площині при збільшенні його насиченості в горизонтальній площині. Тобто, при збільшенні ваги порцій частинок мікрохолодильників і величини магнітного поля відбувається явно виражене збільшення товщини і насиченості формованого зливка мікрохолодильниками.

ВИСНОВКИ

1. Визначено критеріями оптимальності швидкість витягування і температуру зливка на виході з кристалізатора, які повинні відповідати швидкості і температурі прокату металевих зливка.

2. Визначено основні параметри, які задовольняють встановленим критеріям (для швидкості прокату 6 м/с з температурою зливка на виході з кристалізатора 1253 К):

- ~ розмір мікрохолодильника з урахуванням товщини намороженої корки (початковий 0,5, з коркою 0,85 мм);
- ~ початкова температура мікрохолодильника (233 K);
- ~ час існування мікрохолодильника ($0,25 \cdot 10^{-3}$ с);
- ~ час, за який наморожена корка досягає максимуму ($0,5 \cdot 10^{-3}$ с);
- ~ витрата рідкого та твердого металу ($1 \div 3$);
- ~ величина градієнта неоднорідного магнітного поля (17 Тл/м).

Для заданих технологічних параметрів об'ємної кристалізації внутрішні геометричні розміри кристалізатора становлять:

- ~ висота рідкої лунки (підтримується постійною) — 0,17 м;
- ~ ширина кристалізатора (та зливка) — 1 м;
- ~ товщина кристалізатора (та зливка) — 0,2 м.

3. Розроблена методика розрахунку параметрів, що забезпечують створення умов для об'ємної кристалізації безперервного зливка, яка дозволяє досліджувати вплив дисперсного складу мікрохолодильників, градієнта неоднорідного магнітного поля і співвідношення витрат рідкого металу m_1 і твердого металу (частинок) m_2 на швидкість витягування зливка.

4. В результаті чисельного експерименту з використанням пропонованої методики розрахунку параметрів, що забезпечують об'ємну кристалізацію в безперервному зливку, рідкий метал в кристалізаторі можна розділити на зони: зону зняття теплоти перегріву, зону ізотермічного наморожування металу на мікрохолодильники і зону об'ємної кристалізації металу, в якій безперервний зливкок кристалізується по усьому перерізу.

5. Дисперсний склад мікрохолодильників істотно впливає на протяжність зони зняття теплоти перегріву, ізотермічну зону і зону об'ємної кристалізації зливка.

6. Встановлено, що в процесі руху мікрохолодильників в рідкому металі дисперсний склад змінюється з часом із-за плавких дрібних частинок, що знімають теплоту перегріву в зоні зняття теплоти перегріву і із-за наморожування металу на уцілілі мікрохолодильники в зоні ізотермічної ділянки з температурою кристалізації $T_{кр}$, в зону об'ємної кристалізації поступають мікрохолодильники з дисперсним складом зміщеним у бік великих розмірів мікрохолодильників.

7. На базі модельних даних розроблений схема установки безперервного розливу сталі з об'ємною кристалізацією, який дозволяє істотно понизити матеріальні і тимчасові витрати при виробництві металопрокату, що особливо важливо в умовах підвищення цін на енергоносії.

8. Розроблена математична модель наморожування металу на зливкок, що закристалізовувався, який використовується для забезпечення кристалізації рідкого металу в центральній частині розливу безперервного зливка в кристалізаторі великого розміру, яка дозволяє досліджувати вплив геометричних розмірів відлитого зливка і зливка, що вводиться в кристалізатор, на збільшення швидкості розливу металу, зменшення

ваговогабаритних характеристик машини безперервного розливу, а також час кристалізації і глибину рідкої лунки.

9. Розроблені математичні моделі:

— модель наморозування металу на мікрохолодильники, які дозволяють розрахувати час наморозування максимальної корки $t_{\max}$, час існування мікрохолодильників $t_{\text{суц}}$, т. б. технологічні параметри забезпечують об'ємну кристалізацію зливка;

— модель руху мікрохолодильників в рідкому металі, яка дозволяє розрахувати шлях, прохідний мікрохолодильниками за час $t_{\max}$ і $t_{\text{суц}}$, що дає можливість розрахувати протяжність відповідних зон: зони зняття перегріву, ізотермічної зони з температурою кристалізації $T_{\text{кр}}$ і зони об'ємної кристалізації, т. б. технологічні параметри зон в кристалізаторі, витягування зливка, що впливають на швидкість.

10. Розроблені математичні моделі складають систему рівнянь, які зв'язують швидкість кристалізації з теплофізичними, технологічними та геометричними параметрами.

11. В результаті чисельного експерименту встановлено, що неоднорідне магнітне поле і його градієнт, температура перегріву $\Delta T_{\text{пер}}$, а також розміри мікрохолодильників істотно впливають на швидкість витягування зливка і на конструктивні особливості установки безперервного розливу сталі.

