

ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

**УХІН ВОЛОДИМИР ЄВГЕНОВИЧ**

УДК 669.18-412

**ОБҐРУНТУВАННЯ І ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ  
ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ БЕЗПЕРЕРВНОГО РОЗЛИВАННЯ СТАЛІ НА  
ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ СОРТОВИХ МБЛЗ**

Спеціальність 05.16.02 – металургія чорних і кольорових металів та  
спеціальних сплавів

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Донецьк-2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному вищому навчальному закладі «Донецький національний технічний університет» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

**Науковий керівник**

доктор технічних наук, професор  
СМІРНОВ Олексій Миколайович,  
Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет» (м. Донецьк),  
завідувач кафедри «Металургія сталі».

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
КРАВЦОВ Владлен Васильович,  
Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет» (м. Донецьк),  
завідувач кафедри «Технічна теплофізика»;

кандидат технічних наук, доцент  
КУБЕРСЬКИЙ Сергій Володимирович,  
Донбаський державний технічний університет  
(м. Алчевськ), завідувач кафедри «Металургія чорних металів».

Захист відбудеться “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2011 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 11.052.01 Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, I навчальний корпус, малий актовий зал.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, II навчальний корпус.

Автореферат розісланий “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2011 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
Д 11.052.01, д.т.н., проф.



О.В. Яковченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Найважливішими питаннями виробництва безперервнолитої заготовки в сучасних умовах є підвищення її якості, зниження енергоємності виробництва та собівартості готової продукції. Основною тенденцією розвитку техніки та технології безперервного розливання сортової заготовки є прагнення підвищити продуктивність існуючих машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) за рахунок збільшення швидкості розливання сталі за умови забезпечення високих кондицій твердого зливка. Дослідження, спрямовані на обґрунтування і вдосконалення технологічних параметрів процесу безперервного розливання сталі, які впливають на стабільність лиття, якість заготовки і продуктивність високопродуктивної сортової МБЛЗ, заслуговують на особливу увагу і мають велику наукову та практичну значущість.

Розв'язання завдань, пов'язаних із поліпшенням якості поверхневих і підповерхневих шарів заготовки і зменшенням її собівартості, можливо здійснити за рахунок докладного вивчення процесів, що супроводжують твердіння сталі в кристалізаторі МБЛЗ, та їх впливу на якість зливка і продуктивність машини в цілому. Особливу значущість такі процеси здобувають при одержанні сортової заготовки з високими швидкостями лиття, коли час перебування металу в гільзі кристалізатора знижується, а також зменшується товщина й міцність твердої кірки, що може призвести до формування дефектів форми зливка та утворення поверхневих і підповерхневих тріщин. У зв'язку із цим, розв'язання важливого науково-технічного завдання з обґрунтування і удосконалення технологічних параметрів безперервного розливання сталі дозволить поліпшити якісні показники експлуатації високопродуктивних сортових МБЛЗ та стане основою для розробки ефективних конкурентоспроможних вітчизняних агрегатів для виробництва безперервнолитої заготовки. Виконані в дисертації дослідження спрямовані на розв'язання поставленого завдання, що свідчить про актуальність теми.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Питання, розглянуті в дисертаційній роботі, відповідають Програмі науково-технічного розвитку Донецької області на період до 2020 року (постанова обласної Ради від 22.03.2002 р., номер 3/25-656) і Державній програмі енергозбереження. Виконання дисертації пов'язане з планами науково-дослідних робіт Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет». Основу дисертації становлять результати науково-дослідних робіт, виконаних за участю автора як виконавця в 2010 р. («Розвиток наукових основ діагностики формування макро- і мікродефектів безперервнолитої заготовки з метою підвищення її конкурентоспроможності» № державної реєстрації ДР 0110U002646).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є теоретичне й експериментальне обґрунтування технологічних параметрів безперервного розливання сталі на високопродуктивних сортових МБЛЗ, яке дозволить запобігти утворенню поверхневих і підповерхневих тріщин та дефектів форми заготовки за рахунок поліпшення контакту твердої оболонки зливка з гільзою кристалізатора та зменшити кількість проривів металу під кристалізатором, що пов'язані з явищем тріщиноутворення.

Для досягнення зазначеної мети в роботі були поставлені такі основні завдання:

- вивчити вплив інтенсивності теплопереносу на процеси формування твердої кірки в кристалізаторі;
- вивчити особливості впливу механічної деформації твердої кірки в кристалізаторі високопродуктивної сортової МБЛЗ на формування макродефектів у сортовій заготовці;
- дослідити причини утворення поверхневих тріщин у сортових заготовках, які мають дефекти, і запропонувати раціональні діапазони параметрів лиття стосовно конкретних умов;
- розробити рекомендації, спрямовані на вдосконалення технологічних параметрів розливання сталі на високопродуктивній сортовій МБЛЗ з метою підвищення її продуктивності, поліпшення якості заготовки та зменшення кількості проривів металу під кристалізатором.

*Об'єкт дослідження.* Процеси твердіння і формоутворення заготовки в кристалізаторі високопродуктивної сортової МБЛЗ та їх вплив на якість зливка і стабільність розливання.

*Предмет дослідження.* Процеси формування кристалічної структури сортової заготовки, взаємодії кірки, що твердне, з гільзою кристалізатора та їх вплив на утворення поверхневих, підповерхневих дефектів і дефектів форми безперервнолитого зливка.

*Методи дослідження.* При виконанні роботи використані відомі методи дослідження: фізичне моделювання процесів твердіння та механічної деформації заготовки в кристалізаторі з урахуванням основних положень теорії кристалізації металів, тепломасопереносу і теорії подібності; методи математичної статистики. Математичне моделювання розподілу температурних полів і формування внутрішніх напружень у твердій кірці виконувалося з використанням ПЕОМ.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

1. Вперше експериментальними методами встановлено, що в процесі деформації оболонки до центру зливка в кристалізаторі МБЛЗ при формуванні поздовжніх «утиснень» на поверхні безперервнолитої сортової заготовки, ділянка деформації кірки зміщується від зони, яка перебуває біля кута зливка, до центру грані зі збільшенням товщини затверділого шару з 2,5 до 9 мм. Показано, що інтенсивне тріщиноутворення в кірці, що твердне, відбувається при досягненні нею товщини 8-9 мм.

2. Вперше встановлено, що поява поверхневих тріщин у безперервнолитої сортовій заготовці, розлитій із високими швидкостями (понад 2,5 м/хв), що є причиною пориву металу, обумовлена деформацією профілю зливка, котра викликана попереми́нним зменшенням і збільшенням величини ромбічності заготовки, що має величину від 1-2 мм, внаслідок невідповідності профілю гільзи кристалізатора по висоті параметрам усадки кірки.

3. Вперше встановлено, що кірка заготовки в кристалізаторі починає відходити від стінки гільзи на відстані від меніска металу, що прямо пропорційно залежить від швидкості розливання сталі і відповідає точці, у якій товщина затверділої оболонки дорівнює 5-7 мм.

4. Отримали подальший розвиток уявлення про формування кристалічної структури безперервнолитої заготовки в кристалізаторі високопродуктивної МБЛЗ при швидкостях розливання сталі, що перевищують 2,5 м/хв, які свідчать про відмінність механізму утворення зони стовпчастих кристалів від традиційно прийнятого. Встановлено, що напрямок росту дендритів у більшості випадків є хаотичним відносно поверхні тепловідводу, а швидкості зростання окремих кристалів відрізняються на 25-35%. При цьому розвиток прилеглих кристалів припиняється через зіткнення з вторинними гілками дендритів, які розвиваються більш інтенсивно. Також, внаслідок різноспрямованості зростання дендритів між кристалами залишається 40-60% рідкої фази, що зменшує механічну міцність кірки, наслідком чого є поява тріщин у цій зоні під дією температурних або механічних напруг.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

Практичне значення має запропонований і впроваджений діапазон швидкостей розливання сталі на високопродуктивній сортовій МБЛЗ, який найбільш точно враховує відповідність профілю гільзи кристалізатора величині усадки кірки зливка, тим самим забезпечуючи сприятливі умови для формування бездефектної заготовки. Використання запропонованих швидкісних режимів розливання сталі в умовах ТОВ «Електросталь» дозволило знизити кількість проривів металу внаслідок утворення та розвитку поверхневих і підповерхневих тріщин на 15%, збільшити вихід придатного на 0,02% і виключити випадки утворення дефектів форми заготовки, таких як «ромбічність» і поздовжнє «утиснення». Також, у результаті впровадження рекомендацій, запропонованих у дисертаційній роботі, було досягнуто зростання швидкості розливання сталі при виробництві квадратної заготовки перетином 125×125 мм з 2,9 до 3,2 м/хв в умовах міні-заводу ТОВ «Електросталь» (м. Курахове), що дозволило збільшити продуктивність МБЛЗ на 10% (акт впровадження результатів дисертаційної роботи від 08 червня 2010 р.). Очікуваний річний економічний ефект склав 3629785 грн, (частка автора 10% або 362978,5 грн).