12. Встановлено, що залежно від розмірів часток і величини градієнта магнітного поля швидкість витягування зливка можна збільшити в сотні раз. Це дозволить поєднати безперервне розлив з безперервним прокатом металу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА

1. Мочалов А.А., Гайша А.А., Шаповал Н.А. Математическая модель физических процессов кристаллизации слитков и сварных швов при наличии микрохолодильников / А.А. Мочалов, А.А. Гайша, Н.А. Шаповал // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв: НУК. — 2008. — № 6 (423). — С. 76 — 80. Здобувачем проведено теоретичні дослідження з досягнення максимальної швидкості витягування зливка та отримання зварного шва, розраховано час існування частинки в розплаві.

2. Мочалов А.А., Шаповал Н.А. Математическая модель намораживания металла на микрохолодильник / А.А. Мочалов, Н.А. Шаповал // Математичне моделювання. — Днепродзержинськ: ДДТУ, 2009. — № 1 (20). — С. 78 — 80. Здобувачем проведено чисельний експеримент та розраховано радіус, намороженої скоринки на частинку, час існування частинки в розплаві та час, при якому товщина скорини була максимальна.

3. Мочалов А.А., Евфимко К.Д., Шаповал Н.А. Интенсификация процесса кристаллизации непрерывного слитка / А.А. Мочалов, К.Д. Евфимко, Н.А. Шаповал // Процессы лития. — К.: ФТИИС, 2009. — № 6. — С. 50 — 53. Здобувачем проведено теоретичні дослідження з покращення

якості безперервно литого зливка, та розраховані важливі технологічні параметри, що забезпечують об'ємну кристалізацію.

4. Мочалов А.А., Евфимко К.Д., Шаповал Н.А. Математическая модель намораживания металла на закристаллизовавшийся слиток / А.А. Мочалов, К.Д. Евфимко, Н.А. Шаповал // Процессы литья. — К.: ФТИИС, 2010. — № 3. — С. 24 — 29. Здобувачем проведено чисельний експеримент та розраховано вплив температури центра зливка і товщини намороженої скоринки на поверхню безперервно литого зливка.

5. Анализ современных теорий, описывающих процессы кристаллизации при непрерывной разливки стали [Електронний ресурс] / Мочалов А.А., Шаповал Н.А. // Вісник Національного університету кораблебудування — Миколаїв: НУК, 2010. — № 2. — С. 162 — 167. — Режим доступу до журн.:

<http://ev.nuos.edu.ua/ua/publication?publicationId=7302>

Здобувачем проведено теоретичний аналіз джерел з питання лиття безперервного зливка.

6. Пат. 52321 Україна. Спосіб отримання безперервного злитка / Мочалов О.О, Шаповал Н.О.; заявники і патентовласники Мочалов О.О, Шаповал Н.О. — Заявка № u201001375 від 10.02.10; Опубл. 25.08.10. — Бюл.№ 16. Здобувачем розраховані важливі технологічні параметри, що забезпечують об'ємну кристалізацію.

7. Математическое моделирование процесса кристаллизации : матеріали п'ятої міжнародної науково-практичної конференції [«Розвиток наукових досліджень 2009»], (Полтава 23-25 листопада 2009 р.) — Полтава, 2010. — 162 с.

Здобувачем проведено теоретичний аналіз існуючих методів моделювання нестационарних теплофізичних процесів.

8. Пат. 52321 Україна. Спосіб отримання безперервного злитка / Мочалов О.О, Шаповал Н.О. — заявл. 10.02.10; опубл. 25.08.10, Бюл.№ 16. Здобувачем розраховані важливі технологічні параметри, що забезпечують об'ємну кристалізацію.

9. Исследование движения и распределения ферромагнитных частиц в расплаве под действием неоднородного магнитного поля : матеріали Всеукр. науково-технічної конференції [«Теоретичні проблеми та прикладні аспекти сучасної технічної фізики»], (Миколаїв, 23-25 вересня 2010 р.) / М-во освіти і науки України, НУК ім. адм. Макарова, Фізико-тех. ін-т металів і сплавів НА-НУ, 2010. — 40 с. Здобувачем проведено дослідження та розраховано швидкість руху частинки в розплаві та пройденого шляху в розплаві.

10. Способ получения непрерывного слитка : матеріали конференції [«Макаровські читання»], (Миколаїв, 27-28 травня 2010 р.) / М-во освіти і науки України, НУК ім. адм. Макарова, 2010. — 38 с. Здобувачем проведено теоретичні дослідження з покращення якості безперервно литого зливка.

АННОТАЦИЯ

Шаповал Н.А. Обоснование параметров непрерывной объемной кристаллизации слитков с использованием микрохолодильников на основе математического моделирования процессов теплообмена. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – техническая теплофизика и промышленная энергетика. – Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, 2012.