Розробки, виконані в дисертації, використовуються в навчальному процесі на кафедрі «Металургія сталі» ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (акт використання в навчальному процесі від 14 вересня 2010 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати роботи отримані автором самостійно. Зокрема, уточнено механізм взаємодії заготовки з гільзою кристалізатора на початкових етапах твердіння та механізм формування кристалічної структури безперервнолитого зливка, запропоновано механізм утворення на поверхні сортової заготовки поверхневих тріщин, досліджено вплив конусності кристалізатора МБЛЗ на формування дефектів форми заготовки.

У розробці ряду технічних рішень і їх реалізації брали участь співробітники ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» і ВАТ «СМЗ», що знайшло відображення у спільних статтях.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові положення та результати дисертації обговорені на: 3-ій міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні технології в металургії сталі: XXI сторіччя» (м. Донецьк, 31 жовтня - 2 листопада 2006 р.); 3rd International Conference on Simulation and Modelling of Metallurgical Processes in Steelmaking, Steelsim 2009. September 8-10,

2009, Leoben, Austria; V науково-технічній конференції «Донбас 2020: Перспективи розвитку очима молодих вчених» (м. Донецьк, 25-27 травня 2010 р.); VIII міжнародній науково-технічній конференції «Тепло та масообміні процеси в металургійних системах» (м. Маріуполь, 7-9 вересня 2010 р.); XIV міжнародній науково-технічній конференції «Теорія і практика сталеплавильних процесів» (м. Дніпропетровськ, 13-15 вересня 2010 г.); науковій конференції «50 років безперервному розливанню сталі в Україні» (м. Донецьк 4-5 листопада 2010 р.); розширеному семінарі кафедри «Металургія сталі» ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (16 листопада 2010 р.).

**Публікації.** Основний зміст дисертаційної роботи освітлено у 12 наукових працях, у тому числі у 8 статтях наукових журналів, 4 статтях збірників наукових праць. З них 7 статей опубліковані в спеціалізованих наукових виданнях, включених до переліку ВАК України.

**Структура дисертації.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 108 найменувань. Повний обсяг дисертації – 182 сторінки, загальний обсяг – 149 сторінок. У розділах дисертації 73 рисунка (у тому числі 11 на окремих сторінках) та 14 таблиць (у тому числі 4 на окремих сторінках).

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Перший розділ «Аналіз сучасних технологій безперервного розливання сталі на сортову заготовку».** Підприємства чорної металургії України є одними з найбільших постачальників сортової заготовки та довгомірного прокату на світовий ринок. Одним з найбільш важливих вузлів, що визначають раціональну роботу сортової МБЛЗ і оптимальну якість злитків, є кристалізатор, який виконує функцію приймання рідкого металу, що потрапляє до нього із промковшу, а також переведення частини рідкої сталі у твердий стан. Основним робочим елементом кристалізатора є мідна гільза, за допомогою якої здійснюється відвід тепла від заготовки до охолоджувальної рідини та формується геометрична форма заготовки.

Сучасна гільза для одержання сортової заготовки з високими швидкостями має складну геометричну форму внутрішньої поверхні, так звану «параболу», яка повинна максимально враховувати усадку кірки у процесі розливання і запобігати утворенню газового зазору між стінкою кристалізатора та заготовкою, що згубно впливає на швидкість охолодження зливка. Особливо це актуально при високошвидкісному розливанні сталі (зі швидкостями понад 2,5-3 м/хв), тому що час перебування металу в кристалізаторі значно менший, ніж при традиційній технології (швидкість розливання менш 2,2-2,3 м/хв). Це вимагає забезпечення більш тривалого контакту заготовки з гільзою для одержання на виході досить товстої кірки, здатної витримати феростатичний тиск металу.

Аналіз відомих конфігурацій гільз кристалізаторів показав, що форма їх внутрішньої поверхні розраховується для певних технологічних умов і забезпечує одержання високоякісного продукту при одночасному збільшенні продуктивності МБЛЗ. Однак, при деякому відхиленні від установлених оптимальних

параметрів розливання можливе порушення контакту кірки із внутрішньою поверхнею гільзи, що може призвести до формування дефектів геометричної форми заготовки: поздовжніх кутових тріщин, ромбічності поперечного перерізу зливка, випуклості, увігнутості заготовки та ін.

Швидкість кристалізації сталі при високопродуктивному безперервному розливанні перевищує швидкість кристалізації металу при розливанні у виливниці у 3-5 разів і більше. Тому вивчення процесів, що супроводжують формування безперервнолитої сортової заготовки в кристалізаторі високопродуктивних МБЛЗ є актуальним завданням, розв'язання якого дозволить зрозуміти причину утворення поверхневих і підповерхневих дефектів, а також дефектів форми заготовки.

**Другий розділ** «*Фізичне моделювання процесів формування квадратної заготовки в кристалізаторі сортової МБЛЗ*». При фізичному моделюванні процесів твердіння безперервнолитої сортової заготовки в кристалізаторі високопродуктивної МБЛЗ вирішувалися такі завдання: дослідження впливу інтенсивності теплопереносу на формування твердої кірки в кристалізаторі; вивчення впливу механічної деформації твердої кірки в кристалізаторі на формування макродефектів у сортовій заготовці. Для цього була створена фізична модель, що імітує поперечний переріз кристалізатора, основні параметри якої визначалися з умов ідентичності геометричного масштабу, критерію Фур'є та добутку критерію Біо ( $Bi$ ) і критерію фазового переходу ( $N$ ) ( $Bi \cdot N = idem$ ). Принципова схема лабораторної установки наведена на рис. 1.

Розплав моделюючої речовини тверднув у моделі кристалізатора сортової МБЛЗ, виготовленій із алюмінієвого сплаву, що забезпечує високу інтенсивність відводу тепла. Всередині моделі кристалізатора вмонтовані мідні трубки діаметром 5 мм, через які з певною витратою пропускається охолоджуюча вода. До нижньої частини моделі приклеєне прозоре скло, що дозволяє візуалізувати процеси твердіння при пропусканні світла крізь рідку ванну. З метою запобігання впливу тепловідводу крізь скло та меніск розплавленого камфену на процес твердіння, висота модельного шару рідини була прийнята рівною 20 мм. Відповідно, за такою схемою інтенсивність тепловідводу крізь стінки моделі, що охолоджуються водою, значно вище, ніж крізь меніск моделюючої речовини та прозоре скло. Фізичну модель виконано в масштабі 1:1,2 стосовно модельованого об'єкту – безперервнолитої сортової заготовки перетином 120×120 мм. Моделюючою речовиною була обрана хімічна сполука камфен (2,2-диметил-3-метиленбіциклогептан), яка твердне з утворенням дендритної структури. При цьому в рідкому стані камфен зберігає оптичну прозорість аж до повного твердіння. Температура заливання камфену становила  $38 \pm 0,5^\circ\text{C}$ . Середнє значення температури води для охолодження стінок моделі становило  $18-20^\circ\text{C}$ . Процес твердіння спостерігався візуально та фіксувався за допомогою цифрової відеокамери і фотоапарата. За отриманими відеофайлами здійснювалася кількісна оцінка кінетики твердіння модельного сплаву.

У розробленій моделі передбачена можливість регулювання витрати охолоджувальної води для кожної грані окремо та виміру її витрати за допомогою витратоміра. Температура води на вході і виході з моделі вимірялася за допомо-

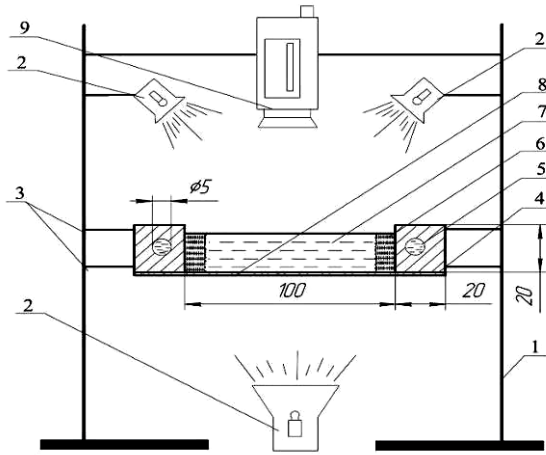


Рис.1. Загальна схема лабораторної установки для моделювання процесу твердіння заготовки в кристалізаторі: 1 – фіксуюча рама; 2 – освітлювальні лампи; 3 – фіксатори для підтримки кристалізатора; 4 – кристалізатор; 5 – отвори для пропускання охолодної води; 6 – твердий шар камфену; 7 – рідкий об'єм моделюючої речовини; 8 – прозоре органічне скло з низькою теплопровідністю; 9 – відеокамера

вало ефект зміни інтенсивності тепловідводу.

Характерною рисою процесу формування твердої кірки в місцях зі зменшеним тепловідводом (рис. 2) є утворення великої кількості дрібних тріщин, що розташовуються уздовж напрямку відводу тепла. При цьому тріщини являють собою тонкі розриви суцільності твердої кірки, що тягнуться, видимо, уздовж границь дендритних кристалів на глибину 5-8 мм. Кількість тріщин зростає зі збільшенням товщини теплоізолюючої прокладки.

Для вивчення причин появи тріщин у речовині, що твердне, в умовах обмеженої усадки, викликана різницею швидкостей охолодження різних частин кірки, було виконано дослідження динаміки формування кристалів розплаву камфена в кристалізаторі.

Процес формування твердої кірки речовини в лабораторній моделі фіксувався за допомогою цифрового фотоапарата в режимі макрозйомки, що дозволило візуалізувати утворення та збільшення кристалів, а також особливості формування дендритної структури.

У процесі дослідження особливостей росту кристалів у кристалізаторі високопродуктивної сортової МБЛЗ були виявлені наступні основні типи дендритних структур моделюючої речовини:

1. Область упорядкованого зростання дендритів, у якій основна кількість кристалів росте перпендикулярно поверхні тепловідводу та паралельно один щодо

гою ртутного термометра з точністю  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ .

Беручи до уваги той факт, що в процесі безперервного розливання сталі тверда оболонка зливка може відходити від кристалізатора через невідповідність профілю гільзи величині усадки кірки або внаслідок зношування окремих ділянок її поверхні, були виконані експерименти для оцінки впливу утворення газового зазору на динаміку твердіння заготовки. При цьому розглядалися дві найбільш імовірні ситуації: формування газового зазору в куті кристалізатора та формування газового зазору уздовж грані кристалізатора.

Для імітації зменшення інтенсивності тепловідводу при відходженні твердої кірки заготовки в куті (або на середині грані) моделі кристалізатора наклеювався певний шар теплоізоляційного матеріалу, товщина якого варіювалася від 1 до 2 мм, що забезпечувало



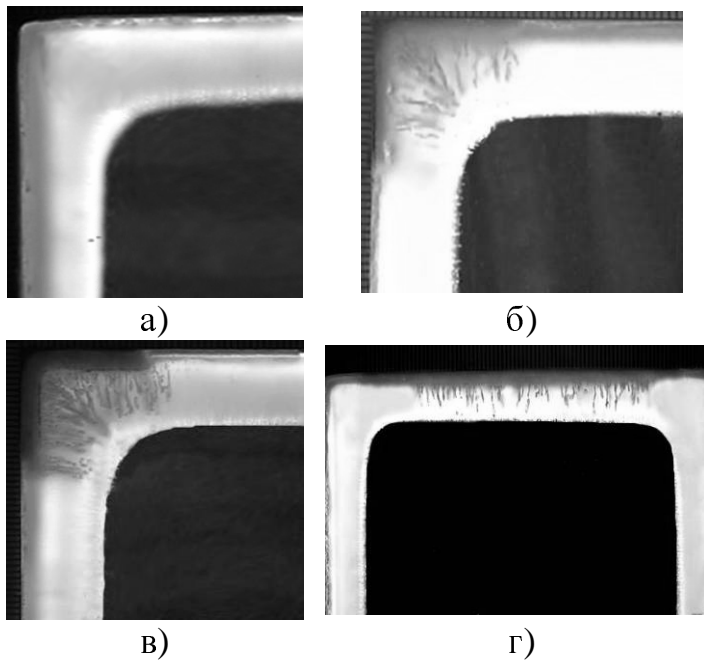


Рис. 2. Характерний вид твердої кірки заготовки після твердіння в кристалізаторі: а – без теплоізолятора; б і в – з теплоізоляторами товщиною 1 мм і 2 мм, які встановлено в куті кристалізатора; г – з теплоізолятором товщиною 1 мм, який встановлено біля грані кристалізатора

4. Область зростання кристалічної структури, у якій осі першого порядку деяких рядом розташованих дендритів ростуть під невеликим гострим кутом та розходяться в різні боки один від одного, утворюючи області локального проникнення рідкої фази вглиб щільної кристалічної оболонки на 40-60% її товщини.

5. Область зростання дендритів, у якій осі першого порядку дендритів, що зростають поряд, утворюють між собою тупий кут, що призводить до інтенсифікації зростання гілок другого та третього порядку, які заповнюють область рідкої фази, яка збереглась; формування твердої кірки гілками другого та третього порядку відбувається повільніше, ніж гілками першого порядку, що обумовлює утворення локальних обсягів рідкої фази всередині твердої кірки, що призводить до зменшення її міцності.

Формування кристалічної структури заготовки по її периметру відбувається нерівномірно та може містити в собі різні комбінації дендритних структур, що відрізняються від «класичної». У цьому випадку, між деякими розташованими поруч кристалами залишається значна кількість рідини (40-60%), що сприяє локальному зменшенню міцності кірки в цій зоні.

На практиці це може стати основною причиною зародження та утворення тріщини при виникненні в цій зоні механічних або температурних напруг.

Також за допомогою фізичного моделювання було проведено дослідження процесів і явищ, що супроводжують формування твердої кірки заготовки в кристалізаторі в умовах, коли конусність гільзи збільшується швидше, ніж швидкість усадки кірки, що твердне. Для проведення цього дослідження створена фізична модель,

одного, а їх осі другого порядку, перетинаючись, утворюють щільну оболонку.

2. Область кристалічної структури, у якій головні осі дендритів приблизно паралельні напрямку тепловідводу, однак розташовані на істотній відстані один від одного, забезпечуючи формування зон глибокого проникнення рідкої фази у тверду (30-40% від товщини затверділої оболонки).

3. Область зростання дендритів, у якій осі першого порядку деяких кристалів ростуть під кутом до напрямку тепловідводу, і, перетинаючись із гілками другого порядку інших дендритів, зупиняють свій розвиток, внаслідок чого проявляється відставання у просуванні фронту твердіння, і у твердій кірці зберігаються зони рідкої фази довжиною 20-30% від її товщини.

яка відрізняється від попередньої тим, що одна з її граней виконана рухливою.

Для вивчення деформації кірки в цих умовах інтерес представляють 3 основних етапи формування твердої оболонки заготовки:

1 етап – початок нарощування твердої кірки (до 3-4 мм) у верхній частині гільзи, яку, у більшості випадків, виготовляють з великою конусністю;

2 етап – середня частина кристалізатора, де конусність приблизно збігається з величиною усадки (товщина кірки 4-8 мм);

3 етап – нижня частина гільзи (товщина кірки 8-14 мм і більше), у якій величина конусності гільзи варіюється залежно від концепції виробника та може бути як більшою, так і меншою ніж величини усадки.

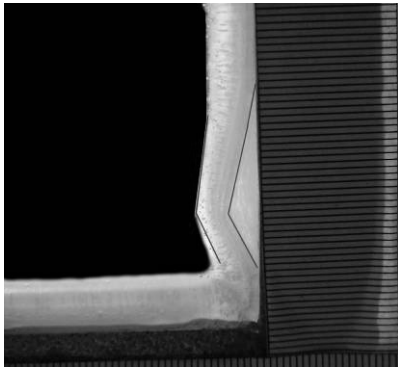
У процесі деформації модельної речовини спостерігалось деяке відставання відходження кірки від стінки кристалізатора під час докладання зусиль на всіх трьох етапах дослідження, величина якого збільшувалася з ростом товщини кірки, що деформується. Також було встановлено, що області деформації твердої кірки переміщуються з зони біля кута до центру її грані зі збільшенням товщини заготовки.