Объектом исследования в диссертации является непрерывный слиток, в котором созданы условия для объемной кристаллизации при наличии неоднородного магнитного поля; физические процессы, обеспечивающие объемную кристаллизацию непрерывного слитка.

Были разработаны математические модели: намораживания металла на микрохолодильники, которая позволит рассчитать рост толщины замороженной корочки со временем, время, при котором замороженная корочка достигает максимального значения, время существования их в расплаве непрерывного слитка; движения микрохолодильников в расплаве непрерывного слитка в не-однородном магнитном поле, позволяющая рассчитать время, необходимое для достижения их зоны объемной кристаллизации; расчета градиента магнитного поля в зоне объемной кристаллизации непрерывного слитка, позволяющая анализировать влияние формы и размеров наконечников электромагнита на величину градиента в зоне объемной кристаллизации. При моделировании учитывалось, что микрохолодильники, поступающие в расплав полидисперсные, результирующая масса закристаллизовавшегося металла в данном объеме рассчитывается для совокупности микрочастиц определенного размера, физические свойства (теплоемкость, плотность, теплопроводность) частиц и жидкого металла постоянные, рассматриваем действие неоднород. магнитного поля на каждую микрочастицу с учетом их размера.

Разработана методика расчета технологических параметров, обеспечивает создание условий для объемной кристаллизации в непрерывном слитке при наличии градиента неоднородного магнитного поля.

Разработанный прототип установки непрерывной разливки стали позволяет существенно снизить материальные и временные затраты при производстве металлопроката.

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы в металлургической промышленности при проектировании и эксплуатации установок непрерывной разливки металла для оптимизации их работы и повышения качества получаемой металлопродукции.

Ключевые слова: математическое моделирование, микрохолодильники, непрерывная разливка металлов, кристаллизатор, тепломассоперенос, объемная кристаллизация.

АНОТАЦІЯ

Шаповал Н.О. Обґрунтування параметрів безперервної об'ємної кристалізації зливоків з використанням мікрохолодильників на основі моделювання процесів теплообміну. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2012.

Об'єктом дослідження у дисертації є безперервний зливоч, в якому створені умови для об'ємної кристалізації за наявності неоднорідного магнітного поля; фізичні процеси, що забезпечують об'ємну кристалізацію безперервного зливка.

Були розроблені математичні моделі: руху мікрохолодильників в розплаві безперервного зливка в неоднорідному магнітному полі; розрахунку градієнта магнітного поля в зоні об'ємної кристалізації безперервного зливка. Запропонована методика розрахунку технологічних параметрів. При моделюванні враховувалось, що мікрохолодильники полідисперсні; результуюча маса металу, що закристалізовується в цьому об'ємі, розраховується для сукупності мікрочастинок певного розміру, фізичні властивості частинок і рідкого металу постійні, неоднорідне магнітне поле діє на кожную частинку з урахуванням її розміру.

Розроблений прототип установки безперервного розливу сталі дозволяє суттєво понизити матеріальні і тимчасові витрати при виробництві металопрокату.

Результати математичного моделювання можна безпосередньо використовувати в металургійній промисловості при проектуванні та експлуатації установок безперервного лиття металу для оптимізації їх роботи та підвищення якості отриманих безперервнолитих зливків.

Ключеві слова: математичне моделювання, безперервне лиття металів, мікрохолодильники, кристалізатор, тепломасопереніс, об'ємна кристалізація.

ANNOTATION

Shapoval N.A. The validation of the parameters of the continuous volumetric castings' crystallization using microrefrigerators on basis of the mathematical modeling of the heat-exchange process. – Manuscript.

Thesis for a degree of Master of Science by speciality 05.14.06 – technical thermophysics and industrial thermoenergetics. – The Institute of Technical Thermophysics of National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, 2012.

The object of investigation of dissertation is a continuous casting, where the condition for the volumetric crystallization using a nonhomogeneous magnetic field are created, the physical processes that provide the volumetric crystallization of the continuous casting.

The mathematical models of metal silvering on microrefrigerator, of microrefrigerator's motion in the melt of the continuous casting in a nonhomogeneous magnetic field, of the calculation of the magnetic field gradient in the zone of volumetric crystallization of the continuous casting were developed. The computational procedure of the process-dependent parameters was suggested. In modelling it was taken into account that the microrefrigerators are polydisperse, that the resultant mass of the metal that is crystallized at the given volume,

calculates for the collection of the micro particles that have a certain size, that the physical properties of the particles and the molten metal are constant, that the nonhomogeneous magnetic field influences every particle taking into account its size.

The developed prototype of the continuous-steel-casting machine allows considerably cut down material and time expenses for the manufacturing of the metal-roll.

The results of the mathematical modelling can be used in the metallurgy industry for the projection and operation of the continuous-metal-casting machines for the optimization of their operation and improving of the continuous castings.

Key words: mathematical modelling, microrefrigerators, continuous metal cast process crystallizer, heat-and-mass transfer, volumetric crystallization.