У цілому змодельований механізм деформації твердої кірки заготовки в кристалізаторі досить добре узгоджується з процесами, які спостерігаються в реальних сортових заготовках. Наприклад, досить характерний дефект «утиснення» вздовж кута заготовки, що зустрічається на практиці безперервного розливання, (рис 3 б) досить добре кореспондується з отриманими на моделі уявленнями про деформацію твердої кірки.

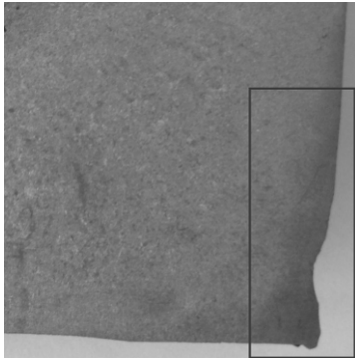
У процесі безперервного розливання можливі описані та змодельовані в цьому розділі відхилення умов формування зливка від оптимальних, викликані невідповідністю внутрішнього профілю гільзи величині усадки кірки або її жолобленням, наслідком чого є утворення дефектів форми заготовки. Розвиток цих явищ може стати причиною знеміцнення твердої оболонки внаслідок формування в ній тріщин. У зв'язку з вищесказаним представляється доцільним кількісно оцінити поведінку кірки в кристалізаторі МБЛЗ за таких різних несприятливих обставин.

**Третій розділ** «*Математичне моделювання процесів формування заготовки в кристалізаторі сортової МБЛЗ*». Для вивчення процесів, що супроводжують формування заготовки в кристалізаторі високопродуктивної МБЛЗ, виконано математичне моделювання, метою якого було визначення рівня внутрішніх напружень у твердій кірці та ідентифікація причин утворення дефектів геометричної форми.

Модель формування твердої кірки сортової заготовки була розроблена на базі програмного комплексу ANSYS (ліцензія №152780 від 13.10.2001 р.). Для моделювання застосований метод, що широко використовується у подібних дослідженнях, поперечного перерізу, який проходить уздовж технологічної осі. Об'єктом моделювання була обрана заготовка перетином 120×120 мм, що відливається на високопродуктивній МБЛЗ з наступними параметрами: загальна довжина кристалізатора – 1,0 м (робоча довжина – 0,88 м); товщина стінки кристалізатора – 12 мм; внутрішній радіус кута гільзи кристалізатора – 3-6 мм; швидкість витягування заготовки – 3,0-3,5 м/хв.



а



б

Рис. 3. Фотографія характеру деформації кірки модельної речовини в місці накладення на неї стискаючого впливу (а) і профілю темплета безперервнолитого сортової заготовки перетином 125 мм (б)

вати інформацію щодо розташування межі фаз, розподілу теплових потоків і картини температурних полів; будувати ізолінії розподілу температур; визначати необхідні для аналізу значення напруженого стану зливка та кристалізатора, у тому числі і інтенсивність напруг; розраховувати конфігурацію деформованого стану твердого каркаса зливка та кристалізатора в абсолютних і відносних величинах та ін.

За допомогою розробленої математичної моделі був виконаний аналіз наступних можливих ситуацій із порушенням контакту твердої кірки заготовки з внутрішньою поверхнею кристалізатора: відхід одного кута (рис. 4 а); відхід двох кутів (рис. 4 б); відхід трьох кутів (рис. 4 в); відхід чотирьох кутів (рис. 4 г).

Випадок, коли один кут твердої кірки заготовки відходить від внутрішньої поверхні гільзи кристалізатора (рис. 4 а) представляється, на нашу думку, найбільш імовірним за умови відсутності додаткового жолоблення гільзи кристалізатора та розмивання твердої кірки падаючим струменем. При цьому викривлення геометричної форми твердого каркаса призводить до розвитку в ньому високого рівня внутрішніх напружень (рис. 4 а). В куті заготовки, що відійшов від гі-

Геометрична модель на стадії охолодження заготовки в кристалізаторі містила в собі поперечний переріз заготовки та гільзу кристалізатора. Ця модель розбивалася на сітку кінцевих елементів із розміром осередка 3 мм. У найбільш дефектонебезпечних місцях розмір елементів було зменшено в 4-10 разів для отримання більш точного розв'язання. Теплофізичні та механічні властивості досліджуваного матеріалу відповідали сталі з вмістом вуглецю  $<0,3\%$  і задавалися залежно від її температури. На підставі даних фізичного моделювання динаміки формування кристалічної структури твердої кірки в кристалізаторі довжина двофазної зони в процесі математичного моделювання приймалася рівною 50%. Врахування енергії (прихованої теплоти), що виділяється або поглинається при фазових перетвореннях, здійснювалося задаванням ентальпії як функції температури. У якості моделі поведінки твердого каркаса під навантаженням була прийнята пружно-пластична модель.

Пластична плинність матеріалів апроксимувалася за допомогою моделі білінійної поведінки матеріалу. Аналогічно задавалися властивості для матеріалу гільзи кристалізатора – міді.

Розроблена математична модель дозволяє одержувати докладну інформацію щодо теплового та напружено-деформованого стану твердої кірки безперервнолитого зливка в кристалізаторі, а зокрема: виводити на екран графіки охолодження зливка за перетином для різних точок за бажанням дослідника; одержу-

льзи, напружено-деформований стан твердої кірки має складний характер і поблизу фронту твердіння значення розтягувальних внутрішніх напружень досягають рівня 4-7 МПа, що може перевищувати гранично припустимі для таких умов величини напруг, при яких не відбувається руйнування твердої кірки (5-5,5 МПа). Відповідно, імовірність появи тріщини у твердому каркасі заготовки в зоні біля кута вже в кристалізаторі виявляється досить високою.

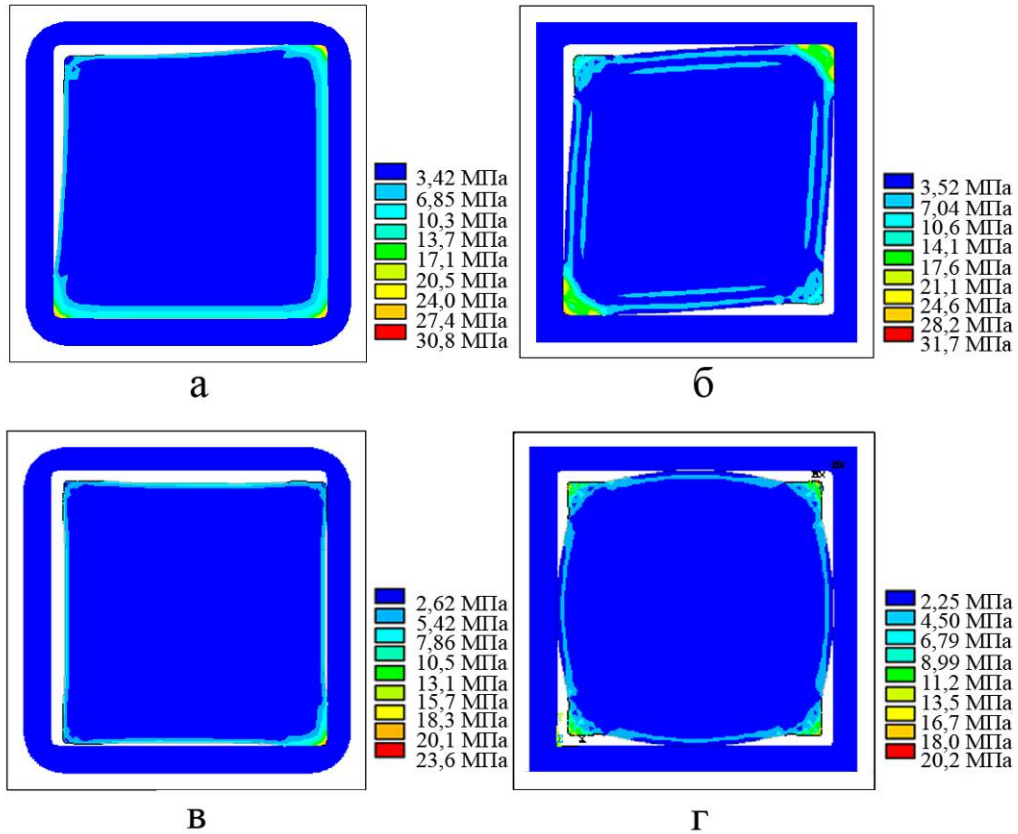


Рис. 4. Інтенсивність напруг у кірці заготовки на виході із кристалізатора у випадку відходу одного (а), двох (б), трьох (в) і чотирьох (г) кутів

Ситуацію з відходженням двох кутів каркаса твердої кірки від гільзи кристалізатора слід розглядати як динамічний розвиток процесу жолоблення твердого каркаса при відходженні одного кута. Викривлення геометричної форми заготовки в цьому випадку додатково призводить до виникнення внутрішніх розтягувальних напруг по гранях в областях, що прилягають до фронту твердіння (рис. 4 б). Найнебезпечнішими, з погляду руйнування твердої кірки, представляються тупі кути зливка, оскільки в них концентруються розтягувальні напруги. Отримана в результаті виконаних розрахунків їх максимальна величина (5,0-5,5 МПа) є граничним припустимим значенням для даної температури заготовки. Тому у випадку розвитку явища ромбічності (наприклад, після виходу заготовки з кристалізатора) на практиці слід очікувати виникнення внутрішніх тріщин по обом тупим кутам.

При відході трьох кутів (рис. 4 в) рівень внутрішніх напружень у твердому каркасі виявляється значно нижчим, ніж при відході двох кутів. При цьому жоло-

блення поперечного перерізу заготовки також відбувається меншою мірою. Розглядаючи динаміку формування твердої кірки заготовки при відході трьох кутів, слід зазначити, що її нарощування на ділянках, що відійшли від гільзи, відбувається значно повільніше, внаслідок чого твердий каркас заготовки може надалі прийняти одну з раніше розглянутих більш стійких геометричних форм.

Іншим варіантом нераціонального вибору параметрів процесу розливання сталі може бути ситуація з відходженням усіх чотирьох кутів твердого каркаса від поверхні гільзи кристалізатора (рис. 4 г). Ця ситуація може бути також обумовлена нераціональною конструкцією гільзи кристалізатора в області кутів. Як видно з рис. 4 г, при відходженні всіх чотирьох кутів твердий каркас зберігає контакт із поверхнею гільзи по гранях заготовки, що формується. При цьому відбувається «випинання» граней і спостерігається переважне нарощування твердої кірки саме в місцях контакту. У цьому випадку розрахункові значення внутрішніх напружень, як біля фронту твердіння, так і поблизу поверхні заготовки зазвичай не перевищують гранично допустимих значень, що свідчить про низьку ймовірність утворення внутрішніх тріщин безпосередньо в кристалізаторі.

Таким чином, у процесі твердіння металу в кристалізаторі найбільш імовірним представляється відходження одного з кутів твердої кірки. При цьому, внаслідок зменшення швидкості нарощування твердої кірки та збільшення рівня розтягувальних напружень у цьому куті, як правило, може спостерігатися значна деформація профілю заготовки, що за певних умов обумовлює виникнення поверхневих і підповерхневих тріщин, які можуть стати причиною прориву металу під кристалізатором.

**Четвертий розділ** *«Визначення раціональних промислових параметрів розливання сталі на сортовій МБЛЗ із підвищеною продуктивністю»*. Виконане математичне моделювання пояснює формування внутрішніх тріщин у безперервнолитих сортових заготовках, що мають дефекти геометричної форми, однак на практиці спостерігаються випадки, коли в ромбічній заготовці прорив металу під кристалізатором викликають поздовжні тріщини, що йдуть не від центру заготовки до поверхні (рис. 5 а), а, навпаки, від поверхні до центру (рис. 5 б). Для вивчення процесів, що передують прориву металу при утворенні подібного роду тріщин, була досліджена «панчоха» безперервнолитої сортової заготовки, відібрана на МБЛЗ ТОВ «Електросталь» (м. Курахове) перетином 120x120 мм. Також була відібрана частина заготовки перетином 100x100 мм із проривом по поздовжній тріщині виробництва ВАТ «Єнакіївський металургійний завод», з якої вирізано 5 темплетів з ділянок, що передують прориву. Дослідження динаміки формування цих зразків, показало, що основною причиною утворення подібного роду тріщин є поперемінна деформація профілю заготовки, яка має величину від 1-2 мм, у кристалізаторі внаслідок невідповідності конусності гільзи величині усадки кірки.

На підставі отриманих теоретичних уявлень про особливості формування заготовки у високошвидкісному параболічному кристалізаторі був визначений можливий рівень підвищення продуктивності 3-х струмкової сортової МБЛЗ в умовах міні-заводу ТОВ «Електросталь».

На першому етапі дослідження були виконані виміри профілю гільзи за до-

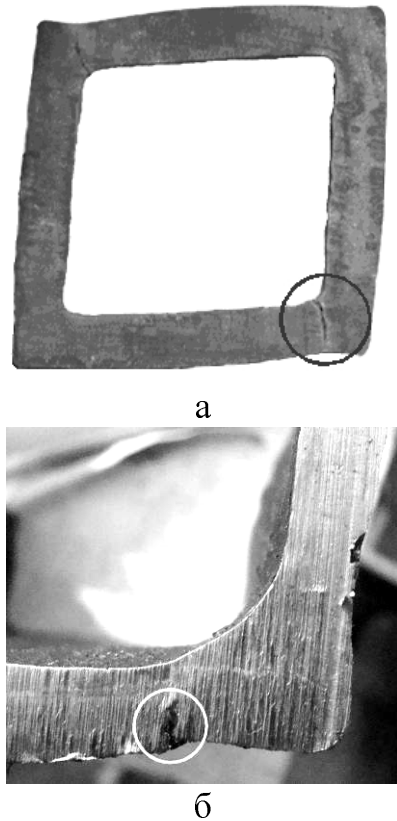


Рис.5. Зовнішній вигляд тріщин, що сформувалися при утворенні ромбічності заготовки та спричинили прорив металу

допомогою приладу для контролю внутрішньої поверхні кристалізатора МБЛЗ «Mold Checker» виробництва фірми «VATRON» (Австрія). Прилад дозволяє одержати об'ємне зображення внутрішніх контурів кристалізатора, відстежити міру його зношування та залишковий ресурс. Точність вимірів  $\pm 0,01$  мм.

Наступним кроком став розрахунок величини усадки заготовки в кристалізаторі МБЛЗ, який ґрунтувався на тому, що на практиці тонка оболонка, яка формується у верхній частині гільзи, щільно прилягає до поверхні внаслідок дії феростатичного тиску. Така кірка ще не має високих пружних властивостей, і її поведінка не може розглядатися тільки з позиції усадкових явищ. Фактично ця частина твердої кірки відтворює внутрішню конфігурацію гільзи. Аналіз результатів відомих закордонних досліджень показав, що товщина кірки заготовки, що складається зі 100% твердої фази і здатна протистояти феростатичному тиску, для більшості марок сталей становить, щонайменше, 3 мм. Однак у ході виконаних у роботі досліджень особливостей твердіння сталі в кристалізаторі встановлено, що для одержання такого значення товщини з гарантованими 100% твердої фази, реальна товщина кірки повинна бути в 1,4-1,6 рази більше. У зв'язку з цим товщина твердої оболонки яка здатна витримати вплив феростатичного тиску була прийнята рівною 6 мм. Отже, залежно від швидкості розливання положення точки, у якій починається процес усадки

твердої оболонки, змінюється відносно меніска металу в кристалізаторі. Це впливає на характер контакту між гільзою певних геометричних параметрів і кірки заготовки в початковий і кінцевий момент формування зливка.

Результати розрахунків зміни перетину заготовки за допомогою вдосконаленої математичної моделі, що враховує встановлену поведінку кірки в гільзі в початковий момент твердіння, наведені на рис. 6 (букви R і P вказують профіль радіальної грані та грані перпендикулярної їй, відповідно; цифри в кривих вказують швидкість розливання сталі).

Встановлено, що при швидкостях витягування заготовки нижче 2,5 м/хв величина конусності гільзи стає меншою за величину усадки кірки вже на відстані 300 мм від меніска, що призводить до утворення газового зазору між стінкою кристалізатора та оболонкою зливка. Це може призвести до зменшення товщини твердої кірки заготовки, внаслідок погіршення умов тепловідводу, і розвитку явища «ромбічності», а також прориву німічної оболонки.

Показано, що для гільз кристалізаторів фірми «АВАХ» (Франція), що використовуються на МБЛЗ ТОВ «Електросталь» доцільно дотримуватися швидкостей розливання сталі в діапазоні 2,8-3,5 м/хв, у якому величина усадки кірки найбільшою мірою відповідає внутрішньому профілю гільзи. Також слід зазначити, що

при формуванні заготовки за запропонованим механізмом спостерігається більш тривалий контакт поверхні зливка з гільзою при швидкостях 2,8-3,5 м/хв, що збільшує значення локального теплового потоку та дозволяє одержати більш товсту та міцну кірку на виході з кристалізатора. Розливання безперервнолитих сортових заготовок з швидкостями понад 3,5 м/хв може призвести до деформації ще недостатньо міцної оболонки, що твердне, у другій і третій чверті гільзи при її взаємодії зі стінкою кристалізатора, наслідком чого стане формування «утиснень» на поверхні заготовки.

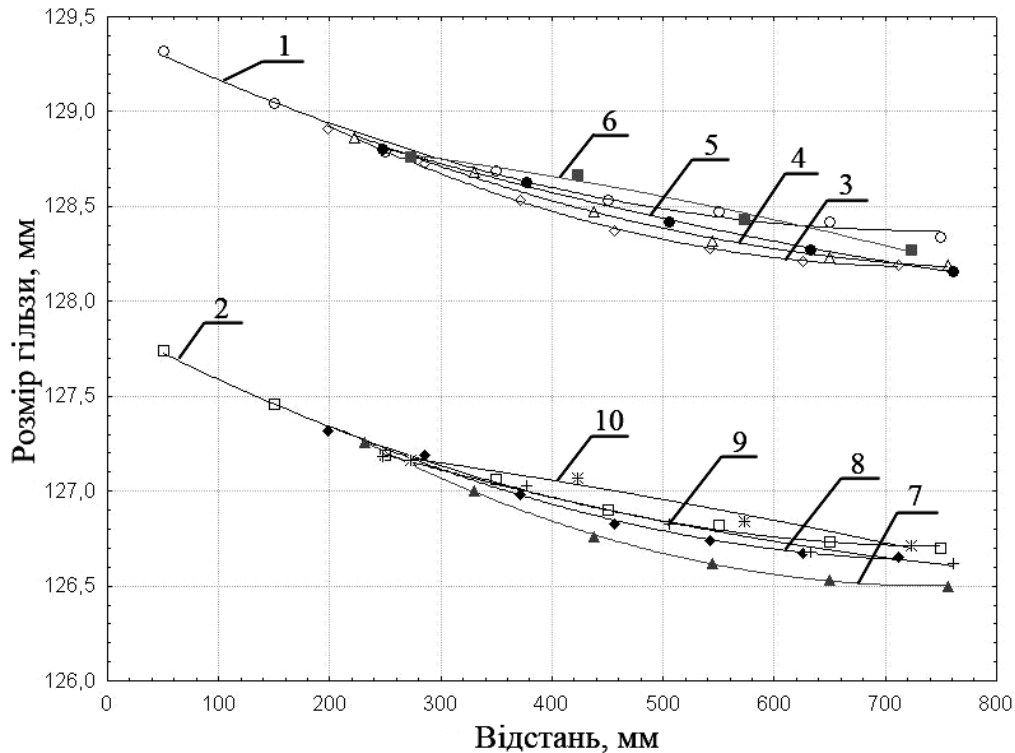


Рис.6. Результати розрахунків зміни перетину заготовки внаслідок усадки при різних швидкостях розливання

У результаті виконаних у промислових умовах досліджень доведена можливість істотного підвищення продуктивності сортової МБЛЗ ТОВ «Електро-сталь». Так, при розливанні на всіх трьох струмках із середньою швидкістю 3,2 м/хв продуктивність становить 1,17 т/хв (70,2 т/годину), що відповідає часу розливання однієї плавки за 50-51 хв. Така продуктивність МБЛЗ дозволяє розливати 1684,4 т/добу (29 плавок), що еквівалентно підвищенню продуктивності МБЛЗ на 10%. Також запропоновані заходи дозволили зменшити кількість проривів металу під кристалізатором, пов'язаних з явищем тріщиноутворення на 15%, підвищити вихід придатного на 0,02 %.

Додатковою перевагою розливання з підвищеною швидкістю є можливість найбільш повної синхронізації роботи системи «ДСП – МБЛЗ», що виключає тривалі технічні відстої ковшів з металом (більш 20-30 хв) перед обробкою на установці ківш-піч. Це забезпечує зниження витрати електроенергії і електродів, зниження вигару кремнію та витрати феросплавів, а також зменшення питомої витрати

вогнетривів.

## ВИСНОВКИ

У дисертації вирішене актуальне науково-технічне завдання з **теоретичного обґрунтування і удосконалення швидкісного режиму розливання сталі на високопродуктивних сортових МБЛЗ, що дозволив запобігти утворенню поверхневих і підповерхневих тріщин та дефектів форми в заготовці за рахунок поліпшення контакту твердої оболонки зливка з гільзою кристалізатора, зменшити кількість проривів металу під кристалізатором, пов'язаних із явищем тріщиноутворення на 15%, підвищити вихід придатного на 0,02% і збільшити продуктивність машини в умовах ТОВ «Електросталь» на 10%.**

Основні наукові й практичні результати роботи:

1. Виконано аналіз сучасних рішень для збільшення продуктивності сортових МБЛЗ, найбільш ефективним з яких є підвищення швидкості розливання з одночасним забезпеченням певних кондицій заготовки, застережених вимогами технічних умов. У результаті проведеного аналізу показано, що основним елементом, який відповідає за якість одержуваного продукту при високопродуктивному розливанні, є кристалізатор, у якому відбувається формування заготовки та зародження дефектів безперервнолитого зливка (ромбічність профілю заготовки, поздовжнє «утиснення», поверхневі і підповерхневі тріщини) при відхиленні від номінальних параметрів лиття. На основі аналізу сучасних підходів до конструкції внутрішньої порожнини кристалізаторів зроблено висновок про те, що розливання сталі з підвищеними швидкостями вимагає уточнення механізмів формування кристалічної структури заготовки та взаємодії кірки з гільзою.

2. За допомогою створеної фізичної моделі кристалізатора сортової МБЛЗ, що, при використанні камфену у якості моделюючої речовини, дозволила вивчити характер зростання дендритних кристалів, вплив нерівномірності тепловідводу на умови нарощування твердої кірки і якість підповерхневих зон заготовки, особливості деформації кірки в кристалізаторі. Встановлено, що зменшення локального теплового потоку в кожній із областей кристалізатора призводить до затримки нарощування в ній кірки в 1,4-2,5 рази. Це може призвести до утворення тріщин, напрямок поширення яких збігається з орієнтацією головних осей дендритів. Нерівномірне нарощування твердої кірки за периметром гільзи обумовлює викривлення форми заготовки, наслідком чого є утворення внутрішніх тріщин, а також розвиток такого дефекту форми, як «ромбічність».

3. Експериментальними методами встановлено, що у процесі деформації оболонки до центру зливка в кристалізаторі МБЛЗ при формуванні поздовжніх «утиснень» на поверхні безперервнолитої сортової заготовки, ділянка деформації кірки зміщується від зони, яка перебуває біля кута зливка, до центру грані зі збільшенням товщини затверділого шару з 2,5 до 9 мм. Показано, що інтенсивне тріщиноутворення в кірці, що твердне відбувається при досягненні нею товщини 8-9 мм.

4. Методами фізичного моделювання встановлено, що при формуванні кристалічної структури безперервнолитої заготовки в кристалізаторі високопродуктив-



ної МБЛЗ на швидкостях розливання сталі, що перевищують 2,5 м/хв, механізм утворення зони стовпчастих кристалів відрізняється від традиційно прийнятого. Встановлено, що напрямок зростання дендритів у більшості випадків є хаотичними відносно поверхні тепловідводу, а швидкості зростання окремих кристалів відрізняються на 25-35%. При цьому розвиток прилеглих кристалів припиняється через зіткнення з вторинними гілками дендритів, які більш інтенсивно розвиваються. Також внаслідок різноспрямованості росту дендритів між кристалами залишається 40-60% рідкої фази, що знижує механічну міцність кірки, наслідком чого є поява тріщин у цій області під дією температурних або механічних напруг.

5. За допомогою методів математичного моделювання розглянуті основні можливі варіанти викривлення профілю заготовки у процесі її формування в кристалізаторі, що викликані нерівномірністю відводу тепла за периметром і висотою твердого каркаса. Встановлено, що відходження одного або двох кутів твердої кірки є найбільш імовірними, тому що ці конфігурації твердої оболонки найбільш стійкими в кристалізаторі та найчастіше зустрічаються на практиці. У області відходження одного з кутів зменшується швидкість нарощування твердої кірки заготовки і зростає величина розтягувальних напруг, що призводить до появи поздовжніх тріщин та прориву металу під кристалізатором. Відходження двох кутів твердої кірки заготовки відбувається переважно в нижній третині кристалізатора при його недостатній конусності або зношуванні. Це призводить до формування ромбічності, наслідком якої може бути утворення підповерхневих тріщин у областях тупих кутів.

6. Встановлено, що поява поверхневих тріщин у безперервнолитій сортовій заготовці, розлитій з високими швидкостями, що є причиною пориву металу, обумовлена деформацією профілю зливка, яка викликана поперемінним зменшенням і збільшенням величини ромбічності заготовки і має величину від 1-2 мм, внаслідок невідповідності профілю гільзи по висоті кристалізатора параметрам усадки кірки.

7. Уперше експериментальними та розрахунковими методами встановлено, що відстань відносно меніска металу в кристалізаторі, на якому кірка заготовки починає відходити від стінки гільзи прямо пропорційно залежить від швидкості розливання сталі та відповідає точці, у якій товщина затверділої оболонки дорівнює 5-7 мм. Це дозволило визначити діапазон швидкостей розливання сталі при виробництві безперервнолитой заготовки перетином 125×125 мм у межах 2,8-3,5 м/хв в умовах ТОВ «Електросталь», у якому одержувана заготовка відповідає необхідним вимогам якості.

8. Показано, що сучасний кристалізатор сортової МБЛЗ здатний формувати якісну заготовку в діапазоні швидкостей розливання  $\pm 10-15\%$  від номінальної, що дозволяє синхронізувати роботу технологічної схеми: «сталеплавильний агрегат – установка ківш-піч – машина безперервного лиття заготовки» в умовах міні-заводу. Рекомендації з удосконалення технологічних параметрів розливання сталі на високопродуктивній сортовій МБЛЗ, використані при виробництві безперервнолитой сортової заготовки перетином 125×125 мм в умовах ТОВ «Електросталь», дозволили підвищити продуктивність МБЛЗ на 10%, що відповідає розливанню однієї плавки за 50-51 хв. Також запропоновані заходи дозволили зменшити кількість

проривів металу під кристалізатором, пов'язаних із явищем тріщиноутворення на 15%, підвищити вихід придатного на 0,02 %. Очікуваний річний економічний ефект склав 3629785 грн (частка автора 10% або 362978,5 грн).

9. Розроблені в дисертації фізичні моделі, теоретичні залежності та методи використовуються на кафедрі «Металургія сталі» у навчальному процесі при вивченні дисциплін «Безперервне розливання сталі», «Розливання і твердіння металу» та «Моделювання металургійних процесів» за фахом 6.090401 «Металургія чорних металів».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Штепан Е.В. Влияние инъекции аргона на формирующуюся оболочку сортовой непрерывнолитой заготовки / Е.В. Штепан, Г.А. Редько, В.Е. Ухин, А.В. Науменко, Е. Ю. Жибоедов // *Электromеталлургия*.- 2007.- №.6 – С. 20-24.

2. Смирнов А.Н. Принципы систематизации критериев комплексной оценки качества непрерывнолитой сортовой заготовки / А.Н. Смирнов, А.Ю. Цупрун, В.Е. Ухин, Е.Ю. Жибоедов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – №1. – С. 35-39.

3. Смирнов А.Н. Физическое моделирование условий формирования непрерывнолитой сортовой заготовки в кристаллизаторе высокопроизводительной МНЛЗ / А.Н. Смирнов, В.Е. Ухин, Е.Ю. Жибоедов // *Процессы литья*. 2009. – №1. – С.33-42.

4. Смирнов А.Н. Особенности деформации твердой корочки заготовки в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ / А.Н. Смирнов, В.Е. Ухин // *Электromеталлургия*. – 2009. – №6. – С. 14-20.

5. Смирнов А.Н. Моделирование условий деформации твердой корочки заготовки в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ / А.Н. Смирнов, В.Е. Ухин // *Металл и литье Украины*. – 2009. – № 7-8. – С. 69-74.

6. Савенков Ю.Д. Исследование процесса формирования прямоугольного слитка при полунепрерывной разливке меди / Ю.Д. Савенков, С.В. Гридин, Е.В. Штепан, В.Е. Ухин, А.В. Кравченко, А.П. Верзилов // *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Металургія»*. – 2009. Випуск 159. – С. 253-261.

7. Смирнов А.Н. Физическое моделирование деформации заготовки в кристаллизаторе высокопроизводительной сортовой МНЛЗ / А.Н. Смирнов, В.Е. Ухин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 7. – С. 232-234.

8. Смирнов А.Н. Конструкция современных гильз кристаллизаторов для высокопроизводительного литья заготовок на сортовых МНЛЗ / А.Н. Смирнов, В.Е. Ухин, Е.Ю. Жибоедов // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2009. – №2. – С. 49-55

9. Штепан Е.В. Физическое моделирование процессов затвердевания сортовой заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ / Е.В. Штепан, В.Е. Ухин, Е.Ю. Жибоедов // *Труди 3-ої міжнародної науково-практичної конференції «Прогресивні технології у металургії сталі ХХІ сторіччя»*. – Донецьк, 2006. – С.384-388.

10. Smirnov A. Physical Modeling of Billet Rhomboidity Phenomena During Solidification in the CCM Mould / A. Smirnov, V. Ukhin // 3rd International Conference on Simulation and Modelling of Metallurgical Processes in Steel-making, Steel-sim 2009, September 8-10, 2009, Leoben, Austria. – CD-print.

11. Кравченко А.В. Повышение производительности сортовой МНЛЗ в условиях ООО «Электросталь» г. Курахово / А.В. Кравченко, В.Е. Ухин // Матеріали V науково-практичної конференції «Донбас-2020: перспективи розвитку очима молодих вчених» – Донецьк, 25-27 травня 2010 р. – С. 201-208.

12. Смирнов А.Н. Исследование динамики роста твердой корочки и ее деформации в кристаллизаторе современной сортовой МНЛЗ / А.Н. Смирнов, В.Е. Ухин // Труды научной конференции «50 лет непрерывной разливке стали в Украине» под ред. проф., д.т.н. Дюдкина Д.А.; проф., д.т.н. Смирнова А.Н. – Донецк: ДонНТУ, 2010 – С. 367-378.

### **Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві:**

[1] – створено фізичну модель для вивчення впливу інжекції аргону на оболонку сортової безперервнолитої заготовки, що формується; [2] – виконано систематизацію критеріїв комплексної оцінки якості безперервнолитої сортової заготовки; [3] – виконано фізичне моделювання процесу формування тріщин у кристалізаторі високопродуктивної МБЛЗ при розвитку явища ромбічності; [4] – за допомогою створеної математичної моделі виконано дослідження особливостей розвитку напруг у сортовій заготовці в кристалізаторі МБЛЗ у випадку втрати контакту поверхні зливка з гільзою та показано, що деформації профілю зливка в кристалізаторі є причиною утворення тріщин у заготовці; [5] – за допомогою створеної фізичної моделі для дослідження деформації профілю заготовки в кристалізаторі в процесі взаємодії кірки з гільзою встановлено характер просування зони деформації оболонки зливка залежно від її товщини; [6] – створено фізичну модель для дослідження впливу потоків міді на кірку заготовки, що твердне у кристалізаторі; [7] – виконано фізичне моделювання процесу формування тріщин у кристалізаторі високопродуктивної сортової МБЛЗ при деформації кірки заготовки та показано, що інтенсивне формування тріщин у заготовці відбувається між головними осями дендритів; [8] – виконано аналіз конструкцій сучасних гільз кристалізаторів для високопродуктивного розливання сталі на сортових МБЛЗ; [9] – виконано фізичне моделювання твердіння сталі в кристалізаторі МБЛЗ; [10] – виконані дослідження причин формування ромбічності заготовки в кристалізаторі; [11] – виконано розрахунки процесу твердіння сортової заготовки в кристалізаторі МБЛЗ і запропоновано діапазон швидкостей розливання сталі, що дозволив підвищити продуктивність сортової МБЛЗ ТОВ «Електросталь» на 10 %; [12] – виконано дослідження умов деформації кірки в кристалізаторі.

### **АНОТАЦІЯ**

**Ухін В.Є. Обґрунтування і вдосконалення технологічних параметрів процесу безперервного розливання сталі на високопродуктивних сортових МБЛЗ. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.16.02 - Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів. - Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», Донецьк, 2011.

Вирішено актуальне науково-технічне завдання з теоретичного обґрунтування і удосконалення швидкісного режиму розливання сталі на високопродуктивних сортових МБЛЗ, що дозволив запобігти утворенню поверхневих і підповерхневих тріщин та дефектів форми в заготовці за рахунок поліпшення контакту твердої оболонки зливка з гільзою кристалізатора, зменшити кількість проривів металу під кристалізатором, пов'язаних із явищем тріщиноутворення на 15%, підвищити вихід придатного на 0,02% і збільшити продуктивність машини в умовах ТОВ «Електросталь» на 10%.

Розроблені та створені фізична і математична моделі поперечного перерізу кристалізатора, що дозволили імітувати та досліджувати теплофізичні, механічні процеси та процеси формування кристалічної структури, що відбуваються під час твердіння заготовки в гільзі кристалізатора. На підставі теоретичних досліджень запропоновані заходи, що дозволили підвищити продуктивність МБЛЗ в умовах діючого виробництва.

Ключові слова: безперервне розливання сталі, гільза кристалізатора, тверда кірка, дендритні кристали, діапазон швидкостей розливання, ромбічність.

## АННОТАЦИЯ

**Ухин В.Е. Обоснование и совершенствование технологических параметров процесса непрерывной разливки стали на высокопроизводительных сортах МНЛЗ. – Рукопись.**

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – Металлургия черных и цветных металлов и специальных сплавов. – Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», Донецк, 2011.

Решена актуальная научно-техническая задача по теоретическому обоснованию и усовершенствованию скоростного режима разливки стали на высокопроизводительных сортах МНЛЗ, который позволил предотвратить образование поверхностных и подповерхностных трещин и дефектов формы в заготовке за счет улучшения контакта твердой оболочки слитка с гильзой кристаллизатора, уменьшить количество прорывов металла под кристаллизатором, связанных с явлением трещинообразования на 15%, повысить выход годного на 0,02% и увеличить производительность машины в условиях ООО «Электросталь» на 10%.

Разработана и создана физическая модель поперечного сечения кристаллизатора, которая позволила имитировать процессы, происходящие при затвердевании заготовки в гильзе. Исследовано влияние интенсивности теплопереноса на формирование твердой корочки заготовки, изучены особенности образования кристаллической структуры слитка в кристаллизаторе, а также изучено влияние механической деформации оболочки слитка на формирование макродефектов в заготовке.

При помощи созданной физической модели установлено, что уменьшение интенсивности теплоотвода на каком-либо участке твердой корочки снижает темп ее наращивания в этой зоне, что может привести к появлению достаточно большого количества трещин в твердом каркасе, что локально разупрочняет твердую обложку заготовки и может приводить к ее деформации.

Методами физического моделирования установлено, что при формировании кристаллической структуры заготовки в кристаллизаторе высокопроизводительной МНЛЗ направление роста дендритов в большинстве случаев является хаотичными относительно поверхности теплоотвода, а скорости роста отдельных кристаллов отличаются на 25-35%. Вследствие разнонаправленности роста дендритов, между кристаллами остается 40-60% жидкой фазы, что снижает прочность твердой оболочки. Следствием этого является появление трещин в этой области под действием температурных или механических напряжений.

Физическое моделирование процесса непрерывной разливки стали, когда формирующаяся твердая корочка заготовки может испытывать со стороны стенок гильзы кристаллизатора сжимающее воздействие, позволило обнаружить следующий эффект: характер и величина деформации твердой корочки имеют обратно пропорциональную зависимость от ее толщины. При этом область деформации перемещается из приугловой зоны к центру грани с увеличением толщины твердой корочки заготовки от 2,5 до 9 мм.

При помощи созданной математической модели установлено, что для условий затвердевания в кристаллизаторе наиболее вероятным представляется отхождение одного из углов твердой корочки. При этом в силу уменьшения скорости наращивания твердой корочки и увеличения уровня растягивающих напряжений в этом углу, может наблюдаться значительная деформация профиля заготовки, которая при определенных условиях обуславливает возникновение поверхностной продольной угловой трещины и, возможно, прорыва под кристаллизатором. Также показано, что развитие явления ромбичности при формировании твердого каркаса сортовой заготовки, обуславливается определенным уровнем внутренних напряжений, накопленных твердой корочкой при нахождении в кристаллизаторе. Как правило, отхождение двух углов твердой корочки заготовки может происходить уже в нижней части гильзы кристаллизатора вследствие, например, ее локального износа. После выхода заготовки из кристаллизатора ромбичность продолжает развиваться в большей или меньшей степени, что может приводить к формированию внутренних угловых трещин (преимущественно в тупых углах ромба).

Установлено, что появление поверхностных продольных трещин, являющихся причиной порыва металла, обусловлено попеременной деформацией профиля оболочки слитка, имеющей величину от 1-2 мм, вследствие несоответствия профиля гильзы кристаллизатора параметрам усадки корочки.

В зависимости от скорости разливки начальный момент отхождения корочки заготовки от стенки гильзы кристаллизатора соответствует точке, в которой толщина затвердевшей стали равна 5-7 мм. Это позволило уточнить механизм поведения заготовки в кристаллизаторе и определить оптимальный диапазон скоростей разливки стали, в котором получаемая заготовка соответствует требованиям к

качеству.

Показано, что современный кристаллизатор сортовой МНЛЗ способен формировать качественную заготовку в диапазоне скоростей разлива  $\pm 10-15\%$  от номинальной, что позволяет синхронизировать работу технологической схемы: «сталеплавильный агрегат – установка ковш-печь – машина непрерывного литья заготовки» в условиях мини-завода. Рекомендации по усовершенствованию технологических параметров разлива стали на высокопроизводительной сортовой МНЛЗ, использованные при производстве непрерывнолитой сортовой заготовки сечением 125x125 мм в условиях ООО «Электросталь», позволили повысить производительность МНЛЗ примерно на 10%. Также предложенный скоростной режим разлива стали позволил снизить количество прорывов металла вследствие образования и развития поверхностных и подповерхностных трещин на 15%, увеличить выход годного металла на 0,02% и исключить случаи образования дефектов геометрической формы заготовки, таких как «ромбичность» и продольная «ужимина».

Ключевые слова: непрерывная разливка стали, гильза кристаллизатора, твердая корочка, дендритные кристаллы, трещины, диапазон скоростей разлива, ромбичность.

## ABSTRACT

**Ukhin V.Ye. Justification and improvement of continuous casting process technological parameters at high-productivity billet caster. – Manuscript.**

Thesis for competition of candidate degree in material and engineering sciences on specialty 05.16.02 – Metallurgy of ferrous and non-ferrous metals and special alloys. – State institute of higher education «Donetsk National Technical University», Donetsk, 2011.

The urgent scientific and technical problem of theoretical justification and improvement of casting speed mode on highly productive billet caster, that gave the opportunity to prevent the formation of surface and subsurface cracks and defects of billet geometry by means of improving the ingot's solid shell and the mold tube contact, to reduce the number of breakouts caused by the cracking phenomenon for 15%, to increase the yield for 0,02% and the billet caster productivity in conditions of "Electrostal" LTD for 10%, was solved.

Physical and mathematical models of the mold cross-section which allowed to simulate and to investigate thermal, mechanical and the billet's crystal structure formation processes taking place during the billet solidification in the mould were developed and created. On the basis of the theoretical researches the arrangements which allow to increase the billet casters productivity in conditions of "Electrostal" LTD were introduced.

Key words: continuous casting, mould tube, solid shell, dendritic crystals, casting speed range, rhomboidity.